



UNIVERZITET U NOVOM SADU

ASOCIJACIJA CENTARA ZA INTERDISCIPLINARNE I
MULTIDISCIPLINARNE STUDIJE I ISTRAŽIVANJA
CENTAR ZA METEOROLOGIJU I
MODELIRANJE ŽIVOTNE SREDINE

Modeliranje turbulentnog transporta ugljen-dioksida i azotnih oksida u površinskom sloju atmosfere iznad ruralne oblasti

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:

dr Branislava Lalić, van. prof.

Kandidat:

dipl. inž. master Ana Firanj

Novi Sad, 2014. godine
UNIVERZITET U NOVOM SADU

Univerzitet u Novom Sadu
Asocijacija centara za interdisciplinarne i
multidisciplinarne studije i istraživanja – ACIMSI
Ključna dokumentacijska informacija

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Ana Firanj
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	dr Branislava Lalić, vanredni profesor
Naslov rada: NR	Modeliranje turbulentnog transporta ugljen-dioksida i azotnih oksida u površinskom sloju atmosfere iznad ruralne oblasti
Jezik publikacije: JP	Srpski jezik
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2014.
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Novi Sad, dr Zorana Đinđića 1
Fizički opis rada: FO	(broj poglavlja/ stranica/ slika/ grafikona/ referenci/ priloga) 7/ 181/ 12/ 59/ 200/ 2
Naučna oblast: NO	Meteorologija i modeliranje životne sredine
Naučna disciplina: ND	Modeliranje fizičkih i hemijskih procesa

Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Turbulentni transport gasova, hemijski procesi, emisija gasova iz zemljišta, površinski sloj atmosfere, površinske sheme
UDK	
Čuva se: ČU	Centralna biblioteka Univerziteta u Novom Sadu
Važna napomena: VN	
Izvod: IZ	U okviru doktorske disertacije predstavljeni su postojeći i novi koncepti modeliranja turbulentnog transporta ugljen-dioksida i azotnih oksida u površinskom sloju atmosfere iznad ruralne oblasti. Cilj istraživanja je da se na osnovu postojećih saznanja o procesima koji opisuju interakciju tlo-vegetacija-atmosfera i rezultata mikrometeoroloških eksperimenata unapredi modeliranje procesa interakcije. Poseban akcenat stavljen je na modeliranje turbulentnog transporta gasova iznad i unutar šumskog sklopa. Uticaj vertikalne heterogenosti biljnog sklopa uveden je u predloženi postupak skaliranja asimilacije ugljen-dioksida sa lista na biljni sklop i suve depozicije azotnih oksida. Predloženi koncepti testirani su u okviru fizičke LAPS i hemijske MLC-Chem površinske sheme. Za potrebe modeliranja turbulentnog transporta ugljen-dioksida razvijen je modul za parametrizaciju intenziteta fotosinteze. Kvantitativna analiza rezultata izvedena je poređenjem osmotrenih i simuliranih vrednosti turbulentnih flukseva ugljen-dioksida i azotnih oksida na četiri karakteristična šumska sklopa. Unapređenje modeliranja izvedeno je kaplovanjem testiranih površinskih shema u MLC-LAPS shemu. Kvalitet simulacija MLC-LAPS sheme proveren je poređenjem izlaznih i osmotrenih mikrometeoroloških veličina, koncentracije i turbulentnih flukseva gasova.
Datum prihvatanja teme od strane Senata: DP	16.06.2011.
Datum odbrane: DO	
Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO	predsednik: dr Darko Kapor, redovni profesor za užu naučnu oblast Teorijska fizika, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu član, mentor: dr Branislava Lalić, vanredni profesor za užu naučnu oblast Meteorologija, fizika i biofizika, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu član: dr Dragutin T. Mihailović, redovni profesor za užu naučnu oblast Meteorologija, fizika i biofizika, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu član: dr Ivana Maksimović, redovni profesor za užu naučnu oblast Fiziologija biljaka, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu

University of Novi Sad
ACIMSI
Key word documentation

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	
Author: AU	Ana Firanj
Mentor: MN	Branislava Lalić, PhD, Associate professor
Title: TI	Modeling of turbulent transport of carbon dioxide and nitrogen oxides in the atmosphere surface layer above the rural areas
Language of text: LT	Serbian
Language of abstract: LA	eng. / srp.
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year: PY	2014.
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Novi Sad, dr Zoran Djindjic St 1
Physical description: PD	(chapters/ pages/ tables/ pictures/ charts/ references/ appendix) 7/ 181/ 12/ 59/ 200/ 2
Scientific field SF	Meteorology and Environmental Modeling
Scientific discipline SD	Modeling of physical and chemical processes
Subject, Key words SKW	Turbulent transport of gases, chemical processes, gas emission, atmospheric surface layer, surface schemes, SVAT

UC	
Holding data: HD	Central library of University of Novi Sad
Note: N	
Abstract: AB	<p>This PhD thesis deals with the current and new concepts of modeling turbulent transport of carbon dioxide and nitrogen oxides in the surface layer of the atmosphere above the rural areas. The aim of this research is to improve modeling of the interaction between soil-vegetation-atmosphere based on existing knowledge about the processes describing the interaction and results of micrometeorological experiments. Special emphasis is placed on the modeling of turbulent transport of gases above and within the forest canopy. Influence of vertical canopy heterogeneity was introduced in the proposed method for scaling the assimilation of carbon dioxide from the leaf to canopy level and dry deposition of nitrogen oxides. The presented concepts are tested within the physical LAPS and chemical MLC-Chem surface schemes. For the purposes of modeling the turbulent transport of carbon dioxide the module for parameterization of photosynthesis was developed. Quantitative analysis of the results were made by comparing the observed and simulated values of turbulent fluxes of carbon dioxide and nitrogen oxides in four distinctive forest canopies. Modeling improvement was performed by coupling tested surface schemes into MLC-LAPS scheme. Quality of MLC-LAPS scheme simulations is verified by comparing the output and observed micrometeorological elements and turbulent fluxes of energy and gases.</p>
Accepted on Senate on: AS	16.06.2011.
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<p>president: dr Darko Kapor, Professor of Theoretical physics at the Faculty of Science, University of Novi Sad member, mentor: dr Branislava Lalić, Associate Professor of Meteorology, physics and biophysics, Faculty of Agriculture, University of Novi Sad member: dr Dragutin T. Mihailović, professor of Meteorology, physics and biophysics, Faculty of Agriculture, University of Novi Sad member: dr Ivana Maksimović, professor of Plant physiology, Faculty of Agriculture, University of Novi Sad</p>

ZAHVALNICA

Doktorat je realizovan u okviru projekta

„Istraživanje klimatskih promena i njihovog uticaja na životnu sredinu: praćenje, adaptacija i ublažavanje“ (43007) koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru programa Integrisanih i interdisciplinarnih istraživanja za period 2011–2014. godine.

* * *

Doktorska disertacija je rađena u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja na Prirodno-matematičkom fakultetu, Departman za fiziku, i kao završni rad doktorskih studija Centra za meteorologiju i modeliranje životne sredine u okviru ACIMSI Univerziteta u Novom Sadu. Osnova prijave teme i rada na doktoratu bila je izuzetna podrška stranih istraživača u obezbeđivanju potrebnih podataka. Prema tome ovom prilikom želim da se zahvalim svim istraživačima koji su učestvovali na merenjima u okviru BOREAS projekta, ABRACOS projekta i Harvard Forest projekta i bez kojih istraživanja poput ovog nisu moguća.

Isto tako želim da se zahvalim dr Lorencu Ganzveldu (Laurens Ganzveld) sa Univerziteta u Vageningenu na velikoj podršci i mogućnosti da radim sa shemom MLC-Chem koju je razvio.

* * *

Posle promenjene struke i upisivanja doktorskih studija, mnogo rada i učenja, konačno sam došla do momenta kada mogu da se zahvalim svim ljudima, koji su mi nesebično izlazili u susret, sve ove godine. Hvala im što su me prepoznali. Osoba kojoj dugujem najveću zahvalnost, od koje sam najviše naučila, koja me je gurala, ohrabivala, kritikovala, hvalila i bez čije pomoći i mentorstva ja sigurno ne bih uspela je dr Branislava Lalić. Od polaganja ispita na doktorskim studijama do prijave teme i pisanja disertacije tri profesora značajno su uticala na moj rad. Zahvaljujem se profesoru Dragutinu Mihailoviću, profesoru Darku Kaporu i profesoru Bori Rajkoviću.

Hvala za svu podršku, savete i znanje koje ste podelili samnom.

Posebno se zahvaljujem svojoj dragoj koleginici Zorici Podraččanin na strpljenju i velikoj pomoći u toku studija i pri izradi doktorata i kolegi Petru Malom na svim sugestijama.

Najveću zahvalnost dugujem mami, tati, sestri Inji jer su istrpeli duga neviđanja i pružili mi punu podršku tokom svih ovih godina. Hvala prijateljima koji su pomno slušali, a posebno Velji (što postoji :) za sva ohrabrenja i veru u moj uspeh.

SADRŽAJ

LISTA TABELA.....	9
LISTA GRAFIKONA.....	10
REZIME.....	13
SUMMARY.....	14
1. UVOD.....	16
1.1 Pregled literature.....	19
2. RAZMENA GASOVA IZMEĐU BIOSFERE I POVRŠINSKOG SLOJA ATMOSFERE.....	22
2.1 Uvod.....	22
2.2 Turbulentni transport gasova iznad golog zemljišta i biljnog sklopa.....	26
2.2.1 Kretanje vazduha iznad golog zemljišta i biljnog sklopa.....	26
2.2.2 Zatvaranje jednačina kretanja iznad vegetacije.....	32
2.2.3 Zemljište kao izvor i ponor CO ₂ i NO _x	33
2.2.4 Hemijski procesi.....	37
2.3 Turbulentni transport gasova unutar visoke vegetacije.....	46
2.3.1 Kretanje vazduha unutar biljnog sklopa.....	46
2.3.2 Zatvaranje jednačina kretanja unutar vegetacije.....	47
2.3.3 Difuzija polutanata unutar biljnog sklopa.....	49
2.3.4 Biljni sklop kao izvor i ponor CO ₂ i NO _x	50
2.3.5 Hemijski procesi.....	53
2.3.6 Vertikalna raspodela gustine biljnog sklopa.....	57
3. MODELIRANJE TURBULENTNOG TRANSPORTA CO ₂	59
3.1 Uvod.....	59
3.2 Modeliranje razmene CO ₂ na listu.....	60
3.2.1 Modeliranje procesa fotosinteze.....	60
3.2.2 Snabdevanje lista ugljen-dioksidom.....	65
3.2.3 Otpornost stoma na difuziju CO ₂	67
3.2.4 Modeliranje procesa respiracije zemljišta.....	69
3.3 Modeliranje turbulentnog fluksa CO ₂ na nivou biljnog sklopa.....	69
3.3.1 Osnovni postupak skaliranja turbulentnog fluksa CO ₂	70
3.3.2 SS postupak skaliranja turbulentnog fluksa CO ₂	72

4.	MODELIRANJE TURBULENTNOG TRANSPORTA AZOTNIH OKSIDA	74
4.1	Uvod	74
4.2	Modeliranje procesa suve depozicije	75
4.3	Modeliranje emisije iz zemljišta	78
4.4	Modeliranje hemijskih procesa	79
4.5	Skaliranje koncentracija	81
5.	KAPLOVANA MLC-LAPS SVAT SCHEMA.....	83
5.1	Uvod	83
5.1.1	LAPS shema	84
5.1.2	MLC-Chem shema	87
5.2	Modul za parametrizaciju turbulentnog fluksa CO ₂ – CO ₂ modul.....	88
5.2.1	Nedostaci SS postupka skaliranja turbulentnog fluksa CO ₂	90
5.2.2	Novi postupak skaliranja turbulentnog fluksa CO ₂ - SSL postupak	90
5.3	Kaplovanje SVAT shema	96
6.	VERIFIKACIJA KAPLOVANE MLC-LAPS SCHEME	97
6.1	Opis mernih mesta i podataka korišćenih za verifikaciju sheme	97
6.2	Kvantitativna analiza dobijenih rezultata	102
6.3	Verifikacija LAPS sheme.....	104
6.4	Verifikacija MLC-Chem sheme.....	113
6.5	Verifikacija modula za parametrizaciju fluksa CO ₂	122
6.6	Verifikacija SSL postupka skaliranja.....	131
6.6.1	Uticaoj strukture biljnog sklopa na GPP	136
6.6.2	Uticaoj strukture biljnog sklopa na razdvajanje GPP.....	138
6.7	Verifikacija MLC-LAPS.....	139
6.7.1	Uticaoj strukture biljnog sklopa na koncentraciju NO _x	147
6.7.2	Uticaoj strukture biljnog sklopa na turbulentni fluks NO _x	149
7.	ZAKLJUČAK I BUDUĆI PLANovi.....	152
	LITERATURA.....	156
	DODATAK A.....	166
	DODATAK B	170
	LISTA SKRAĆENICA.....	174
	LISTA HEMIJSKIH SIMBOLA.....	175
	LISTA SIMBOLA	175

LISTA TABELA

Tabela 2.1 Struktura PGS-a i procesi koji utiču na razmenu materije.	24
Tabela 2.2 Vrednosti fon Karmanove konstante prema različitim autorima.	30
Tabela 2.3 Vrednosti Prandtlvog turbulentnog broja za fluks toplote, vodene pare i ostalih pasivnih gasova prema različitim autorima.	31
Tabela 2.4 Pregled reakcija različitog reda i njihovih brzina u diferencijalnom i integralnom obliku..	42
Tabela 2.5 Vrednosti energije aktivacije (E_a) i Q_{10} koeficijenta za emisiju odabranih polutanata.	44
Tabela 2.6 Osnovne fotohemijske reakcije u troposferi.....	45
Tabela 4.1 Vrednosti kutikularnog otpora u zavisnosti od podloge.....	77
Tabela 4.2 Koeficijenti korišćeni u otpornoj reprezentaciji za računanje suve depozicije različitih gasova.	78
Tabela 4.3 Faktori emisije različitih ekosistema prema Jingeru i Leviu.....	79
Tabela 6.1 Osnovni podaci o četiri lokaliteta korišćena u verifikaciji LAPS, MLC-Chem i MLC-LAPS sheme.....	100
Tabela 6.2 Empirijski kriterijum ocene jačine korelacije.	103
Tabela 6.3 Parametri vegetacije PFT LAPS sheme.....	104
Tabela 6.4 Vrednosti koeficijenata korelacije i determinacije izračunatih vrednosti H , λE i R_{net} LAPS shemom.	108
Tabela 6.5 Parametri korišćeni prilikom verifikacije MLC-Chem sheme.	119
Tabela 6.6 Vrednosti koncentracije trasera u MLC-Chem shemi.	119
Tabela 6.7 Vrednosti parametara R_{ref} i E_0 dobijenih fitovanjem Lojd&Tejlor empirijske formule.....	122
Tabela 6.8 Vrednosti biohemijski parametara prema PFT.	123
Tabela 6.9 Vrednosti koeficijenata korelacije i determinacije osmotrenog i modeliranog GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).	130
Tabela 6.10 Opseg vrednosti ν , σ_c i σ_o GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) izračunatog u CO_2 modulu.....	131
Tabela 6.11 Vrednosti koeficijenata korelacije i determinacije osmotrenog i modeliranog GPP izračunatog preko SS i SSL postupka skaliranja.	136
Tabela 6.12 Opseg vrednosti ν , σ_c i σ_o GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) izračunatog preko SS i SSL postupka skaliranja.	136
Tabela 6.13 Parametri korišćeni u testu osetljivosti.	137
Tabela 6.14 Opseg ν , σ_c i σ_o koncentracije NO (10^3 ppt) izračunate MLC-Chem i MLC-LAPS shemama.	143
Tabela 6.15 Opseg ν , σ_c i σ_o koncentracije NO_2 (10^3 ppt) izračunate MLC-Chem i MLC-LAPS shemama.	143
Tabela A.1 Hemijske reakcije gasne faze Carbon Bond Mechanism IV (CBM4).....	166
Tabela B.1 Vrednosti srednje kvadratne greške (ν), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti temperature (T_c) i relativne vlažnosti vazduha (R_{hc}) unutar biljnog sklopa na lokalitetu HF-EMS.....	170

Tabela B.2 Vrednosti srednje kvadratne greške (v), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} na lokalitetu ABR-RJ.....	171
Tabela B.3 Vrednosti srednje kvadratne greške (v), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} na lokalitetu NSA-OBS.	171
Tabela B.4 Vrednosti srednje kvadratne greške (v), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} na lokalitetu SSA-OA.....	172
Tabela B.5 Vrednosti srednje kvadratne greške (v), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} na lokalitetu SSA-OA.....	173

LISTA GRAFIKONA

Slika 2.1 Interakcija između kopnenih ekosistema i atmosfere sa aspekta klimatskih promena.	22
Slika 2.2 Shematski prikaz PGS-a u polju visokog pritiska, iznad kopna.....	24
Slika 2.3 Ciklus azotnih jedinjenja u biosferi, troposferi i stratosferi.	34
Slika 2.4 Globalni ciklus ugljenika.	35
Slika 2.5 Dijagram termina osnovnih veličina ciklusa CO_2	51
Slika 2.6 Srednje mesečne vrednosti profila koncentracije CO_2 unutar šumskog sklopa.....	52
Slika 2.7 Molekul hlorofila a.	54
Slika 2.8 Tri faze Calvinovog ciklusa produkcije glukoze iz asimilovanog CO_2	55
Slika 3.1 Rezultati Montitovog eksperimenta.	61
Slika 3.2 Zavisnost neto asimilacije CO_2 (intenziteta fotosinteze) od gustine fluksa PAR-a.....	65
Slika 3.3 Grafički prikaz mezofila lista sa stomom i odgovarajućim koncentracijama i transportima. 65	
Slika 4.1 Otporna reprezentacija površinskog otpora depoziciji gasovitih polutanata.....	77
Slika 5.1 Blok shema iterativnog postupka rešavanja jednačina u CO_2 modulu.	89
Slika 5.2 $LM_{LAD(z)}$ i $TT_{LAD(z)}$ profili izračunati za dve lokacije RJ i RD u amazonskoj šumi.	91
Slika 5.3 Poređenje profila zračenja izračunatih za RJ lokalitet sa tri LAD profila: $LM_{LAD(z)}$, $TT_{LAD(z)}$ i osnovnim logaritamskim $CL_{LAD(z)}$	92
Slika 5.4 $LM_{LAD(z)}$ i oblici krošnji zastupljeni u ekološkim modelima 94	
Slika 6.1 Smrekova šuma, NSA-OBS.....	98
Slika 6.2 Jasikova šuma, SSA-OA.....	99
Slika 6.3 Tropska šuma, ABR-RJ.	99
Slika 6.4 Mešovita listopadna šuma HF-EMS.....	101
Slika 6.5 Vremenska distribucija merenja koncentracije NO , NO_2 i O_3 u 2002. godini na HF-EMS. ...	101
Slika 6.6 Prikaz različitih korelacija podataka na dijagramu rasipanja 103	
Slika 6.7 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti T_c i R_{hc} unutar biljnog sklopa na HF-EMS..	105
Slika 6.8 Vrednosti v , σ_o i σ_c temperature (T_c) i relativne vlažnost vazduha (R_{hc}) unutar biljnog sklopa.	105
Slika 6.9 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) na NSA-OBS.....	106

Slika 6.10 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) na SSA-OA.	107
Slika 6.11 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) na HF-EMS.	108
Slika 6.12 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) na ABR-RJ.	109
Slika 6.13 Vrednosti v , σ_c i σ_o turbulentnog fluksa osetne toplote (H).	110
Slika 6.14 Vrednosti v , σ_c i σ_o turbulentnog fluksa latentne toplote (λE).	111
Slika 6.15 Vrednosti v , σ_c i σ_o neto zračenja (R_{net}).	112
Slika 6.16 Osmotrene i modelirane vrednosti koncentracije NO u slojevima r-h i h-bh.	114
Slika 6.17 Osmotrene i modelirane vrednosti koncentracije NO ₂ u slojevima r-h i h-bh.	114
Slika 6.18 Vrednosti v , σ_c i σ_o koncentracije NO u sloju vazduha r-h i h-bh.	115
Slika 6.19 Vrednosti v , σ_c i σ_o koncentracije NO ₂ u sloju vazduha r-h i h-bh.	116
Slika 6.20 Osmotrene i modelirane srednje vrednosti koncentracije NO i NO ₂ za 12 sati (dan).	117
Slika 6.21 Osmotrene i modelirane srednje vrednosti koncentracije NO i NO ₂ za 12 sati (noć).	118
Slika 6.22 Koncentracije jedinjenja izračunata MLC-Chem shemom.	120
Slika 6.23 Turbulentni fluksevi jedinjenja izračunati MLC-Chem shemom.	121
Slika 6.24 Modelirane i osmotrene vrednosti GPP na lokalitetu NSA-OBS.	124
Slika 6.25 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na lokalitetu NSA-OBS.	124
Slika 6.26 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP dobijenih SS postupkom skaliranja na NSA-OBS.	125
Slika 6.27 Modelirane i osmotrene vrednosti GPP na lokalitetu SSA-OA.	125
Slika 6.28 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na lokalitetu SSA-OA.	126
Slika 6.29 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP dobijenih SS postupkom skaliranja na SSA-OBS.	126
Slika 6.30 Modelirane i osmotrene vrednosti GPP na lokalitetu HF-EMS.	127
Slika 6.31 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na lokalitetu HF-EMS.	127
Slika 6.32 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP dobijenih SS postupkom skaliranja na HF-EMS.	128
Slika 6.33 Modelirane i osmotrene vrednosti GPP na lokalitetu ABR-RJ.	128
Slika 6.34 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na lokalitetu ABR-RJ.	129
Slika 6.35 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP dobijenih SS postupkom skaliranja na ABR-RJ.	129
Slika 6.36 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) preko SS i SSL principa skaliranja na četiri lokaliteta.	132
Slika 6.37 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP izračunatih sa SS i SSL procesom skaliranja na NSA-OBS.	133
Slika 6.38 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP izračunatih sa SS i SSL procesom skaliranja na SSA-OA.	133
Slika 6.39 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP izračunatih sa SS i SSL procesom skaliranja na HF-EMS.	134
Slika 6.40 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP izračunatih sa SS i SSL procesom skaliranja na ABR-RJ.	135
Slika 6.41 Profili direktnog PAR-a (a), odgovarajućeg $LAD(z)$ profila (b) i izračunatog GPP za različite vrednosti z_m	137
Slika 6.42 $LAD(z)$ profili gornjeg i donjeg sprata biljnog sklopa uz odgovarajuće vrednosti GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) modelirane SSL postupkom skaliranja.	138
Slika 6.43 Poređenje osmotrenih koncentracija NO i NO ₂ sa vrednostima modeliranim MLC-Chem i MLC-LAPS shemama u sloju vazduha r-h.	140

Slika 6.44 Vrednosti v , σ_c i σ_o koncentracije NO modelirane MLC-Chem i MLC-LAPS shemama u slojevima r-h i h-bh.	140
Slika 6.45 Vrednosti v , σ_c i σ_o koncentracije NO ₂ modelirane MLC-Chem i MLC-LAPS shemama u slojevima r-h i h-bh.	141
Slika 6.46 Vrednosti simulacije HYSPLIT modelom trajektorija.....	142
Slika 6.47 Poređenje srednjih satnih osmotrene vrednosti NO _y i modelirane vrednosti turbulentnog fluksa NO _x	144
Slika 6.48 Koncentracije izabranih jedinjenja simuliranih MLC-LAPS shemom.....	145
Slika 6.49 Turbulentni fluksevi izabranih jedinjenja simulirani MLC-LAPS shemom.	146
Slika 6.50 Srednje satne vrednosti izračunatih i izmerenih turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) za 5 dana na HF-EMS.	147
Slika 6.51 Promena intenziteta fotodisocijacije za različite vrednosti parametra z_m	148
Slika 6.52 Promena brzine depozicije za različite vrednosti parametra z_m	148
Slika 6.53 Koncentracija različitih polutanata izračunata za različite vrednosti z_m	149
Slika 6.54 Promena vrednosti fluksa u danu sa najvećom promenom koncentracije za različite vrednosti parametra z_m	150
Slika 6.55 Promena vrednosti fluksa za različite vrednosti parametra z_m	150

REZIME

Utvrđivanje uticaja prirodnih i antropogenih izvora sa tla na promenu koncentracije različitih gasova i čestica u atmosferi jedan je od ključnih zadataka svih studija koje se bave procenom kvaliteta vazduha. Razumevanje procesa interakcije između biosfere i atmosfere daje uvid u manje poznate izvore i/ili ponore zagađenja vazduha generisane u ruralnoj sredini. U okviru doktorske disertacije pažnja je posvećena postojećim i novim konceptima modeliranja turbulentnog transporta ugljen-dioksida (CO₂) i azotnih oksida (NO_x) u površinskom sloju atmosfere iznad ruralne oblasti. Teorijske osnove za razmatranje uticaja interakcije proistekle su iz već postojeće teorije o turbulentnom transportu količine kretanja, toplote i vlage u površinskom sloju atmosfere. Posebna pažnja posvećena je uticaju biljnog sklopa koji predstavlja aktivni izvor i/ili ponor na turbulentni transport gasova, posebno CO₂, zbog karakteristika vegetacije da ga apsorbuje i koristi. Modeliranje turbulentnog transporta CO₂ započelo je izborom odgovarajuće tehnike i izvedeno razvijanjem CO₂ modula koji je obuhvatio: 1) modeliranje procesa fotosinteze, 2) fotorespiracije biljaka i 3) respiracije zemljišta neophodne za proračun neto razmene gasa između biosfere i atmosfere. U okviru unapređenja modeliranja razvijen je novi postupak za prelazak (skaliranje) sa intenziteta fotosinteze i fotorespiracije lista na intenzitet razmene na nivou biljnog sklopa. Razvijeni postupak skaliranja uključio je karakterističan oblik krošnje, odnosno uticaj vertikalne heterogenosti na razmenu gasova na nivou biljnog sklopa. Modeliranje turbulentnog transporta azotnih oksida izvedeno je upotrebom postojećih saznanja u okviru modeliranja hemijskih procesa površinskog sloja atmosfere. Unapređenje procesa modeliranja izvedeno je upotrebom razvijenog postupka skaliranja i unapređenjem proračuna mikrometeoroloških veličina od značaja za odvijanje hemijskih procesa i procesa suve depozicije gasova.

Sve navedene pretpostavke i koncepti validirani su u okviru fizičke LAPS (Land-Air Parameterization Scheme) sheme i hemijske MLC-Chem (Multi-Layer Canopy exchange model) sheme kaplovanе da bi se kreirala MLC-LAPS shema. Testiranje LAPS sheme na uslove visoke vegetacije izvedeno je na mesečnim polusatnim i satnim merenjima turbulentnih flukseva latentne i osetne toplote, kao i neto apsorbovanog zračenja na četiri karakteristična šumska lokaliteta. Isti lokaliteti iskorišćeni su za verifikaciju modula za parametrizaciju neto razmene CO₂ između biljnog sklopa i površinskog sloja atmosfere i za verifikaciju unapređenog postupka skaliranja. Verifikacija MLC-Chem sheme izvedena je na jednom šumskom lokalitetu poređenjem osmotrenih i izračunatih vrednosti koncentracije NO_x. Kaplovana MLC-LAPS shema testirana je poređenjem osmotrenih koncentracija NO_x sa koncentracijama izračunatim MLC-Chem i kaplovanom MLC-LAPS shemom. Kvalitet simulacija MLC-LAPS sheme proveren je poređenjem izlaznih i osmotrenih mikrometeoroloških veličina, koncentracije i turbulentnih flukseva gasova.

MLC-LAPS shema omogućava simuliranje mikrometeoroloških, biofizičkih i hemijskih veličina, kao i uticaj različitih tipova vegetacije na intenzitet procesa razmene gasova. Prema tome, kaplovana shema je vrhunski alat u proceni koncentracije gasova koji doprinose efektu staklene bašte i kvaliteta ambijentalnog i globalnog vazduha.

SUMMARY

Determining the impact of natural and anthropogenic ground sources on the concentration change of various gases and particles in the atmosphere is one of the key tasks of all studies dealing with the assessment of air quality. Understanding the process of interaction between the biosphere and the atmosphere gives an insight into the lesser-known sources and /or sinks of air pollution generated in rural areas. In this dissertation we deal with existing and new concepts of modelling turbulent transport of carbon dioxide (CO₂) and nitrogen oxides (NO_x) in the surface layer of the atmosphere above the rural areas. Theoretical basis used are derived from existing theories of turbulent transport of momentum, heat and moisture in the surface layer of the atmosphere. Special attention is given to canopy impact on gases turbulent transport. Canopy act as active source and /or sink of the gases, particularly CO₂ due to the characteristics of vegetation to absorb and use it, therefore it need to be taken into consideration separately. Modelling of turbulent transport of CO₂ began by selecting the appropriate techniques and by developing modules, which include modelling of: 1) photosynthesis, 2) plant photorespiration and 3) soil respiration, necessary for the calculation of net gas exchange between the biosphere and atmosphere. In the context of modelling improvement a new method for the transition (scaling) the rate of photosynthesis and photorespiration from the leaf level to the canopy level was developed. The new method of scaling include crown shape, or the impact of vertical heterogeneity on gas exchange at the canopy level. Modelling of nitrogen oxides turbulent transport was performed using the existing knowledge about modelling of chemical processes in the surface layer of the atmosphere. Improving the modelling process is carried out using the developed scaling process in dry deposition and radiation transition scheme, and by improving calculation of micrometeorological values that are drivers of the chemical processes and dry deposition of gases.

All assumptions and concepts introduced are validated within the physical - LAPS (Land-Air Parameterization Scheme) scheme and chemical - MLC-Chem (Multi-Layer Canopy exchange model) scheme coupled to create a MLC-LAPS scheme. LAPS scheme was tested in terms of simulation quality for turbulent fluxes of latent and sensible heat and net absorbed radiation at four distinctive forest sites. Measurements used were carried out in the time frame of the one month of half-hour and hourly micrometeorological, as well as pollutant concentration measurements. The same four sites were used for verification of CO₂ net exchange parameterization module as well as to verify developed scaling from leaf to canopy process. Verification of MLC-Chem scheme was performed on a forest site by comparing the observed and calculated values of the NO_x concentration. Coupled MLC-LAPS scheme was tested by comparing the observed concentration of NO_x vs calculated concentration from the MLC-Chem and coupled MLC-LAPS scheme. The quality of the simulation of MLC-LAPS scheme is verified by comparing the outputs and observed values of micrometeorological quantities, concentration and gases turbulent fluxes.

MLC-LAPS can be used for the simulation of micrometeorological, biophysical and chemical quantities and the influence of different vegetation types on the intensity of the gas exchange processes. Thus coupled scheme is a state of the art tool in the assessment of the gases concentration that contribute to the greenhouse effect and the quality assessment of the ambient and global air.

Ženeva, 26. maj 2014. Svetska meteorološka organizacija (*World Meteorological Organization*, WMO) objavila je da su, po prvi put od kako se prate, mesečne koncentracije ugljen-dioksida (CO₂) u atmosferi dostigle nivo od 400 delova po milionu (ppm) u aprilu mesecu širom severne hemisfere. Dostignuti prag je od simboličkog, civilizacijskog i naučnog značaja i ukazuje na promene kvaliteta vazduha izazvane ljudskim aktivnostima odgovorne za pojačavanje prirodnog efekta staklene bašte. Sve stanice na severnoj hemisferi u okviru globalne osmatračke mreže (*Global Atmosphere Watch network*) u okviru WMO prijavile su rekordne atmosferske koncentracije CO₂ tokom sezonskog maksimuma. Maksimum se na severnoj hemisferi javlja u rano proleće pre početka intenzivne vegetacije kada biljke aktivno apsorbuju CO₂. Iako su klimatolozi prognozirali da se globalni godišnji proseki od 400 ppm CO₂ neće javiti pre 2015. ili 2016. godine, prolećne maksimalne vrednosti u 2014. godini na severnoj hemisferi već su prešle nivo od 400 ppm.

Generalni sekretar WMO, Mišel Žero (*Michel Jarraud*) ovim povodom je izjavio: „Ovo bi trebalo da posluži kao još jedan poziv za buđenje zbog konstantno rastućeg nivoa gasova sa efektom staklene bašte koji uzrokuju klimatske promene“, i dodao „ukoliko želimo da sačuvamo našu planetu za buduće generacije, potrebno je da preduzmemo akcije za ograničavanje nove emisije tih gasova.“
„Vreme nam ističe“, zaključio je Žero.

1. UVOD

Atmosfera je gasoviti Zemljin omotač čija masa je lokalizovana u sloju debljine približno 100 km. Na sve gasove i čestice, koji čine atmosferu, deluje sila Zemljine teže. Privlačno delovanje sile stvara vertikalnu raspodelu gustine, takvu da je sloj vazduha u neposrednom dodiru sa tlom najgušći. Danas je prihvaćena pretpostavka da je atmosfera nastala radom vulkana koji su izbacivali velike količine gasova zarobljenih unutar planete u procesu formiranja. U smeši gasova oslobođenih erupcijama nalazila se i vodena para koja je kondenzacijom u atmosferi stvorila oblake. Pojava oblaka dovodi do pojave padavina, akumulacije vode na tlu i hlađenja planete. Od samog nastanka sastav atmosfere diktirali su uslovi na tlu. Prisustvo kiseonika u današnjoj atmosferi vezano je za razvoj života na planeti. Smatra se da su prvi organizmi sa mogućnošću produkcije kiseonika u metaboličkim reakcijama razvijeni u vodi u anaerobnim uslovima, dovoljno daleko od površine da izbegnu štetno ultravioletno (UV) zračenje, a dovoljno blizu da koriste sunčevu svetlost kao izvor energije. Oslobođanje kiseonika dovelo je do generisanja ozona i ozonskog omotača. Formiranje ozonskog omotača, koji je apsorbovao štetno UV zračenje, omogućilo je naseljavanje kopna.

Danas se atmosfera sastoji od: 1) stalnih gasova skoro nepromenljive koncentracije u koje spadaju azot (N_2) 78,08 % zapreminski, kiseonik (O_2) 20,95 %, argon (Ar) 0,93 %, ugljen-dioksid (CO_2) 0,0397 %, neon (Ne) $1,818 \cdot 10^{-3}$ %, helijum (He) $5,24 \cdot 10^{-4}$ % i metan (CH_4) $1,79 \cdot 10^{-4}$ %, 2) gasova promenljive koncentracije u koje se ubrajaju vodena para ($H_2O_{(g)}$) 0–0,04 % i gasovi u tragovima kao što su ozon (O_3) 0– $12 \cdot 10^{-4}$ %, sumpor-dioksid (SO_2) $1 \cdot 10^{-7}$ %, azot-dioksid (NO_2) $1 \cdot 10^{-7}$ %, amonijak (NH_3) $4 \cdot 10^{-7}$ %, azot-monoksid (NO) $5 \cdot 10^{-9}$ %, itd. i 3) aerosola, čvrstih i tečnih čestica generisanih u prirodnim i industrijskim procesima (prašina, dim, morska so, itd.), čiji udeo u atmosferi je veoma promenljiv u prostoru i vremenu. Gasovi u tragovima, bez obzira na veoma malu koncentraciju u atmosferi, odgovorni su za održavanje jednog od najvažnijih procesa po život na planeti - efekta staklene bašte. Termin „efekat staklene bašte” u modernu nauku uveo je matematičar Žozef Furije (*Baron Jean Baptiste Fourier*) 1827. godine kada je atmosferu opisao kao staklenu kutiju kroz koju sunčevi zraci prolaze na putu do tla i koja zadržava dugotalasno izračivanje zemlje. Staklo koje pokriva staklenu baštu propušta kratkotalasno sunčevo zračenje, ali zadržava zemljino izračivanje za talasne dužine veće od 3 μm . Pored toga apsorbovanje dugotalasnog zračenja nije jedini uzrok povećanja temperature vazduha unutar staklene bašte, drugi, možda i bitniji uzrok, je

onemogućavanje toplog vazduha da napusti sistem. Sredinom XIX veka merenja pirheliometrom, koja je izveo Klod Pulet (*Claude Servais Mathias Pouillet*) i laboratorijski eksperimenti Džona Tindala (*John Tydall*), demonstrirali su postojanje molekula u atmosferi (molekuli $H_2O_{(g)}$ i CO_2) sa sposobnošću selektivne spektralne apsorpcije dugotalasnog zračenja. Prvi model bilansa zračenja između atmosfere i tla razvio je Savante Arenijus (*Svante Arrhenius*) 1896. godine prema Langlejevoj (*Samuel Pierpont Langley*) identifikaciji apsorpcionih traka molekula H_2O i CO_2 uz zaključak da bi povećanje koncentracije CO_2 dovelo do povećanja globalne temperature. Posle Arenijusa prvi naučnik koji je razmatrao tu činjenicu bio je britanski istraživač Gaj Kalender (*Gay Callendar*) koji je započeo objavljivanje istraživanja tridesetih godina XX veka sa jasnom porukom, da će povećana koncentracija CO_2 usloviti povećanje globalne temperature. Prema Kalenderu zadržavanje trenda porasta koncentracije CO_2 zabeleženog u periodu od 1900. do 1930. godine uslovilo bi povećanje globalne temperature od $0,03^\circ C$ na svakih deset godina.

Spomenuti istraživači pokazali su da se atmosfera ne ponaša u potpunosti kao staklena bašta, ali se termin „efekat staklene bašte“ zadržao do danas. Atmosfera je u stalnom kretanju i topao vazduh se nesmetano podiže uvis, dok apsorpciju dugotalasnog zračenja vrše molekuli različitih gasova - gasovi staklene bašte (GSB). Pored H_2O i CO_2 , koje su identifikovali naučnici krajem XIX veka, u GSB ubrajaju se i metan (CH_4), azot-suboksid (N_2O), hlorofluorougljenici (CFC), ozon (O_3), i još mnogi drugi. Posledica apsorpcije zračenja od strane molekula u infracrvenoj oblasti spektra je „zarobljavanje“ toplotnog dugotalasnog zračenja u nižim slojevima atmosfere. Predstavljeni efekat staklene bašte, u meteorologiji često nazivan i atmosferski efekat, doprinosi porastu globalne temperature i smanjenju njene dnevne oscilacije. Međutim, neophodno je napraviti razliku između efekat staklene bašte, kao prirodnog procesa, i globalnog otopljanja koje je posledica narušavanja prirodnog bilansa zračenja između tla i atmosfere.

Atmosfera se prema termičkim karakteristikama deli na troposferu, stratosferu, mezosferu i jonosferu. Sa stanovišta promene kvaliteta vazduha i narušavanja bilansa zračenja efekta staklene bašte najznačajniji sloj atmosfere je troposfera. Blizina podloge utiče na fizičko-hemijske karakteristike troposfere pa se i u njoj mogu uočiti različiti slojevi za koje su vezani različiti vertikalni i horizontalni procesi. Prema tome, troposfera se deli na planetarni granični sloj (PGS), sloj vazduha koji naleže na tlo, i slobodnu atmosferu (SA) koja se proteže do gornje granice troposfere. Intenzitet narušavanja bilansa zračenja efekta staklene bašte u direktnoj je korelaciji sa emisijom polutanata iz prirodnih i antropogenih izvora sa tla. Upravo je PGS, odnosno njegove transportne karakteristike, odgovoran za konstantan priliv gasova (polutanata^{*}) sa površine.

Danas se uviđaju posledice globalnog porasta temperature i promena klime koje su izazvane i/ili ubrzane porastom koncentracije polutanata koji doprinose efektu staklene bašte, menjanjem kvaliteta ambijentalnog vazduha i razaranjem ozonskog omotača, a na koje su nas upozoravali naučnici pre više od sto godina. Meteorološki transportni procesi i hemijske reakcije u atmosferi

* Zagađenje životne sredine predstavlja svaku kvantitativnu ili kvalitativnu promenu fizičkih, hemijskih ili bioloških karakteristika osnovnih delova životne sredine (vazduh, voda i zemljište) koja dovodi do narušavanja zakonitosti utemeljenih na mehanizmima samoregulacije. Supstance koje utiču na kvalitet životne sredine najčešće se nazivaju polutanti. U gasovite polutante ubrajaju se gasovi koji poseduju sposobnost apsorpcije dugotalasnog zračenja, štetno utiču na floru, faunu i zdravlje ljudi.

formiraju osnovnu vezu između stope emisije i rezultujuće ambijentalne koncentracije polutanata. Praćenje kvaliteta vazduha, ukoliko uključuje praćenje i ocenu intenziteta izvora i ponora nekog od nereaktivnih, slabo reaktivnih (pasivnih) ili reaktivnih polutanata, obuhvata identifikovanje fizičkih i hemijskih procesa koji utiču na životni vek, transport, produkciju i degradaciju polutanta. Direktna merenja koncentracija predstavljaju jedan, najčešće najbolji, način uspostavljanja veze između jačine izvora i/ili ponora i ambijentalne koncentracije. Međutim, merenje flukseva i vertikalnih profila koncentracije GSB u atmosferi, u različitim agroekološkim uslovima i na dovoljno gustoj mreži stanica, privilegija je samo najbogatijih zemalja i njihovih institucija. Pored toga, ni najgušća mreža stanica nije dovoljna da se za svako mesto na planeti odredi sadržaj i vertikalna distribucija nekog od GSB. Moderna dostignuća u oblasti informatike, merne i računarske tehnike, daju alternativu u obliku numeričkih modela, koji iako grublje opisuju složene procese razmene, pružaju informacije o razmeni gasova na veoma gustoj mreži i u različitim uslovima sredine. Modeliranje transporta u PGS-u je nezaobilazan korak u svim studijama čiji je cilj praćenje sadržaja GSB. Shodno tome razvijeni su globalni hemijski transportni modeli, hemijski klimatski modeli i modeli kvaliteta životne sredine. Međutim, precizna prognoza zahteva podjednaku zastupljenost obe tehnike, bar u periodu razvoja modela, kada je neopodno modele kalibrisati za realne uslove sredine.

Nepotpuno razumevanje fizičkih procesa koji se odigravaju u atmosferi, posebno onih vezanih za turbulenciju i termodinamičku strukturu, doveli su do pitanja sa kolikom tačnošću modeli kvaliteta vazduha mogu da opišu tokove polutanata, a potom i da prognoziraju sastav, evoluciju atmosfere i klimatskog sistema. Kvalitet simulacija modela kvaliteta vazduha različitih razmera zavisi od opisa procesa relevantnih za razmenu mase, energije i količine kretanja između atmosfere i biosfere. Deo modela koji je odgovoran za proračun razmene mase, energije i količine kretanja je površinska shema (*Soil-Vegetation-Atmosfere-Transfer*), odnosno SVAT shema. Struktura i složenost SVAT sheme određuje kvalitet modeliranja interakcije tla, vegetacije i atmosfere kao i produkcije i ponora pojedinih GSB ili gasova koji značajno utiču na oksidacioni kapacitet atmosfere. Poznato je da prisustvo vegetacije na tlu značajno utiče na transportne procese koji se menjaju u zavisnosti od homogenosti, izotropnosti, morfoloških, aerodinamičkih i toplotnih karakteristika biljnog sklopa. Pored toga vegetacija je značajan izvor i/ili ponor polutanata. Modeliranje uticaja biljnog sklopa na transport, produkciju i depoziciju pasivnih GSB (kao što su ugljen-dioksid (CO_2) i voda (H_2O)) i hemijski aktivnih atmosferskih oksidanata (kao što su azotni oksidi ($[\text{NO}_x] = [\text{NO}] + [\text{NO}_2]^\dagger$) i ozon (O_3)) ključni su za procenu kvantiteta i kvaliteta njihovog uklanjanja iz atmosfere. Iz toga proizilazi da je kvalitet fizičkog opisa biljnog sklopa u direktnoj vezi sa kvalitetom modeliranja navedenih procesa.

SVAT shema koja poseduje sofisticovan fizički model vegetacije i mogućnost da simulira turbulentne transporte pasivnih i reaktivnih jedinjenja predstavlja efikasan alat u pružanju odgovora na pitanja vezana za agroekološke, šumarske, hidrološke i urbanističke probleme kvaliteta vazduha. Proširivanje spektara mogućih korišćenja sheme ograničava složenost opisivanja pojedinih fizičkih i hemijskih fenomena. Međutim, pravi izbor jednostavnih parametrizacija velikog broja procesa povećava praktičnu primenu shema koje se koriste samostalno (uz korišćenje početnih i graničnih

[†] Uglastim zgradama je obeležena koncentracija gasa.

uslova iz numeričkog modela za prognozu vremena) ili u okviru meteorološkog dela modela za kontrolu kvaliteta vazduha, klimatskog modela i modela transporta hemijskih materija.

Primarni cilj ovog istraživanja je unapređivanje modeliranja izvora i ponora CO₂ i NO_x u prirodnoj sredini, pre svega u prisustvu visoke vegetacije. Koraci do postizanja cilja bili su: 1) upotreba sofisticovanijeg (u odnosu na jednoslojni model) dvoslojnog („sandwich“) i višeslojnog modela vegetacije, 2) detaljna parametrizacija hemijskih i fizioloških procesa (produkcija i asimilacija gasova) i 3) unapređena parametrizacija turbulentnog transporta CO₂ i NO_x u prisustvu vegetacije. Navedeni koraci su realizovani spajanjem LAPS i MLC-Chem sheme i razvijanjem modula za proračun razmene CO₂ između ekosistema i atmosfere. LAPS shema je korišćena zbog detaljne parametrizacije fizičkih procesa interakcije atmosfera-biljni sklop koji daju osnovu za realistično modeliranje fluksa CO₂. Za modeliranje reaktivnih jedinjenja korišćena je MLC-Chem shema koja poseduje razvijen hemijski modul sa mogućnošću simulacije šezdeset dve hemijske vrste. Valjanost dobijenih rezultata testirana je poređenjem izmerenih i simuliranih vrednosti sadržaja posmatranih gasova u površinskom sloju atmosfere u prisustvu različitih tipova vegetacije.

Sekundarni cilj istraživanja je odgovor na pitanje sa kojom efikasnošću karakteristični biljni sklopovi uklanjaju različite polutante iz atmosfere. Da bismo došli do odgovora razvijen je novi oblik „skaliranja“ (termin objašnjen na str. 50) procesa fotosinteze, ponora CO₂, sa lista na biljni sklop koji je uvrstio vertikalnu heterogenost biljnog sklopa. Ideja o uticaju vertikalne heterogenosti vegetacije na koncentracije gasova upotrebljena je i pri računanju razmene NO_x, i ostalih reaktivnih jedinjenja obuhvaćenih MLC-Chem shemom, između atmosfere i biljnog sklopa.

Razvoj modeliranja interakcije unutar sistema tlo-vegetacija-atmosfera opisan je u pregledu literature. Detaljno razmatranje fenomenologije turbulentnog transporta pasivnih gasova (CO₂) i atmosferskih oksidanata (NO i NO₂) prikazano je u drugoj glavi. Posebna pažnja je posvećena uticaju prisustva visoke vegetacije na procese produkcije, razmene i uklanjanja polutanata. Modeliranje procesa od značaja za produkciju, transport i hemijsku transformaciju polutanata razmatrano je zasebno za pasivne gasove (CO₂) i reaktivne gasove (NO_x) u glavama tri i četiri, redom. Dve sheme korišćene u kreiranju SVAT MLC-LAPS sheme i razvijeni moduli prikazani su u glavi pet. Uticaj strukture vegetacije na transportne procese i razmenu polutanata između tla i atmosfere uveden je u predloženi postupak skaliranja. Pored novog postupka skaliranja, u glavi pet, predstavljeni su i nedostaci aktuelnih postupaka. Sve navedene pretpostavke i koncepti validirani su u okviru MLC-LAPS sheme poređenjem simuliranih vrednosti sa osmotrenim vrednostima. Analiza svih rezultata prikazana je u glavi šest. Na samom kraju nameće se zaključak da je numerički model koji opisuje životnu sredinu i mehanizme funkcionisanja sredine zapravo sistem koji bez stalnog razvoja i usavršavanja ne može da postigne svoj puni potencijal. Isto kao i bilo koji živi sistem.

1.1 Pregled literature

Zbog značaja koji se pridaje problemu globalne promene klime i mestu koje sadržaj CO₂ i NO_x imaju u analizi problema, veliki napor je uložen u razumevanje sprege fizičkih, hemijskih i bioloških procesa koji utiču na produkciju, transport i njihovo uklanjanje u PGS-u (Hollinger et al., 1994; Fang

et al., 2010; Geddes and Murphy, 2014). Potreba za boljim poznavanjem stanja životne sredine i mehanizama razmene energije i supstance između različitih ekosistema i atmosfere dovela je do uspostavljanja dugoročnih eksperimenata kao što su *Boreal Ecosystem-Atmosphere Study* (BOREAS) (Sellers et al. 1997), *Harvard Forest Environmental Measurement Site* (HF-EMS) (Munger and Wofsy 1999a, 1999b; Munger et al., 1996), *NitroEurope* (Skiba et al., 2009), FLUXNET (Baldocchi et al., 2001), *Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observational Study* (ABRACOS) (Gash and Nobre, 1997). Deo rezultata merenja se odnosi na praćenje promena emisije i uklanjanja polutanata iz atmosfere uz istovremeno merenje meteoroloških elemenata, fizičkih karakteristika zemljišta i fizioloških karakteristika vegetacije. Rezultati bi trebalo da odgovore na pitanja: „Koji faktori sredine utiču na produkciju polutanata?“, „Kako ekosistemi reaguju na promenu klime?“, „Koji faktori sredine su se drastično promenili, a koji su održali prirodnu samoregulaciju?“

Merenja su omogućila razvoj širokog spektra numeričkih modela različitih prostornih i vremenskih rezolucija. Posebno su se izdvojile SVAT sheme koje služe za opisivanje procesa interakcije između zemljišta, biljaka i atmosfere. SVAT sheme su pružile fizičku osnovu za razmatranje povratnih sprega između fizičkih, bioloških i hemijskih procesa koji pokreću razmenu gasova na tlu i u najnižem sloju atmosfere gde se vrši njihova produkcija i uklanjanje. Osnovne primene SVAT shema su *in situ* simulacije mikrometeoroloških procesa i obezbeđivanje donjeg graničnog uslova za modele velikih razmera. Uključivanjem ciklusa GSB i ostalih pasivnih i reaktivnih gasova u SVAT sheme obezbeđuju se informacije o fluksevima gasova na donjoj granici modela.

„Ozelenjavanje“ SVAT shema razvija se u poslednje tri decenije, a započeto je objavljivanjem prvih modela za parametrizaciju intenziteta fotosinteze i fotorespiracije. Model koji je odgovoran za revoluciju u razvoju „zelenih“ SVAT shema je FvCB model, nazvan prema autorima Farkvaru, fon Semereru i Beriu (Farquhar, von Caemmerer and Berry, 1980). Prema autorima FvCB model ne uključuje sve mehanizme koji utiču na intenzitet fotosinteze, ali obuhvata procese na nivou hloroplasta odgovorne za potrošnju CO₂ (Farquhar, von Caemmerer and Berry, 2001). Proračun usvajanja CO₂ na listu omogućava kvantifikovanje neto razmene između atmosfere i biljnog sklopa (*net ecosystem exchange*, NEE). Ipak, problem tačnog prenosa informacije sa lista na ceo biljni sklop i ekosistem još uvek nije rešen sa zadovoljavajućom tačnošću. Prve SVAT sheme koje su uključile ciklus CO₂ unutar biosfere razvijene su na osnovu već dobro testiranih površinskih shema (SiB2 - Sellers et al., 1996, PLATIN - Grünhage et al., 1997). Parametrizacija procesa fotosinteze povezala je intenzitete izvora i ponora CO₂ i H₂O unutar, ispod i iznad vegetacije, što je pomerilo granice SVAT modeliranja. Već tada se otvorila mogućnost razmatranja uticaja različitih atmosferskih konstituenata, kao što su CO₂, NO_x i O₃ na rast i razvoj biljaka, koje svojim prisustvom direktno utiču na raspodelu energije na površini. Iako su mehanizmi interakcije između različitih gasova u atmosferi, i njihova uloga u razvoju vegetacionog pokrivača i klime poznati, parametrizacija svih procesa od značaja teško je izvodljiva (Dang et al., 1998, Dubois et al., 2007; Lenz et al., 2010).

Sledeći korak u SVAT modeliranju napravljen je uvođenjem modula za proračun razmene gasova koji učestvuju u brzim hemijskim transformacijama gasne faze, kao što su dimetil-sulfid, C₂H₆S, NO, NO₂, O₃ i isparljiva organska jedinjenja (*volatile organic compounds*, VOC). Razmatranje životnog veka reaktivnih jedinjenja zahtevalo je parametrizaciju hemijskih procesa. Jednu od prvih hemijskih SVAT shema razvio je Kram sa saradnicima (Kramm et al., 1996). Osnovna karakteristika

prvih shema bila je modeliranje vegetacije aproksimacijom velikog lista. Aproksimacija se pokazala kao dovoljno tačna samo u uslovima visokih koncentracija gasova iznad zemljišta pokrivenog niskom vegetacijom. Prvi gasovi koji su uvršteni u SVAT sheme su NO_x i O_3 , odnosno osnovni fotohemijski ciklus produkcije i destrukcije ozona. Razlike u izmerenim i modeliranim vrednostima flukseva brzoreagujućih gasova iznad visoke vegetacije pokazana je u mnogim studijama (Jacob and Wofsy, 1990, Gao et al., 1993; Duyzer et al., 1995; Joss and Graber, 1996; Walton et al., 1997), a kao razlog navodi se nedovoljno sofisticiran model biljnog sklopa i nedovoljno kompleksna hemijska shema (Ganzeveld et al., 2002a). Smanjena tačnost simulacija flukseva reaktivnih gasova, čije hemijske transformacije se odigravaju u vremenskom koraku karakterističnom za turbulentne transporte, podstakla je razvoj jednoslojnih „sendvič“ modela i višeslojnih modela vegetacije (Ganzeveld et al., 2002a). Danas postoji ograničeni broj shema koje su testirane u uslovima visoke vegetacije (Wolfe and Thornton, 2011), a koje se mogu koristiti samostalno ili kao deo većeg numeričkog modela (Ganzeveld et al., 2002a).

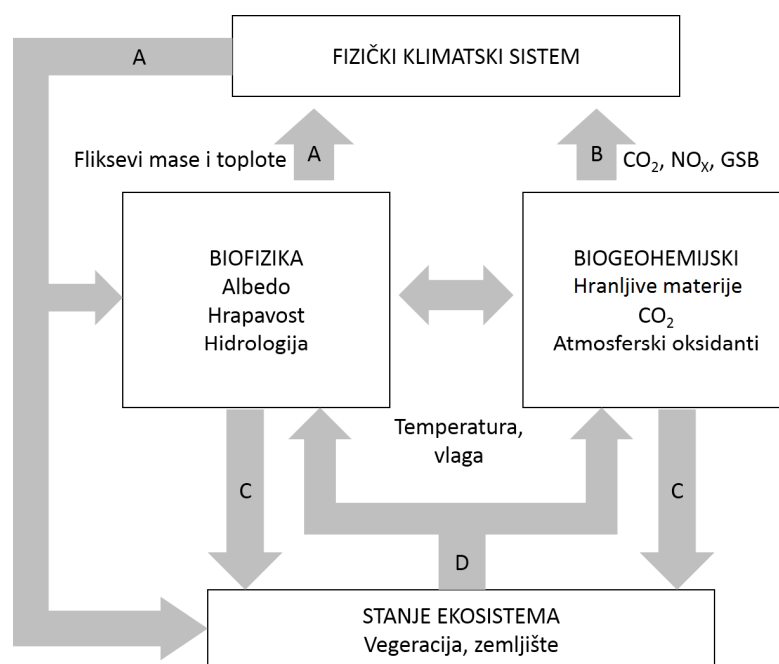
Iako je veza između koncentracije azota u biljkama i intenziteta fotosinteze, odnosno veza između globalnog ciklusa azota i ugljanika dobro poznata, u modelarskom pogledu veza se najčešće opisuje jednim konstantnim parametrom ili se ne uzima u obzir. Greške koje su globalni modeli pravili u pogledu prognoze budućeg stanja klime jednim delom su posledica upravo nepostojanja povratne sprege između koncentracije azota, dostupne biljci, i apsorpcije CO_2 iz atmosfere. Novija istraživanja u tom pravcu pokazala su značaj povezivanja fizičkih i biohemijskih procesa u ekosistemima i njihov uticaj na evoluciju klime (Sokolov et al., 2008; Thornton et al., 2009).

Prvi zaključci vezani za klimatske promene, izvedeni iz kratkoročnih merenja i simulacija, predstavili su povećanu koncentraciju CO_2 kao „atmosfersko đubrenje“ koje će pogodovati razvoju globalnog biljnog pokrivača i povećati intenzitet asimilacije antropogenog CO_2 . Međutim, dugoročna merenja pokazala su upravo obrnut efekat (Norby et al., 2010). Pored toga, prema Vitouseku i sar. (Vitousek et al., 2013) uticaj promenjenih klimatskih uslova na globalni ciklus azota je mnogo veći nego što se do sada pretpostavljalo. Naučna zajednica je trenutno saglasna da eksplicitan tretman globalnih ciklusa CO_2 , hranljivih materija, pasivnih i reaktivnih azotnih jedinjenja mora da postane deo klimatskih i mikrometeoroloških modela (Friedlingstein et al., 2006, Thornton et al., 2009, Melillo et al., 2011) da bi se sagledavanje uticaja i posledica klimatskih promena približilo razmatranju stvarnog odziva prirode.

2. RAZMENA GASOVA IZMEĐU BIOSFERE I POVRŠINSKOG SLOJA ATMOSFERE

2.1 Uvod

Pojam interakcije biosfere i atmosfere odnosi se na razmenu toplote, vlage, gasova (čak i onih u tragovima), aerosola i količine kretanja između tla i vazduha koji ga prekriva. Rezultat interakcije je karakterističan klimatski sistem koji oslikava dinamiku spregnutih procesa i njihovu evoluciju (slika 2.1).



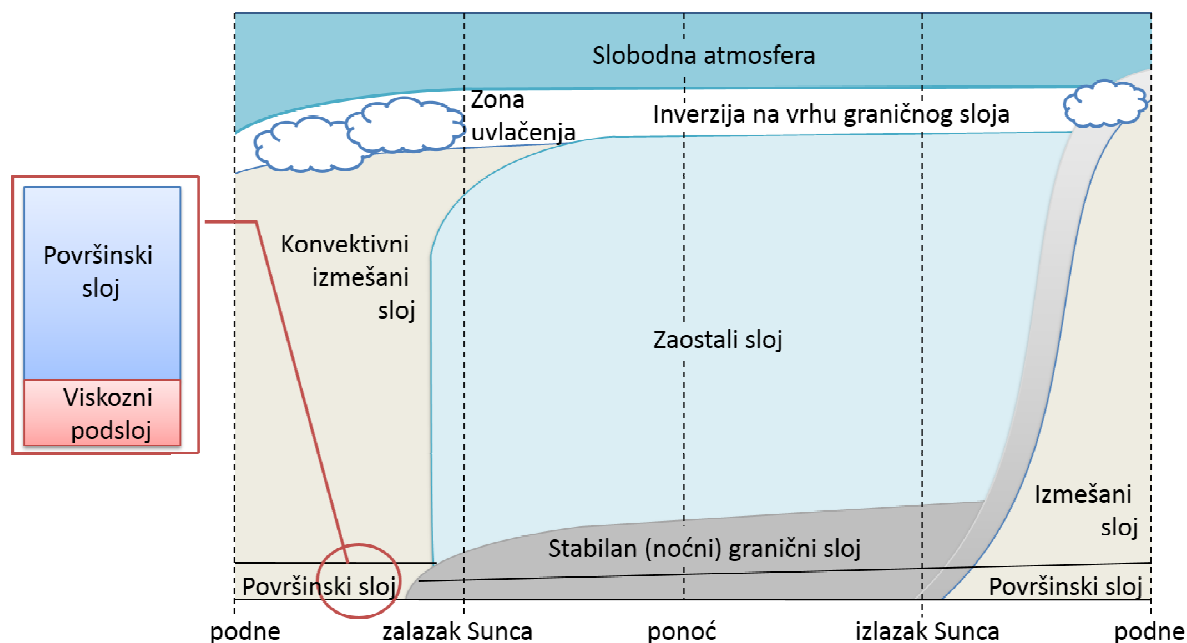
Slika 2.1 Interakcija između kopnenih ekosistema i atmosfere sa aspekta klimatskih promena. Tok A: uticaj promena u fizičkom sistemu na klimatski sistem i biofizičke procese, tok B: promene u ciklusima hranljivih materija, atmosferskih oksidanata i GSB kao i njihovo oslobađanje iz zemljišta u atmosferu, tok C: uticaj promena u biogeochemijskim procesima na dostupnost vode i hranljivih materija, tok D: promene u živom sistemu (biljke, životinje) koje utiču na biogeochemijske procese (Sellers et al., 1997b).

Utjecaj kopnenih ekosistema na klimatski sistem odvija se u vremenskim razmerama od sekunde do nekoliko miliona godina. Ekosistem utiče na vreme i klimu preko razmene energije, mase i količine kretanja između tla i atmosfere (Sellers et al., 1986; Pielke et al., 1998), a promene u procesima razmene ogledaju se u promeni globalne cirkulacije atmosfere (Stull, 1988, Garstang and Fitzerald, 1999). Obrnuto, funkcionisanje i struktura kopnenih ekosistema rezultat su uticaja klimatski uslovljenih oscilacija u temperaturi i vlažnosti vazduha kroz dekade i vekove (Woodward et al., 1991). U periodu od više hiljada godina pojava glacijalnih perioda izazvala je promene u energetsom bilansu planete i dovela do promene geografske distribucije kopnenih ekosistema, površinskog albeda, biogeohemijskih kruženja elemenata i na kraju klime (Foley, 1994). U razdoblju od više miliona godina uočava se zajednički razvoj kopnenog ekosistema i klime kao jedinstvenog dinamičkog sistema, čiji proizvod je današnji sastav atmosfere i globalna atmosferska cirkulacija (Kasting, 1993).

Interakcija tla i atmosfere uočava se na dnevnom nivou i ogleda se u promeni sastava i raspodele različitih atmosferskih slojeva. Za živi svet na Zemlji najznačajniji je najniži sloj atmosfere - troposfera u kojoj se odigravaju svi atmosferski procesi značajni za vreme. Troposfera predstavlja rezervoar polutanata emitovanih sa tla, transportovanih iz viših slojeva ili produkovanih u hemijskim reakcijama. Visina najnižeg sloja troposfere, *planetarnog graničnog sloja*, zavisi u prvom redu od razmene energije sa površinom Zemlje. Gornja granica PGS-a definiše se kao visina na kojoj atmosfera ne „oseća“ prisustvo podloge. Planetarni granični sloj u toku dana dostiže debljinu od oko 1 km, dok je u toku noći plitak sa debljinom od oko 100 m. Dnevni ciklus PGS-a rezultat je raspodele energije apsorbovanog kratkotalsnog sunčevog zračenja na flukseve osetne i latentne toplote, kao i toplote provedene u dublje slojeve zemljišta. Dublji PGS se razvija ukoliko je na površini energija raspodeljena u korist fluksa osetne toplote.

Kretanje vazduha u PGS-u je haotično, odnosno turbulentno. Osnovni problem u opisu turbulentnog kretanja vazduha je formulisanje jednačina kretanja. Reynolds (*Osborne Reynolds*) je prvi predstavio turbulentni tok kao složen fenomen. On je predložio da se svaki turbulentni tok posmatra kao zbir brzine srednje struje fluida i haotičnog dela toka uz pretpostavku da su vremenski i prostorni razmer srednjeg toka znatno veći od razmera haotičnog toka. Posledica razdvajanja toka na srednji i turbulentni deo toka, u jednačini kretanja, dovodi do pojave novih članova. Oni se nazivaju Reynoldsovi naponi. U fizičkom smislu, Reynoldsovi naponi predstavljaju priliv ili odliv količine kretanja u neku uočenu zapreminu zbog postojanja odstupanja u polju brzine. Uvođenjem Reynoldsovih članova stvara se sistem u kom je broj nepoznatih veličina veći od broja jednačina. Problem zatvaranja ovog sistema jednačina se rašava na različite načine i još uvek je otvoren.

Unutar PGS-a mogu se definisati različiti slojevi vazduha, za koje su karakteristični različiti transportni režimi (tabela 2.1). Ukoliko se krećemo od tla prema gornjoj granici PGS-a prvi sloj koji se uočava je *viskozni podstoj* (VP), debljine samo nekoliko milimetara, u kome je osnovni režim transporta molekularna difuzija (slika 2.2). Na tako malim razmerama kretanje fluida je jako ograničeno i ne postoje uslovi za razvijanje turbulentnih vrtloga. Sloj iznad molekularnog graničnog sloja naziva se *površinski sloj* (PS). U najnižim delovima površinskog sloja mogućnost termičke konvekcije je još uvek ograničena zbog blizine tla. Dominantan proces transporta u PS je mikroturbulencija nastala mehaničkom produkcijom vrtloga malih dimenzija prilikom strujanja preko



Slika 2.2 Shematski prikaz PGS-a u polju visokog pritiska, iznad kopna.

hrapave površine. U ovom delu PS-a razvija se logaritamski profil vetra, a vertikalni turbulentni fluksevi toplote, mase i količine kretanja su konstantni. Visina površinskog sloja uslovljena je intenzitetom razmene flukseva sa tlom. Deo prostora od gornje granice površinskog sloja do gornje granice PGS-a okarakterisan je kao *slobodna atmosfera* (SA). Ipak, ukupna visina PGS-a se menja u odnosu na stanje na površini i intenzitet površinskih flukseva, što ukazuje na povratnu spregu između PS i SA. Opisana stratifikacija PGS-a karakteristična je za atmosferu koja se nalazi iznad golog zemljišta. U slučaju da je zemljište prekriveno vegetacijom kretanje vazduha unutar i odmah iznad sloja hrapavosti postaje potpuno zavisno od njenih morfoloških, aerodinamičkih i fizioloških karakteristika.

Tabela 2.1 Struktura PGS-a i procesi koji utiču na razmenu materije.

Visina	Naziv	Proces razmene		Stabilnost
< 1000 m	Ekman sloj	Turbulentni	Promenljiv fluks	Utiče
< 100 m	Površinski sloj	Turbulentni	Konstantan fluks	Utiče
< 2.5 × visina vegetacije	Prelazni sloj	Turbulentni	Promenljiv fluks	Utiče
0,01 m	Viskozni podsloj	Melekularna difuzija	Konstantan fluks	Ne utiče
Literatura	Stull (1988)			

Najizraženiji uticaj biljnog sklopa na transportne procese sreće se u šumama. Visina i struktura šumskog sklopa indukuje razvijanje posebnih transportnih karakteristika vazduha koji se kreće kroz biljni sklop. Sloj visoke vegetacije predstavlja jedinstvenu tampon zonu koja smanjuje

intenzitet dolaznog sunčevog zračenja i brzinu vetra, što se ogleda u smanjivanju turbulentnog transporta i čestom formiranju stabilne stratifikacije unutar gustih sklopova, koja se održava tokom dužeg dela dana. Međutim, smicanje vetra na listovima, stabljikama i granama može da uzrokuje dodatno turbulentno kretanje i formiranje intenzivne turbulentne kaskade u kojoj se prostorne razmere vrtloga intenzivno smanjuju usled nailaska na veći broj prepreka. Kompleksan sistem kretanja vazduha kroz vegetaciju objašnjava se po analogiji sa procesom molekularne difuzije, ali sa tom razlikom da deli koji difunduju nisu molekuli nego mikroturbulentni vrtlozi.

Ugljen-dioksid, vodena para i druge pasivne skalarnе veličine transportuju se između biljnog sklopa i atmosfere turbulentnim vrtlozima. Intenzivna konvekcija i „dimne“ perjanice transportuju veliki procenat ukupne mase. Iako je turbulentni transport veoma efikasan u prenosu mase, unutar vegetacije povezan je sa difuzionim procesom na površini lista i tla. Difuzija gasova između biljke i okoline u prvom redu zavisi od potreba biljke i statusa posmatranih gasova u njenoj okolini. Turbulentni transport CO₂ izdvaja se od transporta ostalih polutanata zbog sposobnosti vegetacije da ga uklanja i koristi u procesu fotosinteze. Ukoliko je proces asimilacije CO₂ intenzivan, intenziviraće se proces produkcije kiseonika (O₂), a isto tako kroz otvorene stome (otvori na listovima preko kojih se odigrava razmena gasova) prolaziće i ostali gasovi čije se koncentracije unutar i izvan lista razlikuju. Drugi gasovi, kao što je NO, oslobađaju se iz zemljišta kao produkti mikrobiološke aktivnosti, bivaju deponovani iz gornjih slojeva atmosfere (NO₂) ili generisani u hemijskim reakcijama (O₃). Ipak, merenja su pokazala da samo mali deo ukupne količine produkovanih NO_x izađe iz sloja visoke vegetacije i dospe u SA (Jacob and Wofsy, 1990). Azotni oksidi su toksični za biljke, usporavaju apsorpciju CO₂ i formiraju ozon koji degradira biljno tkivo. Ukoliko se NO_x ne transportuju u više slojeve atmosfere njihova koncentracija u donjim slojevima se povećava i raste verovatnoća pojave novih hemijskih reakcija ili depozicije na delovima biljaka i na tlu.

Svaki model, čiji je zadatak simulacija koncentracija GSB i ostalih gasova koji se u atmosferi nalaze u tragovima, počiva na zakonu održanja mase (Baldocchi and Wilson, 2002). Masa nekog gasa u površinskom sloju menja se usled turbulentnog transporta, depozicije, biološke i hemijske produkcije odnosno destrukcije. Promena mase neke hemijske vrste u PS može se predstaviti preko parcijalne diferencijalne jednačine u obliku

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{PS} = f_{veg} \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{veg} + f_{ws} \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{ws} + f_{soil} \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{soil} + f_{snow/ice} \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{snow/ice}, \quad (2.1)$$

gde su sa $\partial C/\partial t$ obeležene promene koncentracije na podlozi prekrivenoj ($f_{veg/ws/soil/snow/ice}$) vegetacijom (veg), vlažnom frakcijom (ws), golim zemljištem ($soil$) i snegom i/ili ledom ($snow/ice$). Promena koncentracije iznad golog zemljišta, snežnih i ledom pokrivenih predela odigrava se usled turbulentnog transporta ($\partial C/\partial t_{turb}$), bioloških i antropogenih emisija ($\partial C/\partial t_{emis}$), suve depozicije ($\partial C/\partial t_{dep}$) i hemijskih transformacija ($\partial C/\partial t_{chem}$)

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{soil/snow/ice} = \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{turb} + \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{emis} + \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{dep} + \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{chem}, \quad (2.2)$$

dok se iznad vegetacije i vlažne frakcije promena uglavnom svodi na doprinos turbulentnog transporta i hemijskih procesa

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{veg/ws} = \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{turb} + \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{chem}. \quad (2.3)$$

Uobičajno je da se promena koncentracije unutar biljnog sklopa (*BS*) posmatra zasebno zbog karakterističnih transportnih procesa i dodatnih izvora i ponora gasova i čestica. Transport gasova i čestica najizraženiji je u vertikalnom pravcu, pa se advekcija najčešće zanemaruje. Zbog blizine podloge na koncentraciju će najviše da utiče emisija iz zemljišta, depozicija, mehanička mikroturbulencija i hemijska konverzija, kao i njihova promena po visini biljnog sklopa (Δz)

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{BS} = \frac{\Delta F_{turb} + \Delta F_{emis} - \Delta F_{dep}}{\Delta z} + P_{chem}. \quad (2.4)$$

U jednačini 2.4 sve promene, osim hemijske, limitirane su brzinom procesa difuzije unutar laminarnog podsloja koji se nalazi na površini biljaka i tla. Uočavamo da je jednačina 2.4 napisana u diskretnom obliku iz kojeg se numerički dobija prognoza promene koncentracija određenih polutanata (Ganzeveld et al., 2002a).

U ovoj glavi će ukratko biti prikazane: a) osnovne jednačine koje opisuju transport vazduha iznad golog zemljišta i vegetacije; b) uloga zemljišta i vegetacije u produkciji i uklanjanju ugljenikovih i azotnih oksida; c) najznačajnije hemijske reakcije i transportni procesi koji dovode do promene koncentracije CO₂ i NO_x u PS.

2.2 Turbulentni transport gasova iznad golog zemljišta i biljnog sklopa

2.2.1 Kretanje vazduha iznad golog zemljišta i biljnog sklopa

Kretanje vazduha iznad golog zemljišta. Da bismo saznali koliko prisustvo šume utiče na strukturu kretanja potrebno je prvo dati objašnjenje za kretanje vazduha iznad golog zemljišta. Glavna karakteristika profila vetra iznad hrapave površine tla je izrazito smanjenje brzine sa smanjenjem visine. Uzrok predstavlja trenje koje se javlja između slojeva vazduha i pri dodiru sa tlom. Pojava trenja dovodi do smicanja vazdušne struje koje se za jediničnu zapreminu vazduha izražava preko napona smicanja τ

$$\tau = \rho u_*^2, \quad (2.5)$$

gde je u_* - brzina trenja koja označava hrapavost površine i njen uticaj na produkciju i transport turbulentnih vrtloga, a ρ - gustina vazduha (Sellers et al., 1986). Glavni uzročnici turbulentnog kretanja u niskom sloju atmosfere su sila trenja i sila potiska. Ako kretanje vazduha posmatramo kao

stacionarni tok homogenog fluida iznad ravne površine, promenu brzine fluida sa visinom možemo izraziti preko zakona zida, prema kom je gradijent brzine obrnuto srazmeran rastojanju od zida

$$\frac{u(z)}{u_*} = f\left(\frac{z}{z_0}\right). \quad (2.6)$$

U izrazu 2.6 sa z_0 je obeležena visina hrapavosti, a sa f nepoznata funkcija. Brojni eksperimenti pokazali su da je funkcija, koja najbolje opisuje strujanje fluida iznad ravne površine, logaritamska, te jednačina 2.6 može da se napiše u obliku

$$\frac{u(z)}{u_*} = 5,6 \log\left(\frac{z}{z_0}\right) + 4,9, \quad (2.7)$$

odnosno ukoliko umesto dekadnog upotrebimo prirodni logaritam

$$\frac{u(z)}{u_*} = 2,4304 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 4,9. \quad (2.8)$$

Konstanta ispred logaritamske funkcije u jednačini 2.8 se označava kao recipročna vrednost fon Karmanove (*von Karman*) konstante k . Vrednosti k , prema različitim izvorima u literaturi, navedene su u tabeli 2.2.

U stvarnim uslovima heterogenost podloge, kao i smena dana i noći, dovodi do stratifikovanja atmosfere, odnosno raslojavanja. Javljaju se slojevi različite temperature, vlažnosti i gustine koje prate odgovarajući fluksevi količine kretanja, toplote, vlage i koncentracije. U meteorologiji se izdvajaju dva osnovna stanja atmosfere: 1) stabilno stanje, kada se hladan vazduh nalazi ispod toplog vazduha bliže podlozi i 2) nestabilno, u obrnutoj situaciji. Pri stabilnoj stratifikaciji, koja se obično sreće u toku noći, vertikalna kretanja se prigušuju, pa dominira kretanje u horizontalnom pravcu. Za razliku od stabilne stratifikacije nestabilnu karakterišu brze vertikalne struje i veliki fluksevi površinskih skalara. Karakteristično stanje atmosfere najčešće se određuje preko Ričardsonovog (*Richardson*) broja (Ri) koji, na osnovu izmerenih vrednosti temperature i brzine vetra na donjoj i gornjoj granici, pokazuje da li je posmatrani sloj atmosfere stabilan, neutralan ili nestabilan. Ričardsonov broj se izračunava relacijom

$$Ri = \frac{g}{\theta_0} \frac{(\theta_2 - \theta_1)(z_2 - z_1)}{(u_2 - u_1)^2}, \quad (2.9)$$

gde je θ_0 - referentna temperatura, g - ubrzanje sile Zemljine teže, θ_2 - osmotrena temperatura na gornjoj i θ_1 - na donjoj granici sloja, osmotrena brzina vetra na gornjoj u_2 i u_1 na donjoj granici sloja. S obzirom na vrednost Ri kriterijumi stabilnosti su

$$Ri = \begin{cases} < 0 - nestabilna \\ = 0 - neutralna \\ > 0 - stabilna \end{cases}. \quad (2.10)$$

Prethodno spomenuti logaritamski profil vetra važi samo u neutralnoj stratifikaciji koji se u prirodi retko javlja, i nije ga moguće primeniti kod stratifikovanih fluida. Iz tog razloga Monin (*Monin*) i Obuhov (*Obukhov*) su predložili da se gradijent brzine homogenog fluida pomnoži sa univerzalnom funkcijom odnosa dužine (z) i karakterističnog dužinskog razmera (L), $\Phi(z/L)$ kojeg određuju parametri karakteristični za procese prisutne kod stratifikovanog fluida (*Monin and Obukhov, 1954*). Karakteristični razmer nazvan je prema autorima - Monin-Obuhovljeva dužina, i definisan je kao

$$L = \frac{u_*^3}{k\beta w\theta_0} \quad (2.11)$$

gde je sa β predstavljen parametar sile potiska ($\beta=g/\theta_0$), a sa $\overline{w\theta_0}$ vertikalni turbulentni fluks toplote. Monin-Obuhovljeva teorija je ostala do danas široko korišćeni način predstavljanja turbulentnih flukseva u stratifikovanoj atmosferi, te će zato biti detaljnije opisana u tekstu koji sledi. Prema Monin-Obuhovljevoj teoriji, gradijent konzervativne veličine $A(z)$ unutar površinskog sloja možemo predstaviti relacijom

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \pm \frac{P_{ra}}{k} \frac{A_*}{z} \Phi\left(\frac{z}{L}\right) \quad (2.12)$$

gde je A_* - karakterističan razmer veličine $A(z)$ koji se u opštem slučaju definiše kao odnos vertikalnog turbulentnog fluksa $\overline{wA_0}$ te veličine i brzine trenja u_* , P_{ra} - Prandtlov (*Prandtl*) turbulentni broj, koji se prenosi u izraz za univerzalnu funkciju i iz tog razloga se ne ponavlja u izvođenju koje sledi. Vrednost P_{ra} u slučaju fluksa količine kretanja iznosi 1, dok je za flukseve toplote, vodene pare, različitih gasova i čestica, prema različitim autorima, naveden u tabeli 2.3. U daljem izvođenju P_{ra} se prebacuje u oblik univerzalne funkcije i ne pojavljuje se u izvođenju, kao što je predložio Hongstrom (*Högström, 1988*). U jednačini 2.12 predznak opisuje izvor veličine. Ukoliko je izvor na tlu predznak je negativan, a ukoliko je izvor iznad površinskog sloja predznak je pozitivan. Saglasno sa jednačinom 2.12 gradijenti brzine (u), potencijalne temperature (θ), specifične vlažnosti vazduha (q) i koncentracije pasivne supstance (C) u Dekartovom pravouglom koordinatnom x, y, z sistemu (kao što je npr. CO_2 koji se oslobađa sa golog zemljišta) mogu se napisati u sledećem obliku

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{M_{xt}}{kz} \Phi_m\left(\frac{z}{L}\right), \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = -\frac{\theta_*}{kz} \Phi_h\left(\frac{z}{L}\right), \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = -\frac{q_*}{kz} \Phi_q\left(\frac{z}{L}\right), \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\frac{C_*}{kz} \Phi_c\left(\frac{z}{L}\right). \quad (2.16)$$

U jednačinama 2.13–2.16 $M_{xr} = \overline{wu}_0/u_*$, $\theta_* = \overline{w\theta}_0/u_*$, $q_* = \overline{wq}_0/u_*$ i $C_* = \overline{wC}_0/u_*$ predstavljaju karakteristične razmere za x komponentu količine kretanja, toplote, vlage i pasivne supstance u z pravcu, redom, izraženih preko turbulentnih flukseva u z pravcu: fluksa količine kretanja (\overline{wu}_0), toplote ($\overline{w\theta}_0$), vlage (\overline{wq}_0), pasivne supstance (\overline{wC}_0) i brzine trenja.

Izraz za gradijent brzine vetra, uz parametrizaciju turbulentnog fluksa količine kretanja preko brzine trenja ($\overline{wu} = u_*^2$) može se zapisati u obliku

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \Phi_m \left(\frac{z}{L} \right). \quad (2.17)$$

Integracijom jednačina 2.13–2.16 od visine trenja z_0 do visine z dobijamo da je

$$\frac{k}{u_*} [u(z) - u(z_0)] = \int_{z_0}^z \Phi_m \left(\frac{z}{L} \right) \frac{dz}{z}, \quad (2.18)$$

$$\frac{k}{\theta_*} [\theta(z) - \theta(z_0)] = - \int_{z_0}^z \Phi_h \left(\frac{z}{L} \right) \frac{dz}{z}, \quad (2.19)$$

$$\frac{k}{q_*} [q(z) - q(z_0)] = - \int_{z_0}^z \Phi_h \left(\frac{z}{L} \right) \frac{dz}{z}, \quad (2.20)$$

$$\frac{k}{C_*} [C(z) - C(z_0)] = - \int_{z_0}^z \Phi_h \left(\frac{z}{L} \right) \frac{dz}{z}. \quad (2.21)$$

Integral sa desne strane u jednačinama 2.18–2.21 može se transformisati na sledeći način

$$\int_{z_0}^z \Phi_m \left(\frac{z}{L} \right) \frac{dz}{z} = \int_{z_0}^z \left(1 - 1 + \Phi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right) \frac{dz}{z} = \int_{z_0}^z \frac{dz}{z} - \int_{z_0}^z \left(1 - \Phi_m(\zeta) \right) \frac{d\zeta}{\zeta} = \ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m(\zeta), \quad (2.22)$$

gde je bezdimenzioni dužinski razmer označen sa $\zeta = z/L$. Smenom jednačine 2.22 u jednačine 2.18–2.21 dobijamo vertikalne profile x komponente vetra, temperature, vlage i koncentracije čestica ili gasa u obliku

$$u(z) = u(z_0) + \frac{u_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m(\zeta) \right], \quad (2.23)$$

$$\theta(z) = \theta(z_0) - \frac{\theta_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_h(\zeta) \right], \quad (2.24)$$

$$q(z) = q(z_0) - \frac{q_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_q(\zeta) \right], \quad (2.25)$$

$$C(z) = C(z_0) - \frac{C_*}{k} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_C(\zeta) \right]. \quad (2.26)$$

Za izračunavanje vertikalnih profila neophodno je poznavanje oblika funkcija $\Psi_{m,h,q,c}(\zeta)$, uz pretpostavku da će funkcije da imaju različite oblike u stabilno i u nestabilno stratifikovanoj atmosferi. Široko korišćeni oblik funkcija baziran je na merenjima obavljenim u poznatom eksperimentu Kansas izvedenom 1968. godine objavljenim od strane Basingera sa sar. (Businger et al., 1971). Merenja su pokazala različitu funkcionalnu zavisnost između z i L za fluks količine kretanja ($P_{ra} = 1$) i toplote ($P_{ra} = 0,74$) redom

$$\begin{aligned} \Psi_m(\zeta) &= P_{ra} (1 - 15\zeta)^{-\frac{1}{4}} & za & -2 < \zeta < 0 & nestabilno \\ \Psi_m(\zeta) &= P_{ra} (1 + 4,7\zeta) & za & 0 < \zeta < 1 & stabilno \\ \Psi_h(\zeta) &= P_{ra} (1 - 9\zeta)^{-\frac{1}{2}} & za & -2 < \zeta < 0 & nestabilno \\ \Psi_h(\zeta) &= P_{ra} + 4,7\zeta & za & 0 < \zeta < 1 & stabilno \end{aligned} \quad (2.27)$$

Kritike na postavku eksperimenta i nerealnu vrednost fon Karmanove (von Kármán) konstante rezultovale su promenom jednačina koje je objavio Hogstrom (Högström, 1988). Koeficijenti funkcije dobijeni su za vrednost fon Karmanove konstante od 0,41 i za vrednost $P_{ra} = 1$ za fluks količine kretanja i $P_{ra} = 0,95$ za fluks toplote

$$\begin{aligned} \Psi_m(\zeta) &= P_{ra} (1 - 19,3\zeta)^{-\frac{1}{4}} & za & -2 < \zeta < 0 & nestabilno \\ \Psi_m(\zeta) &= P_{ra} (1 + 6\zeta) & za & 0 < \zeta < 1 & stabilno \\ \Psi_h(\zeta) &= P_{ra} (1 - 11,6\zeta)^{-\frac{1}{2}} & za & -2 < \zeta < 0 & nestabilno \\ \Psi_h(\zeta) &= P_{ra} + 7,8\zeta & za & 0 < \zeta < 1 & stabilno \end{aligned} \quad (2.28)$$

Tabela 2.2 Vrednosti fon Karmanove konstante prema različitim autorima.

k	Literatura
0,43	Monin and Obukhov (1954)
0,35	Businger et al. (1971)
0,42	Pruitt et al. (1973)
0,35	Högström (1974)
0,4	Yaglom (1977)
0,39	Kondo and Sato (1982)
0,4 ± 0,01	Högström (1985)
0,387 ± 0,004	Andreas et al. (2004)

Funkcija stabilnosti za transport pasivne supstance kao i reaktivnih supstanci, čije vreme reakcije se ne razlikuje mnogo od vremena turbulentnog transporta, uzima se da je isto kao i za transport toplote, $\Psi_h(\zeta) = \Psi_c(\zeta)$ (Stull, 1988).

Tabela 2.3 Vrednosti Prandtlovog turbulentnog broja za fluks toplote, vodene pare i ostalih pasivnih gasova prema različitim autorima.

P_w	Literatura
0,74	Businger et al. (1971)
0,87–0,72	Kader and Yaglom (1972)
0,8	Foken (2006)
0,95	Högström (1988)
0,92 ± 0,04	Högström (1996)

Kretanje vazduha iznad vegetacije. Prisustvo biljnog pokrivača na tlu povećava razmenu latentne toplote između tla i atmosfere i značajno utiče na sve komponente vodnog i energetskog bilansa na površini Zemlje. Takođe, povećava hrapavost površine, pa samim tim i silu trenja koja se odupire toku vazduha. Visina hrapavosti se u tom slučaju premešta sa površine zemljišta na vrh vegetacije koja bi trebala da postane granična površina da se radi o homogenom čvrstom materijalu. Međutim, šumska vegetacija daje nejasan prelaz između vazduha u kom nema biljne mase i vazduha koji je značajno ispunjen vegetacijom, pa se često navodi da vazduh do neke visine d unutar biljnog sklopa postepeno postaje okupiran vegetacijom. Visina d naziva se ravan nultog pomeranja, a predstavlja granicu na kojoj se može reći da su procesi razmene između biljnog sklopa i atmosfere najintenzivniji. Ispod visine d transportni procesi postaju karakteristični samo za kretanje vazduha unutar biljnog sklopa. Granica određena sa d daje mogućnost prikaza vertikalne koordinate z ne kao $z-h$, čime bi visina vrha vegetacije bila okarakterisana kao granična površina, nego kao $z-d$. Visina ravni nultog pomeranja određena je za različite biljne sklopove, a najčešće se uzima vrednost od $0,8h$, gde je sa h označena visina biljnog sklopa.

Profil brzine vetra, koji uključuje navedena saznanja o transportu količine kretanja iznad vegetacije često je prikazan u obliku

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right), \quad (2.29)$$

dok se za stratifikovani fluid može primeniti Monin-Obuhovljeva teorija te jednačina 2.29 dobija oblik

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \Psi_m(\zeta) \right]. \quad (2.30)$$

Analogija u predstavljanju profila vetra iznad golog zemljišta (jednačina 2.23) i iznad visoke vegetacije jasno je uočljiva, a razlika u vertikalnoj koordinati javlja se i u bezdimenzionom razmeru $\zeta = (z-d)/L$.

2.2.2 Zatvaranje jednačina kretanja iznad vegetacije

Turbulentni tok fluida je kompleksan, nelinearan fenomen. Rešavanje jednačina koje opisuju turbulentno kretanje problematično je iz razloga što broj jednačina ne odgovara broju nepoznatih veličina čime sistem jednačina ostaje otvoren (jednačine 2.13–2.16). Kako zatvoriti sistem jednačina koji opisuje turbulentno kretanje i danas predstavlja otvoren problem na kome se intenzivno radilo (Launder et al., 1975; Speziale, 1991). Osnovni razlog dosadašnjeg relativnog neuspeha leži u nedovoljnom poznavanju nastanka i prave prirode turbulentnog kretanja. Među prvim razvijenim teorijama su zatvaranja prvog reda, i to: **hipoteza koeficijenata razmene** i **Prandtlova teorija puta mešanja**. Pokušaji da se dobije viši stepen tačnosti rezultovali su razvojem zatvaranja drugog i trećeg reda. Posle velikog broja pokušaja Zeng i Takahaši (Zeng and Takahashi, 2000) su zaključili da tačnost rezultata dobijenih višim redovima zatvaranja ne opravdava kompleksnost njihovog izvođenja. U daljem delu teksta biće prikazana hipoteza koeficijenata razmene, detaljni opisi ostalih teorija zatvaranja mogu se naći u Rajković i Mesinger, 2002.

Hipoteza koeficijenata razmene. Određivanje turbulentnih flukseva preko koeficijenata razmene dalo je zadovoljavajuće rezultate u mnogim simulacijama, a jednostavnost primene učinila ga je prvim izborom u rešavanju problema zatvaranja jednačina kretanja. Hipoteza se bazira na pretpostavci da se turbulentni fluks neke veličine može predstaviti preko proizvoda gradijenta te veličine u osnovnoj struji i odgovarajućeg koeficijenta razmene. Ideja za postavljanje hipoteze proistekla je iz sličnosti između procesa molekularne difuzije i turbulentnog transporta ukoliko se uzme da umesto molekula difunduju turbulentni vrtlozi. Razlika je napravljena samo u koeficijentima difuzije koji se obeležavaju sa K , pa se po tome i hipoteza koeficijenata razmene često naziva K -teorija.

Turbulentni fluks $\overline{u_i S}$ konzervativne veličine S koja se menja u pravcu x_i može se napisati u sledećem obliku (Stull, 1988), uzimajući u obzir komponentu brzine turbulentnih vrtloga u_i

$$\overline{-u_i S} = K_s \frac{\partial S}{\partial x_i} \quad (2.31)$$

U fizičkom pogledu koeficijent K_s predstavlja provodljivost atmosfere za turbulentne vrtloge. Prema jednačini 2.31 turbulentni fluksevi energije, količine kretanja, vlage i pasivne supstance (gasoviti polutanti ili čestica) mogu se prikazati u sledećem obliku

$$\overline{uw} = K_m \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (2.32)$$

$$\overline{w\theta_0} = K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (2.33)$$

$$\overline{wq_0} = K_q \frac{\partial q}{\partial z}, \quad (2.34)$$

$$\overline{wC} = K_c \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (2.35)$$

Poznavajući koeficijente razmene možemo prikazati sve turbulentne flukseve koji se javljaju prilikom interakcije biosfere i atmosfere. Otuda se jednačina 2.35 može iskoristiti za predstavljanje turbulentnih flukseva pasivnih jedinjenja kao što je CO_2 , ali i reaktivnih jedinjenja kao što su grupe azotnih oksida čiji je životni vek duži od vremena potrebnog da se izvrši transport turbulentnim vrtlozima od tla do referentne visine

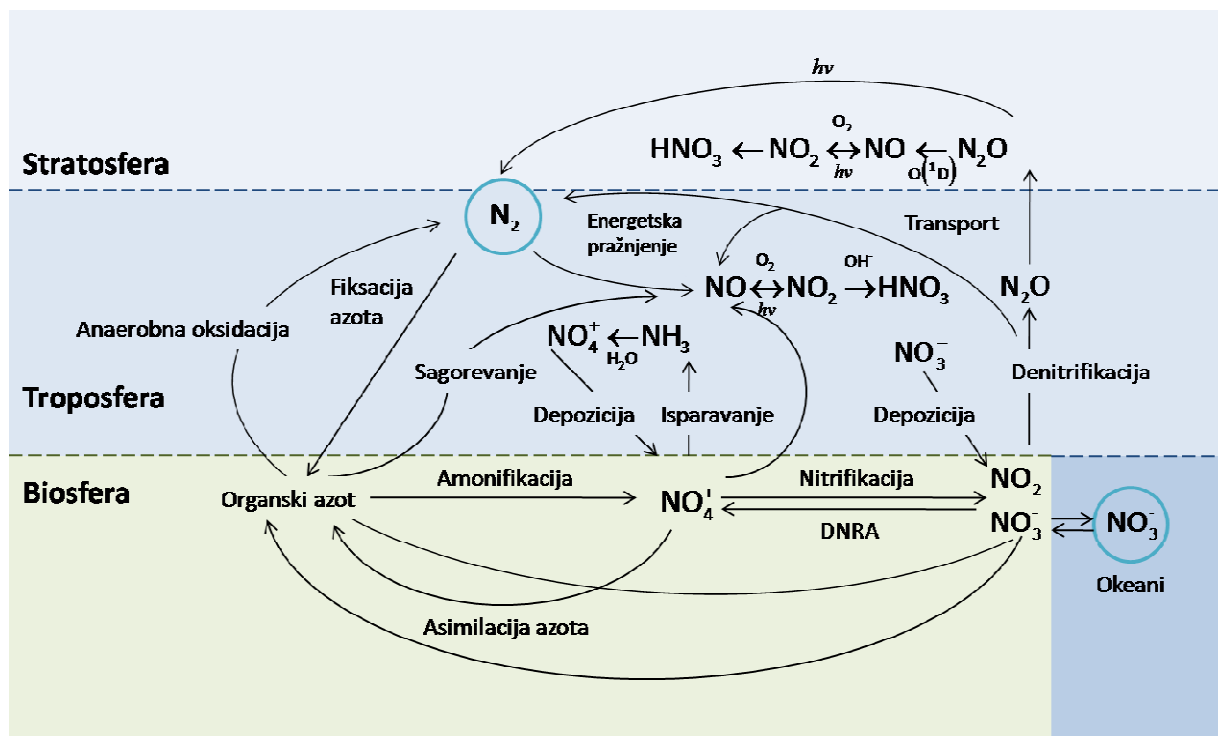
$$\overline{w[CO_2]} = K_{CO_2} \frac{\partial[CO_2]}{\partial z} \quad \text{ili} \quad \overline{w[NO_Y]} = K_{NO_Y} \frac{\partial[NO_Y]}{\partial z}. \quad (2.36)$$

Empirijski rezultati koji pokazuju da su vrednosti K_h i K_q veoma slične (Högström, 1967; Dyer and Hicks, 1970). Analogno, K_c uzima vrednost K_h (Droppo, 1985).

2.2.3 Zemljište kao izvor i ponor CO_2 i NO_x

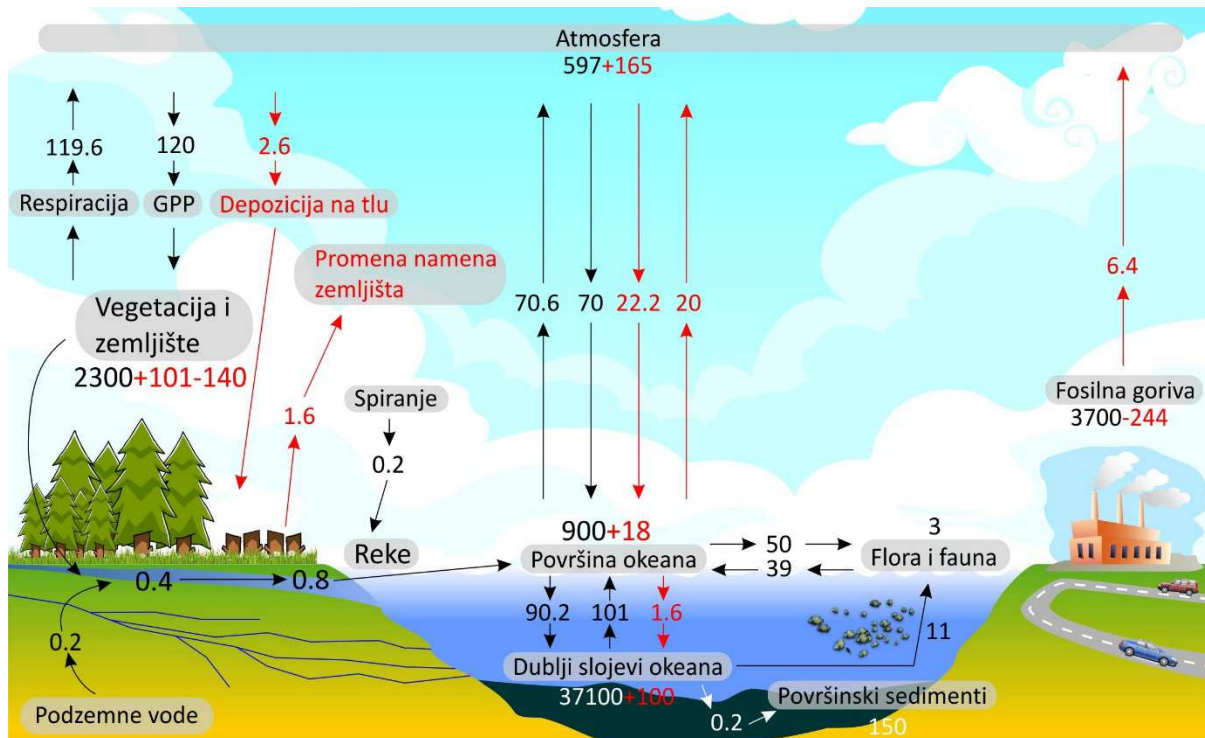
Emisija. Turbulentni transport je veoma efikasan mehanizam prenošenja gasova kao što su CO_2 i NO_x u više slojeve atmosfere, ali je u velikoj meri kontrolisan „od strane donjeg graničnog uslova“, odnosno produkcijom gasova u zemljištu. Zemljište je veoma važan izvor atmosferskih oksidanata i CO_2 , koji nastaju pri razlaganju organske materije. Iako je produkcija NO_x u prirodnim uslovima za red veličina manja (NO_x : 5,5 - 21 Tg N godišnje (Yienger and Levy, 1995; Davidson and Kingerlee, 1997)) od antropogene produkcije, prvenstveno sagorevanjem fosilnih goriva (NO_x : 20 - 21 Tg N godišnje), značaj prirodne emisije je u globalnoj raspodeli, a ne koncentrisanju u pojedinim regijama u svetu, kao što je slučaj kod antropogene emisije. Ciklus azotnih oksida u biosferi, troposferi i stratosferi, zajedno sa hemijskim transformacijama i fizičkim procesima uklanjanja prikazan je na slici 2.3. Za razliku od emisije NO_x , emisija CO_2 iz zemljišta na globalnom nivou kreće se u granicama od 75 do 100 Pg C godišnje, što je za red veličina veća vrednost od emisije sagorevanjem fosilnih goriva (slika 2.4). To potvrđuje i činjenica da približno 10 % ukupnog atmosferskog ugljenika prođe kroz procese u zemljištu svake godine (Bond-Lamberty and Thomson, 2010; Reichstein and Beer, 2008).

Značaj produkcije gasova u zemljištu važno je sagledati i sa aspekta klimatskih promena. Globalna samoregulacija procesa produkcije i asimilacije atmosferskih oksidanata i GSB u zemljištu značajno je narušena povećanom koncentracijom polutanata u atmosferi, posebno povećanom koncentracijom CO_2 (Pendall et al., 2004). Dugogodišnji stav da će prirodni kopneni ekosistemi da utiču na usporavanje klimatskih promena regulacijom koncentracije polutanata, prvenstveno u zemljištu, pokazao se precenjen (van Groenigen et al., 2011).



Slika 2.3 Ciklus azotnih jedinjenja u biosferi, troposferi i stratosferi.

Azot-monoksid. Produkcija NO u zemljištu zavisi prvenstveno od biogeofizičkih i hemijskih karakteristika zemljišta, ali i od dostupnih izvora azota i bakterija, koje učestvuju u procesima nitrifikacije i denitrifikacije. Nitrifikacija se odvija u aerobnim uslovima u prisustvu bakterija *Nitrosomas*, *Nitrospira* koje oksiduju amonijum jon (NH_4^+) do nitrita (NO_2^-) i *Nitrobacter*-a koji vrši dalju oksidaciju nitrita do nitrata (NO_3^-). Smatra se da se između 0,1 % i 10 % ukupne količine azota izgubi u obliku NO u toku procesa nitrifikacije, ali tačan niz reakcija odgovornih za oslobađanje NO još nije razjašnjen. Drugi proces odgovoran za produkciju NO je denitrifikacija. Denitrifikacija se odvija u anaerobnim uslovima ili u slojevima zemljišta sa izuzetno malom količinom kiseonika. Manja količina kiseonika omogućuje produkciju redukovanih oblika azotnih jedinjenja NO, N_2O i N_2 iz NO_3^- (Stohl et al., 1996). Poznato je da je rad bakterija uslovljen stanjem u okolini posebno temperaturom i vlagom. Merenja su pokazala da intenzitet emisije NO iz zemljišta zavisi od istih parametara sredine, njihove međusobne zavisnosti i ekstremnih pojava (Papke and Papen, 1998). Nagle pojačane emisije NO_x iz zemljišta zabeležene su u kišnim danima koji su usledili posle dužeg suvog perioda. Efekat indukovanja emisije padavinama nazvan je pulsiranje. Smatra se da je 10-22 % ukupne emisije NO iz zemljišta rezultat pulsiranja (Davidson, 1992), dok su mišljenja podeljena oko toga šta izaziva pulsiranje, da li je to dužina suvog perioda (Davidson, 1992; Yan et al., 2005) ili količina padavina (Yienger and Levy, 1995).



* IPCC 2013 (Ciais et al., 2013) - veličina rezervoara C u Gt, fluksevi su dati u Gt godišnje
Slika 2.4 Globalni ciklus ugljenika.

Ugljen-dioksid. Emisija CO_2 iz zemljišta javlja se usled autotrofne i heterotrofne respiracije u zemljištu. Autotrofna respiracija predstavlja generisanje CO_2 u procesu disanja autotrofnih organizama (biljaka), dok se heterotrofna respiracija javlja kod svih drugih životinjskih oblika u površinskom sloju zemljišta koji prilikom razgradnje organske materije produkuju CO_2 . Razdvajanje emisije iz zemljišta, na autotrofnu i heterotrofnu respiraciju, jedan je od glavnih nepoznanica u predviđanju mogućeg fluksa. Merenja su pokazala da fluks CO_2 iz zemljišta zavisi od temperature i vlažnosti zemljišta, ali i od fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta. Razlike se javljaju zbog velike heterogenosti spoljašnjih uticaja na malim razmerama koje značajno menjaju moguću produkciju CO_2 . Iz tog razloga je stepen zastupljenosti dva vida respiracije u ukupnom fluksu veoma promenljiv, i to od 10 do 90 % u zavisnosti od tipa zemljišta, vegetacije i godišnjeg doba (Hanson et al., 2000).

Faktori koji kontrolišu emisiju. Teorijski i eksperimentalno utvrđen je širok spektar fizičkih veličina koje utiču na intenzitet emisije, a u najznačajnije se ubrajaju temperatura zemljišta, intenzitet zračenja, vlaga u zemljištu i stelji (rastresiti sloj biljne materije koja se gomila na površini zemljišta), vlažnost vazduha, brzina vetra i intenzitet turbulencije. Pored fizičkih veličina emisija zavisi i od hemijskih i fizičkih karakteristika zemljišta i koncentracije neorganskih hranljivih materija.

Temperatura. Uzimajući u obzir da je emisija CO_2 i NO zasnovana na hemijskim reakcijama uticaj temperature se ogleda u brzini odigravanja hemijskih reakcija. Uticaj temperature na brzinu hemijske reakcije opisan je u podpoglavlju 2.2.4.

Vetar. Uticaj vetra na emisiju ogleda se u procesu prenošenja polutanata u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Prilikom vertikalnog transporta brzina vetra se ogleda u brzini vertikalnih turbulentnih tokova. Horizontalno kretanje vazduha, advekcija, utiče na promenu koncentracije polutanata prenoseći emitovane polutante sa drugih lokaliteta. Promena koncentracije može imati

uticaj na transportne procese na samoj površini onemogućavajući ili intenzivirajući proces molekularne difuzije. Pored prenošenja gasova u horizontalnom pravcu, velike brzine vetra mogu da dovedu do eolske erozije najvišjih slojeva zemljišta, čime se oslobađaju gasoviti produkti mikrobiološke aktivnosti.

Padavine. Vlaga u zemljištu je funkcija fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta i padavina. Merenja su zabeležila značajne promene u fluksevima, u vidu pulsiranja, prilikom promene vlažnosti zemljišta, naročito posle padavina koje se javljaju nakon sušnih perioda (Hanson et al., 2000; Lee et al., 2002; Xu et al., 2004; Yuste et al., 2003). Pulsiranje je proces izazvan naglom aktivacijom mikroorganizama, indukovanjem hemijskih reakcija i istiskivanjem vazduha bogatog produkovanim gasovima iz zemljišta kada voda ispunjava pore i zamenjuje vazduh. Efekti koji dovode do pulsiranja može se reći da su zajednički za CO₂ i NO zbog prirode procesa njihovog generisanja u zemljištu. Ipak, pulsiranje fluksa nije primećeno samo posle padavina, nego i posle đubrenja i oranja na poljoprivrednim površinama, kao i nakon požara (Sanhueza, 1997). Prema tome, pulsiranje je veoma složen fenomen, na koji utiču različiti spoljašnji faktori, i koji je potrebno posebno i sa pažnjom posmatrati.

Depozicija. Depozicija gasova i čestica predstavlja osnovni mehanizam uklanjanja polutanata iz atmosfere koji može da se posmatra kao jednosmeran i dvosmeran proces (Sehmel, 1980). U slučaju jednosmerne depozicije gasovi i čestice, koji turbulentnim transportom dospeju u blizinu čvrste površine, mogu biti preneseni u laminarni podsloj i potom akumulirani na površini - receptoru. U slučaju dvosmerne depozicije odvija se i proces reemisije, odnosno podizanja akumuliranih gasova i čestica sa receptora iz laminarnog podsloja u turbulentni tok fluida. Hrapavost podloge značajno povećava verovatnoću uklanjanja gasova i čestica iz turbulentne vazdušne struje. U zavisnosti od hemijskih karakteristika polutanta, kao i sadržaja gasova i vlage na podlozi, postoji mogućnost pojave hemijskih reakcija između deponovanih gasova međusobno i gasova i podloge. Iznos uklanjanja gasova i čestica opisuje se turbulentnim fluksom mase, odnosno turbulentnim fluksom suve depozicije (F_d , molekula cm⁻² s⁻¹).

Transporti iznad golog zemljišta su turbulentnog karaktera, te se za opisivanje F_d koriste već poznate tehnike parametrizacija turbulentnih flukseva. Parametrizacija suve depozicije započinje određivanjem referentne visine (z_r) ispod koje se turbulentni fluks može predstaviti kao F_d . U mikrometeorološkim razmerama referentna visina zapravo odgovara visini površinskog sloja. U PS konzervacija vertikalnog turbulentnog fluksa koncentracije može da se pretpostavi samo za hemijske vrste čiji je životni vek duži od jednog sata. Kod visokoreaktivnih jedinjenja usled brzih hemijskih transformacija dolazi do divergencije fluksa i jedinjenje koje je započelo turbulentni transport ne dolazi u istom obliku do receptora.

Intenzitet uklanjanja pasivne ili slabo reaktivne supstance procesom suve depozicije najčešće se opisuje empirijski preko vrednosti brzine depozicije. Brzine depozicije (v_d) izražava se preko zakona održanja mase supstance koja se taloži u obliku

$$v_d = \frac{F_d}{C_a - C_r}, \quad (2.37)$$

gde su sa C_a i C_r označene koncentracije supstance na referentnoj visini u atmosferi i na receptoru, redom. Ukoliko F_d parametrišemo analogno Omovom zakonu, preko koeficijenta provodnosti sredine (k_r) i razlike koncentracija, dobijamo

$$F_d = k_r (C_a - C_r). \quad (2.38)$$

Zamenom jednačine 2.38 u jednačinu 2.37 konačni izraz za brzinu depozicije ima oblik $v_d = k_r$. Međutim, v_d se češće izražava preko provodnosti sredine odnosno njene recipročne vrednosti otpornosti (r)

$$v_d = \frac{1}{r}. \quad (2.39)$$

Ukoliko se transport vrši kroz sloj vazduha sa referentnog nivoa na površinu zemljišta otpor će da zavisi od transportnih karakteristika vazduha. Prema tome, u turbulentnom podsloju vrednost otpora će se razlikovati od vrednosti otpora transportu u laminarnom podsloju. Ukupna brzina depozicije je srazmerna sumi recipročnih vrednosti otpora na koje supstanca nailazi prilikom transporta. Svaka promena u sloju vazduha iznad tla, kao što je, na primer, prisustvo vegetacije na tlu, proširiće izraz 2.39 sa različitim vrednostima otpora u sredinama u kojima se transport vrši. U prikazanom slučaju sa otporom vazduha između referentnog nivoa i biljnog sklopa - aerodinamičkim otporom (r_a), rezultujućim otporom vegetacije (r_b) i stomatarnim otporom na listu (r_s)

$$v_d = \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_s}. \quad (2.40)$$

2.2.4 Hemijski procesi

Hemijske transformacije koje se odigravaju u atmosferi najčešće spadaju u reakcije oksidacije. Reakcije koje utiču na ciklus ugljenika, azota i sumpora su od najveće važnosti za razvoj života na planeti, ali i za novonastale ubrzane promene klime i kvaliteta vazduha. Hemizam troposfere je okarakterisan životnim vekom gasovitih primesa na lokalnom i globalnom nivou. Za dugoživeće gasove karakterističan je transport na velike udaljenosti. Dugi životni vek jedinjenja omogućava sagledavanje uticaja globalne cirkulacije atmosfere na rasprostiranje i eventualno uklanjanje gasa. Međutim, za hemizam atmosfere najčešće su odgovorni gasovi koji veoma brzo reaguju, i pri tom učestvuju u širokom spektru reakcija koje na lokalnom nivou menjaju kvalitativne karakteristike vazduha. Najčešći ishod hemijskih reakcija je produkcija već prisutnih polutanata, čime se stvara sekundarni izvor koji nije nužno izazvan povećanom antropogenom emisijom sa tla.

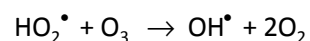
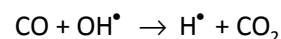
Sunčevo zračenje izaziva hemijske procese u atmosferi preko interakcije sa molekulima koji poseduju sposobnost da se ponašaju kao fotoakceptori. Slobodni radikali, izuzetno reaktivni molekuli, kao što su atomski kiseonik (O), atomski vodonik (H), hidroksilni radikal (OH^\bullet) i hidroperoksi radikal (HO_2^\bullet), formiraju se u reakcijama fotodisocijacije. Proces fotodisocijacije je energetski zavistan i samo fotoni sa dovoljnom količinom energije mogu izazvati fotodisocijaciju

određenog molekula. Jedan od najznačajnijih procesa fotodisocijacije je razlaganje NO_2 u donjem sloju atmosfere, čiji ishod je, neretko, produkcija ozona (O_3). Stratosferski ozonski omotač štiti površinu Zemlje od štetnog kratkotalasnog UV zračenja. Međutim, O_3 je visoko toksičan gas čija pojava u troposferi je od posebnog značaja kako u agroekološkim tako i u medicinskim studijama. Sa druge strane NO , emitovan sagorevanjem fosilnih goriva, generisan električnim pražnjenjem u atmosferi i biogenom emisijom iz zemljišta, reaguje sa troposferskim ozonom oksidujući se do NO_2 . Dnevni ciklus jedinjenja u troposferi i stratosferi koja nastaju emisijom NO mogu se, u najkraćem obliku, zapisati reakcijama R1–R3.

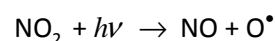
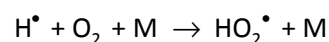
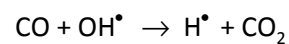


Komponenta M, prisutna u hemijskoj reakcijama, predstavlja jedinjenje koje se ne menja, ali doprinosi povećanju ukupne energije potrebne za izvođenje reakcije. Ciklus razlaganja i produkcije O_3 preko NO_x dovodi do smanjenja koncentracije O_3 u ozonskom omotaču i povećava intenzitet štetnog UV zračenja na površini. Povećan intenzitet UV zračenja uslovljava ubrzano razlaganje NO_2 u korist produkcije NO u toku dana. Taj doprinos povećava produkciju NO_2 u toku noći i u globalu dovodi do porasta koncentracije NO_x u prirodnim uslovima.

Familija NO_x igra ulogu katalizatora u različitim atmosferskim hemijskim reakcijama. U atmosferi sa niskom koncentracijom NO_x O_3 će biti uklonjen kroz reakcije oksidacije ugljenmonoksida (CO) (R5).



Reakcije u kojima učestvuju radikali odigravaju se u deliću sekunde, zbog čega je teško odrediti pravo naelektrisanje molekula, i zbog čega su setovi reakcija na kraju prikazani zbirnim hemijskim jednačinama. U atmosferi sa visokom koncentracijom NO_x O_3 se formira u toku oksidacije CO (R7).



Prema tome, značaj koncentracije NO_x nije samo u produkciji O_3 nego i u njegovom uklanjanju iz donjih slojeva atmosfere. Reakcije prikazane u setu R4 odigravaju se kada je koncentracija NO_x manja od 5 ili 30 pmol mol^{-1} , u zavisnosti od ostalih meteoroloških faktora, dok se set reakcija R6 odigrava iznad granice od 30 pmol mol^{-1} (Brasseur et al., 1999). Koncentracija NO_x ne zavisi samo od emisije iz zemljišta nego i od ulazne koncentracije koja može biti transportovana sa velikih razdaljina. Na ovaj način lokaliteti sa malom emisijom, za koje se smatra da su ponori O_3 , vrlo lako mogu da proizvedu O_3 , ukoliko vazduh koji advektira dolazi iz pravca antropogenog zagađenja. Još jedan set hemijskih reakcija u atmosferi sa visokom koncentracijom NO_x je oksidacija CH_4 , uz produkciju O_3 , u prirodi prisutna iznad zemljišta koja su u toku godine zasićena vodom (R9).



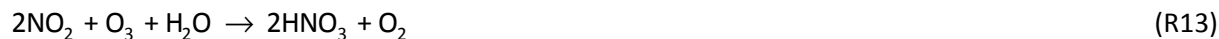
Spektar reakcija u kojima učestvuje NO_x veoma je širok i ne zaustavlja se samo na prethodno prikazanim primerima. Prisustvo organskih jedinjenja u atmosferi bogatoj NO_x rezultuje formiranjem nitrata, a jedan od najpoznatijih organskih nitrata je peroksiacetil nitrat (PAN), čija produkcija počinje oksidacijom acetaldehida (CH_3CHO) (R10).



Poslednja reakcija u sekvenci formiranja PAN-a je izrazito zavisna od temperature. Na visokim temperaturama (malim geografskim širinama) reakcija je pomerena u pravcu formiranja PAN-a. Duži životni vek PAN-a omogućava transport jedinjenja na duže distance i njegovo deponovanje daleko od izvora gde postaje sekundarni izvor NO_2 , zbog povratne reakcije u kojoj je došlo do obrazovanja jedinjenja (Moxim et al., 1996). Hemijska jedinjenja koja prenose i postaju sekundarni izvor polutanata često se nazivaju i skladišna jedinjenja. U skladišna jedinjenja spada i azotna kiselina (HNO_3). U toku dana HNO_3 se formira u reakciji između OH^\bullet i NO_2 (R11).



Dok se u toku noći formira u setu hemijskih reakcija R12 zbirno izraženih u reakciji R13.



U blizini tla HNO_3 se uklanja iz atmosfere u procesima suve i vlažne depozicije zbog veće dostupnosti vode i smanjenog intenziteta fotodisocijacije. Na većim visinama, na kojima je uklanjanje značajno manjeg intenziteta, izražen je skladišni efekat ovog jedinjenja.

Skoro sve hemijske transformacije prikazane u prethodnom tekstu uključuju OH^\bullet i HO_2^\bullet . U površinskom sloju OH^\bullet je produkt fotolize O_3 .



U reakciji R14 nastaje visokoreaktivan pobuđeni atom kiseonika $\text{O}({}^1\text{D})$ koji najčešće ulazi u reakcije sa manje reaktivnim jedinjenjima (npr. H_2O , N_2O) i generiše proizvodnju visoko reaktivnih jedinjenja (npr. OH^\bullet , NO). U sloju atmosfere iznad PGS-a, gde je koncentracija vodene pare veoma mala, za produkciju OH^\bullet odgovorno je prisustvo NO (R15).



Hidroksilni radikal je jedan od najreaktivnijih molekula u atmosferi koji diktira atmosferski oksidacioni kapacitet (Lawrence et al., 2001). Pored toga OH^\bullet i O_3 su odgovorni za produkciju HNO_3 (R11, R12) i samim tim uklanjanje NO_x . Produkcija O_3 ne zavisi samo od koncentracije NO_x , nego i od prisustva isparljivih organskih jedinjenja (*volatile organic compounds*, VOC).

Životni vek NO_x u troposferi je manji od jednog dana i uklanjanje depozicijom najčešće se odvija na lokaciji izvora. Produkovani O_3 može biti transportovan dalje od mesta produkcije jer mu je životni vek jedinjenja između nedelju dana i nekoliko meseci, a zavisi od visine na kojoj je nastao i sezone. Životni vek HNO_3 i PAN jedinjenja zavisi od visine produkcije, odnosno temperaturnog gradijenta. Za razliku od svih drugih jedinjenja životni vek OH^\bullet je manji od jedne sekunde i uklanja se odmah po produkciji, pri čemu utiče na hemijske karakteristike atmosfere na malim razmerama.

Faktori koji utiču na brzinu hemijske reakcije. Brzine hemijskih reakcija variraju u velikom rasponu. Za neke su potrebne hiljade ili milioni godina da značajno napreduju, dok je za druge potreban samo delić sekunde. Hemijska kinetika definiše faktore koji utiču na brzinu hemijske reakcije. Sve hemijske reakcije mogu se predstaviti stehiometrijskim formulama koje su izvedene iz: 1) **zakona o održanju mase** - ukupna masa supstance koja učestvuje u hemijskoj promeni (hemijskoj reakciji) se ne menja (*Lavoisier*), 2) **zakona stalnih masenih odnosa** - elementi se međusobno spajaju u stalnim masenim odnosima, tako da je sastav svakog jedinjenja stalan (*Prust*) i 3) **zakona umnoženih masenih odnosa** - ako dva elementa međusobno grade dva ili više jedinjenja onda se

stalna masa jednog elementa jedini sa različitim masama drugog elementa, a te različite mase drugog elementa stoje u odnosu malih celih brojeva (*Dalton*). Posmatrajmo stehiometrijsku jednačinu reakcije drugog reda koja se može zapisati u sledećem obliku



gde je k_1 konstanta brzine hemijske reakcije. Brzina hemijske reakcije između reaktanata A i B zavisi od njihove koncentracije i reaktivnosti. Zakon održanja mase definiše brzinu hemijske reakcije kao direktno proporcionalnu koncentraciji reaktanata na određenoj temperaturi. Konstanta brzine reakcije predstavlja meru reaktivnosti u vidu konstante proporcionalnosti između brzine reakcije i koncentracije reaktanata, i određuje količinu energije potrebnu za odigravanje reakcije. Konstanta brzine hemijske reakcije izražena je za svaku pojedinačnu reakciju.

Kinetika reakcije R16 označava promenu koncentracije reaktanta (A i B), ili produkta (F) pri konstantnoj zapremini i temperaturi, u jedinici vremena. Brzine nestajanja reaktanata A i B nisu jednake (reaktant B nestaje 2 puta brže), dok je brzina nestajanja reaktanta B jednaka brzini nastajanja produkta F. Iz toga proizilazi da se uvek mora specificirati na koju se reakcionu vrstu odnosi brzina, odnosno konstanta brzine. U prvom koraku brzina hemijske reakcije može se izraziti u odnosu na reaktante ili proizvod reakcije

$$v_A = \frac{d[c_A]}{dt}, \quad v_B = \frac{d[c_B]}{dt}, \quad v_F = \frac{d[c_F]}{dt}. \quad (2.41)$$

Posmatrajući reakciju i promene reaktanata i proizvoda u vremenu može se naći veza između pojedinačnih brzina i izraz za ukupnu brzinu reakcije u obliku

$$v_h = -\frac{1}{2} \frac{d[c_A]}{dt} = -\frac{1}{1} \frac{d[c_B]}{dt} = \frac{1}{1} \frac{d[c_F]}{dt}. \quad (2.42)$$

U izrazu 2.42, negativan predznak pokazuje da se koncentracije reaktanata A i B (c_A , c_B) smanjuju sa vremenom; suprotno, koncentracija produkta F se povećava sa vremenom tako da brzina njegovog nastajanja ima pozitivan predznak. Prema zakonu o dejstvu masa, brzina neke elementarne reakcije je srazmerna koncentraciji svake reagujuće vrste podignutoj na stepen broja molekula koji učestvuju u posmatranoj reakciji. U slučaju reakcije koja je prikazana jednačinom (R16), brzina je data izrazom

$$v_h = -\frac{d[c_A]}{dt} = -2 \frac{d[c_B]}{dt} = 2 \frac{d[c_F]}{dt} = k_1 [c_A]^2 [c_B]. \quad (2.43)$$

Red reakcije dobija se sabiranjem eksponenata svih reaktanata. Prema tome R16 ($1 + 2 = 3$) spada u reakcije trećeg reda. Pregled različitih redova reakcija i njihovih brzina izraženih u diferencijalnom i u integralnom obliku predstavljen je u tabeli 2.4.

U kontrolisanim uslovima hemijske reakcije mogu da dostignu ravnotežu između reaktanata i produkata reakcije u povratnoj reakciji, pri čemu se konstanta brzine k_1 izjednačava sa konstantom brzine k_2



Tabela 2.4 Pregled reakcija različitog reda i njihovih brzina u diferencijalnom i integralnom obliku.

Red	Diferencijalna jednačina	Integralna jednačina	Dimenzije konstante k
0	$-\frac{dc}{dt} = k_1$	$c_0 - c = k_1 t$	$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$
1	$-\frac{dc}{dt} = k_1 c$	$\ln \frac{c_0}{c} = k_1 t$	s^{-1}
2	$-\frac{dc}{dt} = k_1 c^2$	$\left[\frac{1}{c} - \frac{1}{c_0} \right] = k_1 t$	$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$
2	$-\frac{dc}{dt} = k_1 c_A - c_B$	$\frac{\ln \left[\left(\frac{c_A}{c_{A_0}} \right) \left(\frac{c_B}{c_{B_0}} \right) \right]}{c_{A_0} - c_{B_0}} = k_1 t$	$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$
3	$-\frac{dc}{dt} = k_1 c^3$	$\frac{1}{2} \left[\frac{1}{c^2} - \frac{1}{c_0^2} \right] = k_1 t$	$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$
n	$-\frac{dc}{dt} = k_1 c^n$	$\frac{1}{1-n} \left[\frac{1}{c^{n-1}} - \frac{1}{c_0^{n-1}} \right] = k_1 t$	$\text{mol}^{1-n} \text{m}^{-(1-n)3} \text{s}^{-1}$
Literatura		Atkins and de Paula (2006)	

Temperatura. Brzina hemijskih reakcija zavisi od temperature okoline, odnosno od energije koja je dostupna atomima ili molekulima koji stupaju u hemijsku reakciju. Ova zavisnost prepoznata je početkom XIX veka od strane hemičara, kao što su van Hof (*van Hoff*) i Arenijus (*Arrhenius*, 1908). Prvi model koji je predstavio zavisnost između brzine reakcije i temperature formulisao je van Hof (*van Hoff*, 1884) prilikom unapređivanja proračuna konstante ravnoteže hemijske reakcije

$$\frac{d \ln K_e}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}. \quad (2.44)$$

Ukoliko uzmemo u obzir da koeficijent ravnoteže zapravo predstavlja odnos brzina reakcija ($K_e = k_1/k_2$), a razlika entalpija razliku u energijama aktivacije ($\Delta H = \Delta E_a = E_{a1} - E_{a2}$). Jednačinu 2.46 možemo zapisati u obliku

$$\frac{d \ln \left(\frac{k_1}{k_2} \right)}{dT} = \frac{\Delta E_a}{RT^2}, \quad (2.45)$$

gde su $k_{1/2}$ – koeficijenti brzine hemijske reakcije, E_a – energija aktivacije (minimalna energija koju čestice moraju posedovati da bi došlo do hemijske reakcije), R – univerzalna gasna konstanta i T – apsolutna temperatura. Jednostavnim algebarskim transformacijama dobijamo

$$\frac{d[\ln(k_1) - \ln(k_2)]}{dT} = \frac{E_{a1} - E_{a2}}{RT^2}, \quad (2.46)$$

odnosno napisano za pojedinačne koeficijente brzine hemijske reakcije

$$d \ln(k_1) = \frac{E_{a1}}{RT^2} dT \quad \text{i} \quad d \ln(k_2) = \frac{E_{a2}}{RT^2} dT. \quad (2.47)$$

Ukoliko se uzme u obzir da se E_a ne menja sa temperaturom može se napisati jedna opšta jednačina oblika

$$d \ln(k_x) = \frac{E_a}{RT^2} dT. \quad (2.48)$$

Integracijom jednačine 2.48 po T dobija se

$$\ln(k_x) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(C'), \quad (2.49)$$

$$\ln(k_x) - \ln(C') = -\frac{E_a}{RT} \Rightarrow \ln\left(\frac{k_x}{C'}\right) = -\frac{E_a}{RT}, \quad (2.50)$$

gde je $\ln C'$ integraciona konstanta. Iz jednačine 2.50 dobija izraz za $k_x(T)$ u obliku

$$\frac{k_x(T)}{C'} = e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)}, \quad (2.51)$$

odnosno

$$k_x(T) = C' e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)}. \quad (2.52)$$

U jednačini 2.52 C' predstavlja faktor frekvencije ili učestalosti sudara. Prema tome, Arenijusova teorija zasniva se na teoriji sudara prema kojoj će sudar biti efikasan samo ako se odigra pri odgovarajućoj orijentaciji čestica reaktanata i uz prisustvo molekula sa dovoljno kinetičke energije. Bitno je naglasiti da je Arenijusov model empirijski i da ne postoji fundamentalna definicija za E_a , nego se ona mora odrediti eksperimentalno za svaku pojedinačnu hemijsku reakciju (npr. tabela 2.5).

Pored Arenijusove jednačine u biološkim naukama često se koristi Q_{10} model. Model Q_{10} opisuje promenu brzine reakcije za promenu temperature okoline od 10°C. Ukoliko se posmatra odnos koeficijenata brzina reakcije (k_{T1} , k_{T2}) na dve različite temperature (T_1 i T_2) osnovni oblik funkcije predstavlja se u obliku

$$Q_{10} = \left(\frac{k_{T2}}{k_{T1}}\right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}}. \quad (2.53)$$

Ukoliko za opis koeficijenta brzine reakcije iskoristimo Arenijusov model jednačina 2.52 dobija se oblik Q_{10} modela koji se najčešće koristi u biologiji za procenu temperaturne zavisnosti brzine enzimskih reakcija

$$\frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = \frac{C'e^{\left(\frac{E_a}{RT_2}\right)}}{C'e^{\left(\frac{E_a}{RT_1}\right)}} = e^{\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right]} = e^{\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right)\right]} \quad (2.54)$$

Zamenom jednačine 2.54 u jednačinu 2.53 dobijamo promenu brzine hemijske reakcije za promenu temperature od 10°C

$$Q_{10} = e^{\frac{10E_a}{RT_1 T_2}} \quad (2.55)$$

Tabela 2.5 Vrednosti energije aktivacije (E_a) i Q_{10} koeficijenta za emisiju odabranih polutanata.

Polutant	Podloga	E_a (kJ mol ⁻¹)	Q_{10}	Literatura
CO ₂	zemljište	25–73	1,4–2,7	Door and Munnich (1987)
CO ₂	biljke	51–67	2,0–2,5	Salisbury and Ross (1979)
NO	zemljište	44–103	1,8–4,0	Williams et al. (1987)
NO	biljke	73–94	2,7–3,6	Johansson and Granat (1984)

Intenzitet zračenja. Intenzitet sunčevog zračenja uticaće samo na razlaganje molekula koji imaju sposobnost apsorpcije fotona, a dostupnost fotona odgovarajuće talasne dužine uticaće na brzinu reakcije. Ukoliko posmatramo osnovnu reakciju fotodisocijacije promenu koncentracije reaktanta u vremenu možemo zapisati u diferencijalnom obliku preko konstante brzine fotohemijske reakcije (Hoffmann, 2005; Gery et al., 1989)

$$\frac{d[X_i]}{dt} = -J_i[X_i] \quad (2.56)$$

Konstanta brzine fotohemijske reakcije zavisi od poprečnog preseka za apsorpciju $\sigma_X(\lambda)$ X_i reaktanta, φ - kvantnog prinosa, λ - talasne dužine i $I(\lambda)$ - fluks sunčevog zračenja

$$J_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma_X(\lambda) \varphi_i(\lambda, T) I(\lambda) d\lambda \quad (2.57)$$

Apsorpcioni poprečni presek predstavlja meru sposobnosti molekula da apsorbuje fotone, dok je kvantni prinos verovatnoća nastanka određenih produkata hemijske reakcije procesima fotodisocijacije. Ove vrednosti su laboratorijskim merenjima određene za većinu troposferskih fotodisocijativnih molekula, a funkcija su talasne dužine pa mogu biti i funkcije pritiska i temperature. Dolazni fluks zračenja je radiometrijska mera sunčevog zračenja koja zavisi od astronomskog i geometrijskog odnosa Zemlje i Sunca (doba dana i godine, geografska širina i dužina,

visina), ekstraterestrične radijacije, zemljinog albeda, procenta atmosferskih apsorbira (O_3 , O), aerosola i oblačnosti u troposferi (detaljna struktura jednačina predstavljena je u Liou, 2002). Osnovne fotohemijske reakcije troposfere date su u tabeli 2.6.

Tabela 2.6 Osnovne fotohemijske reakcije u troposferi.

Jedinjenja	Reakcije fotodisocijacije
Ozon	$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^3P)$ $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D)$
Vodonik-peroksid	$HO_2^\bullet + h\nu \rightarrow \text{produkti}$ $H_2O_2 + h\nu \rightarrow OH^\bullet + OH^\bullet$
Azotni oksidi	$NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O^\bullet$ $NO_3 + h\nu \rightarrow NO_2 + O^\bullet$ $NO_3 + h\nu \rightarrow NO + O_2$ $N_2O_5 + h\nu \rightarrow \text{produkti}$
Azotasta i azotna kiselina	$HONO + h\nu \rightarrow OH^\bullet + NO$ $HO_2NO_2 + h\nu \rightarrow \text{produkti}$
Formaldehid	$CH_2O + h\nu \rightarrow H_2 + CO$ $CH_2O + h\nu \rightarrow H + HCO$
Sirćetna kiselina	$CH_3OOH + h\nu \rightarrow \text{produkti}$
Peroksiacetyl-nitrat (PAN)	$CH_3C(O)O_2NO_2 + h\nu \rightarrow \text{produkti}$
Sumporni oksidi	$SO_2 + h\nu \rightarrow SO + O^\bullet$
Vodonik-sulfid	$H_2S + h\nu \rightarrow HS + H^\bullet$
Ugljenik-disulfid	$CS_2 + h\nu \rightarrow CS + S$
Karbonil-sulfid	$OCS + h\nu \rightarrow CO + S$

Brzina transportnog procesa. Hemijske reakcije koje se odvijaju u prirodnim uslovima zavise od dotoka reaktanata, pa tako brzina reakcije zavisi od brzine transportnog procesa. Zavisnost dva fenomena opisana je bezdimenzionom veličinom Damkelerovim (*Damköhler*) brojem (Db) koji predstavlja odnos vremena potrebnog za odigravanje reakcije (τ_{hem}) i vremena potrebnog da se reaktanti transportuju ($\tau_{turb,dif}$) iz jedinične zapremine fluida u kojoj se reakcija odvija. Damkelerov broj može da se izrazi za različite transportne procese

$$Db = \frac{\tau_{hem}}{\tau_{turb,dif}}. \quad (2.58)$$

Prilikom modeliranja hemijskih procesa značaj informacije koju nam pruža Db ogleda se u verovatnoći pojave hemijske reakcije. Vrednost Db veća od 1 karakteriše sistem koji je limitiran brzinom transportnog procesa i u kom se hemijske transformacije odigravaju brzo. U opisanom sistemu najčešće dolazi do uspostavljanja ravnoteže između reaktanata i produkata reakcije.

Vrednost Db manja od 1 odnosi se na sisteme u kojima je vreme transporta mnogo manje od vremena potrebnog za hemijsku transformaciju. Dominacija transportnog procesa u promeni koncentracije određenog gasa u posmatranoj jediničnoj zapremini značajno smanjuje verovatnoću pojave hemijske reakcije.

2.3 Turbulentni transport gasova unutar visoke vegetacije

2.3.1 Kretanje vazduha unutar biljnog sklopa

Kretanje vazduha unutar biljnog sklopa podređeno je aerodinamičkim i morfološkim karakteristikama vegetacije koji se parametrizuju preko indeksa lisne površine (*leaf area index - LAI*), definisanog kao površina svih listova u elementu zapremina biljnog sklopa površine osnove 1 m^2 i visine koja odgovara visini biljnog sklopa i vertikalne distribucije gustine biljnog sklopa (*leaf area density - LAD*). Jedna od otežavajućih okolnosti u opisivanju turbulentnog transporta unutar biljnog sklopa je lokalni disbalans između produkcije i disipacije turbulentnih vrtloga. Pomenuti disbalans često dovodi do nelokalnih gradijenata i tokova koji su suprotni gradijentima. Turbulentni tokovi koji nisu u funkciji gradijenata onemogućavaju upotrebu K -teorije u njihovoj parametrizaciji koja je upravo iz toga proistekla.

Polazeći od II Njutnovog zakona, i imajući u vidu sile koje deluju na jediničnu masu vazduha koja se kreće, jednačina za x komponentu ubrzanja može se napisati u obliku (Mahrt, 1982; Raupach and Shaw, 1982; Wilson, 1985)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\theta}{\theta_0} \sin \delta + fv - \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} + F_{dtr} \quad (2.59)$$

gde su u , v i w komponente brzine osnovne struje fluida u x , y i z pravcu, δ – nagib terena, p – atmosferski pritisak, θ_0 – temperatura okolnog vazduha, ρ – gustina vazduha, f – Koriolisov parametar. Ukoliko pretpostavimo da se radi o jednodimenzionom ($v, w = 0$), stacionarnom ($\partial u / \partial t = 0$) i uniformnom toku fluida preko ravne površine ($\sin \delta = 0$) jednačina 2.59 se svodi na

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv - \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} + F_{dtr} \quad (2.60)$$

Sila gradijenta pritiska ($\partial p / \rho \partial x$) i Koriolisova sila (fv) koje su ostale u jednačini najčešće se zanemaruju zbog veoma malog intenziteta koji je nekoliko redova veličina manji od x komponente gradijenta turbulentnog fluksa količine kretanja ($\partial \overline{uw} / \partial z$). Uvedene pretpostavke dovode do jednačine 2.61 koja izražava pretpostavku o ravnoteži gradijenta turbulentnog fluksa količine kretanja i sile trenja koja se javlja dok se vazduh kreće kroz biljni sklop

$$-\frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} + F_{dtr} = 0. \quad (2.61)$$

Ukoliko posmatramo element zapremine vazduha oblika paralelopipeda površine S i visine H , koja je ispunjena biljnom masom, onda se vazduhu koji prolazi kroz ovu zapreminu suprotstavlja sila trenja (F_{tr}) koja se javlja na svim kontaktnim površinama, a koja se izražava kao zapreminska sila zbog delovanja po elementu zapremine (F_{tr}/SH). Sila trenja dovodi do smicanja osnovne struje vazduha, a gradijent napona smicanja ($\partial\tau/\partial z$) jednak je sili trenja po jedinici zapremine (F_{dtr})

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = F_{dtr}. \quad (2.62)$$

Pored toga, sila trenja po jedinici zapremine srazmerna je brzini vazduha odnosno njegovoj zapreminskoj kinetičkoj energiji

$$F_{dtr} = LAD(z) C_d u_c^2, \quad (2.63)$$

gde su C_d - koeficijent srazmernosti, u_c – ukupna brzina vetra unutar vegetacije, $LAD(z)$ - površina listova po jedinici zapremine, odnosno vertikalna raspodela gustine biljnog sklopa. Zamenom izraza 2.63 u jednačinu 2.61 dobija se jednačina koja često predstavlja polazište u razmatranjima transporta količine kretanja unutar vegetacije

$$-\frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} + LAD(z) C_d u_c^2 = 0. \quad (2.64)$$

Rešenje jednačine 2.64 daje eksponencijalnu ili hiperboličku promenu brzine vetra sa visinom. Vertikalna gustina biljnog sklopa, njen uticaj na mikroklimu i aktuelni procesi parametrizacije biljnog sklopa opisani su u podpoglavlju 2.3.6.

2.3.2 Zatvaranje jednačina kretanja unutar vegetacije

Efikasnost zatvaranja sistema jednačina i slaganje sa osmotrenim profilima zavisi pre svega od poznavanja mehanizama nastanka i prirode turbulentnog kretanja unutar vegetacije. Sheme zatvaranja jednačina kretanja unutar vegetacije su sheme 1. reda, 1½ i 2. reda. Razvijane su i sheme višeg reda, ali od njih se odustalo, jer kompleksnu strukturu nisu opravdale dovoljno dobrim rezultatima.

Zatvaranje prvog reda. Hipoteza o koeficijentima razmene korišćena za izračunavanje turbulentnih flukseva iznad golog zemljišta koristi se i za transport kroz biljni sklop, ali uz više pretpostavki vezanih za koeficijent turbulentnog transporta količine kretanja (K_{mc}) (Lalić, 2006): 1) proporcionalnost između K_{mc} i brzine vetra unutar sklopa, 2) zavisnost K_{mc} od visine biljnog sklopa, 3) jednakost između K_{mc} i proizvoda promene brzine vetra sa visinom unutar biljnog sklopa i puta mešanja, 4) zavisnost K_{mc} od kinetičke energije turbulentnih vrtloga i puta mešanja.

Jednačina 2.64, uz pretpostavku da se turbulentni fluks količine kretanja može izraziti preko K -teorije (jednačina 2.32) daje

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(-K_{mc} \frac{\partial u_c}{\partial z} \right) + LAD(z) C_d u_c^2 = 0. \quad (2.65)$$

Ukoliko iskoristimo jednostavnu parametrizaciju koeficijenta transporta količine kretanja $K_{mc} = \sigma u_c$ za jednoslojni, homogeni model biljnog sklopa (u kome distribucija lisne površine u sloju konstantne gustine može da se izrazi kao $LAD(z) = LAI/h$) dobijamo sledeću jednačinu

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(-\sigma u_c \frac{\partial u_c}{\partial z} \right) + \frac{LAI}{h} C_d u_c^2 = 0, \quad (2.66)$$

gde je σ konstanta proporcionalnosti koja zavisi od karakteristika vegetacije.

Profil brzine vetra unutra biljnog sklopa dobijen rešavanjem jednačine 2.66 uz upotrebu graničnih uslova: a) $u_c(h) = u_h$ (gde je u_h brzina vetra na vrhu vegetacije) i b) $u_c(0) = 0$ (brzina vetra na tlu), predstavlja poznati hiperbolički Kovanov profil (Cowan, 1968)

$$u_c(z) = u_h \left[\frac{\operatorname{ch} \left(\beta \frac{z}{h} \right)}{\operatorname{ch} \beta} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.67)$$

U izrazu 2.67 za profil brzine vetra β je faktor koji u fizičkom smislu predstavlja prigušenje vetra koje zavisi od morfoloških karakteristika vegetacije. Oblik faktora β izražen je u procesu integracije u obliku

$$\beta^2 = \frac{2C_d LAI h}{\sigma}. \quad (2.68)$$

Uspešno korišćenje hiperboličkog profila vetra iziskuje da su zadovoljene pretpostavke u vezi sa strukturom vegetacije koje se u praksi retko sreću i to samo u slučaju niske vegetacije. Fizički realističnija slika biljnog sklopa je podela na dva sloja, sloj krošnje i sloj stabla. Raslojavanje se opravdava činjenicom da veliki procenat šuma ne propušta dovoljnu količinu energije zračenja da se unutar biljnog sklopa razvije sekundarni sprat vegetacije, nego sloj iznad zemlje zauzimaju ogoljena stabla. Pored toga veliki broj merenja pokazao je da se upravo u najnižem sloju biljnog sklopa javljaju najveći gradijenti brzine vetra i skalara (Garstang and Fitzerald, 1999; Zeng and Takahashi, 2000). Upotrebom dvoslojne aproksimacije biljnog sklopa i osmotrenih podataka profila vetra Lalić (1997) je izvršila korekciju hiperboličkog profila, deleći ga na brzine vetra karakteristične za krošnju i brzine vetra karakteristične za sloj stabala ispod visine donje baze krošnje kao

$$u_c(z) = \begin{cases} u_h \left[\frac{\cosh \left[\beta \left(\frac{z - z_b}{h} \right) \right]}{\cosh \left[\beta \left(1 - \frac{z_b}{h} \right) \right]} \right]^n & z_b < z \leq h \\ C_h u_h & z_0 < z \leq z_b \end{cases} \quad (2.69)$$

gde su z_b – visina donje baze krošnje, C_h – konstanta koja zavisi od strukture i tipa šume dobijena iz sistema od devet transcendentnih jednačina (Lalic et al., 2003)

$$C_h = \left[\cosh \beta \left(1 - \frac{z_b}{h} \right) \right]^{-\frac{7}{2}}. \quad (2.70)$$

Koeficijent n , iz jednačine 2.69, dobijen je empirijski i u prvim publikacijama iznosi 7/2 (Lalic et al., 2003), dok se kasnije pokazalo da vrednost od 5/2 bolje opisuje realne podatke (Lalić, 2006). Parametar β zavisi od karakteristika vegetacije i parametrizovan je preko izraza koji je predložio Masman (Massman, 1987) u obliku

$$\beta = \frac{4C_d LAI}{\alpha^2 k^2}. \quad (2.71)$$

Osetljivost profila vetra unutar biljnog sklopa povećana je promenom koeficijenta α . U prvim radovima α uzima vrednost između 1 i 2 (Raupach and Throm, 1981; Lalic et al., 2003), dok se u kasnijim radovima javlja kao vrednost zavisna od vrste vegetacije izražena preko LAI (Lalić, 2006).

$$\alpha^2 = (4C_d LAI)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.72)$$

2.3.3 Difuzija polutanata unutar biljnog sklopa

Polazna jednačina za opis difuzije polutanata (gasovi, aerosoli, čestice) unutar biljnog sklopa nastala je pod pretpostavkom da posmatramo turbulentni transport nestišljivog fluida koji prenosi polutant određene koncentracije od ili do receptora na površini. Promena koncentracije se u tom slučaju može zapisati

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \left(K_{cx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_{cy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_{cz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{uc}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vc}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{wc}}{\partial z} \right) + S_{c,xyz}. \quad (2.73)$$

Zanemarivanjem horizontalnog toka i posmatranjem samo vertikalnog turbulentnog transporta jednačina 2.73 može da se napiše u obliku

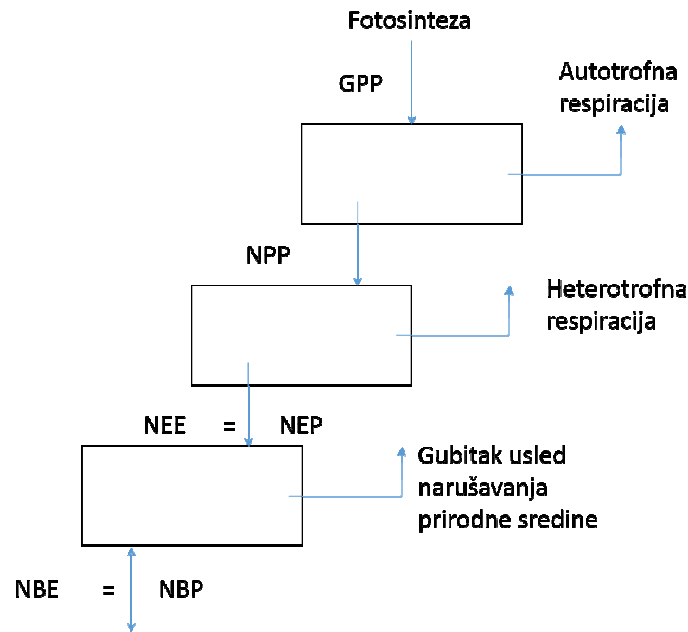
$$\frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial z} = K_{cz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial \overline{wc}}{\partial z} + S_{c,z}, \quad (2.74)$$

gde je sa C označena koncentracija polutanta, K_{cz} – koeficijent turbulentne difuzije polutanta, $S_{c,z}$ – član koji opisuje izvore i ponore polutanta na površini ili u hemijskim procesima. Sa aspekta intenziteta razmene polutanata između atmosfere i biosfere u jednačini 2.74 od najvećeg značaja je parametrizacija $S_{c,z}$ koja zavisi od vrste medijuma ili jedinjenja koje predstavlja izvor ili ponor polutanta. Ukoliko posmatramo uklanjanje CO_2 član $S_{c,z}$ će se odnositi na neto efekat intenziteta fotosinteze na nivou lisne površine i respiracije sa površine lista i zemljišta. U slučaju NO_x isti član obuhvata neto efekat više faktora: a) usvajanje NO_x od strane listova (suva depozicija na listu i u unutrašnjosti lista), b) emisiju sa površine zemljišta i c) hemijsku transformaciju prilikom difuzije kroz biljni sklop. Svi faktori zajedno govore o efikasnosti uklanjanja pojedinih hemijskih vrsta, u ovom slučaju CO_2 i NO_x , od strane biljnog sklopa. Prilikom razmatranja promene koncentracije polutanta unutar biljnog sklopa moguća su dva pristupa. Prvi je računanje difuziono-advektivne funkcije koja daje promenu koncentracije u prostoru (x, y, z) i vremenu (t) uz pretpostavljeni vertikalni profil vetra prikazan u podpoglavlju 2.3.2., a drugi pristup je parametrizacija procesa suve depozicije i emisije bez detaljne prostorne i vremenske analize koji su opisani u podpoglavlju 2.3.4.

2.3.4 Biljni sklop kao izvor i ponor CO_2 i NO_x

U lancu vezivanja i emisije CO_2 u prirodnim uslovima šumska vegetacija, koja prekriva približno 30 % kopna, prepoznata je kao najznačajnija karika. Svetske šume godišnje vežu 120 Gt C (IPCC, 2013) i pretvore ga u organsku materiju. Intenzitet neto razmene CO_2 na nivou biljnog sklopa definisan je veličinom NEE i obuhvata turbulentni transporta unutar biljnog sklopa i koncentracije polutanta koje variraju usled postojanja izvora i ponora, u ovom slučaju CO_2 .

Pre nego što nastavimo treba da razmotrimo osnovnu terminologiju koja se javlja prilikom objašnjavanja ciklusa CO_2 i ostalih jedinjenja unutar sistema biosfera-atmosfera. Na slici 2.5 predstavljena je shema usvajanja i produkcije CO_2 od strane biljnog sklopa i zemljišta. Prva veličina označava ukupnu primarnu produkciju (*gross primary production*, GPP) koja obuhvata ukupan apsorbovani CO_2 na određenom prostornom i vremenskom razmeru. Iz GPP posebno se izdvaja neto primarna produkcija (*net primary production*, NPP) koja predstavlja razliku između količine apsorbovanog CO_2 u procesu fotosinteze i ispuštenog u procesu fotorespiracije. Ukupna razmena, razlika između apsorbovanog i produkovanog CO_2 kopnenih ekosistema definiše neto razmenu (*net ecosystem exchange*, NEE). Ukoliko u obzir uzmemo narušavanje prirodne NEE za pojedine ekosisteme, koji su osetljivi na antropogene uticaje, može se izraziti neto razmena na nivou različitih ekosistema koji pripadaju određenoj klimatskoj zoni, biomu (*net biome exchange*, NBE; *net biome production*, NBP).



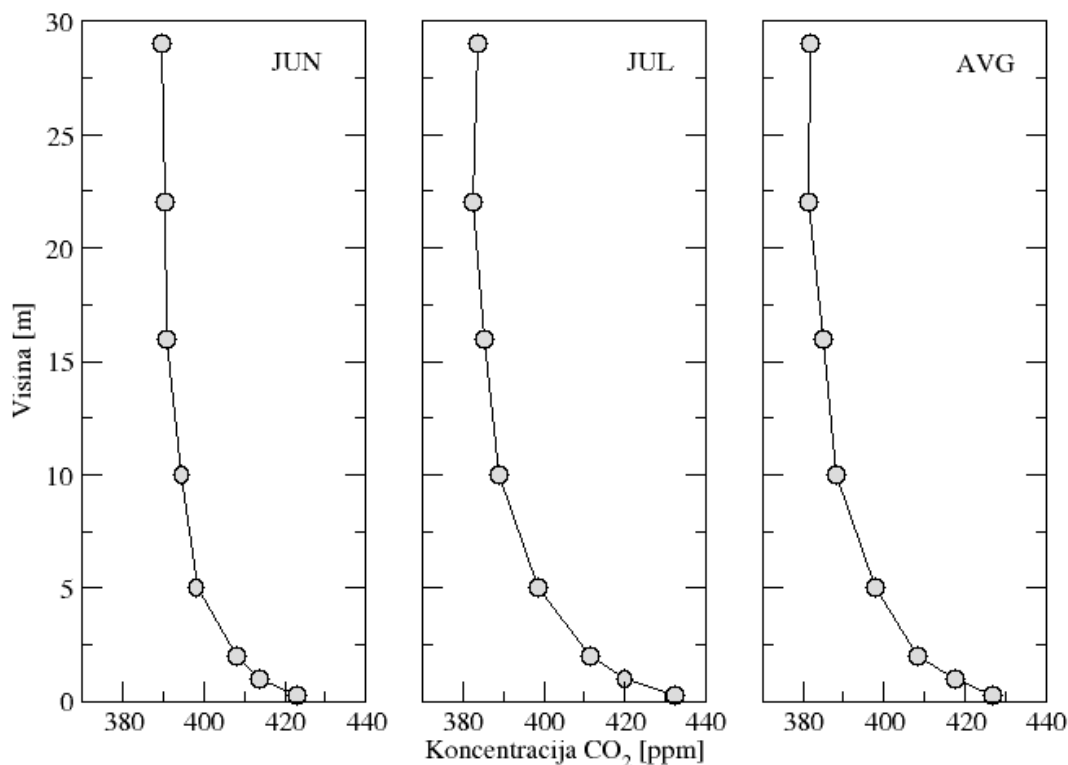
Slika 2.5 Dijagram termina osnovnih veličina ciklusa CO₂.

Neto razmena CO₂ između biljnog sklopa i atmosfere može se formulisati kao zbir svih izvora i ponora ovog gasa unutar sloja u kom se odigrava turbulentni transport

$$NEE = \int_0^{z_r} \frac{\partial S_{e,z}}{\partial t} dz = \left(\overline{wc} \right)_{z_r} + \int_0^{z_r} \frac{\partial C}{\partial t} dz + \int_0^{z_r} w \frac{\partial C}{\partial z} dz + \int_0^{z_r} u \frac{\partial C}{\partial x} dz, \quad (2.75)$$

gde je z_r – referentni nivo, $\partial C/\partial z$ i $\partial C/\partial x$ gradijenti koncentracije u vertikalnom, i horizontalnom pravcu, redom. Prvi član sa desne strane predstavlja turbulentni transport, drugi promene u koncentraciji uskladištenog gasa unutar posmatranog sloja, a treći i četvrti promene u koncentraciji izazvane vertikalnim i horizontalnim ne turbulentnim fluksevima (Aubinet et al., 2000).

Emisija. Emisija CO₂ i NO_x sa zemljišta unutar visoke vegetacije podleže istim fizičkim zakonima kao i emisija sa golog zemljišta (podpoglavlje 2.2.3). Razlika potiče od postojanja debelog sloja organske materije, stelje, na površini zemljišta koja pruža pogodno stanište za bakterije razlagачe i azotofiksatore. Stelja utiče i na transport toplote u dublje slojeve, te je razmena energije na površini prigušena, što doprinosi održanju atmosferske stabilnosti unutar biljnog sklopa i formiranje turbulentnog podsloja. Smanjena turbulentna aktivnost unutar biljnog sklopa otežava transport gasova generisanih unutar stelje i samo mali deo ukupne emisije NO_x izađe izvan biljnog sklopa. Pored pojačane produkcije NO pojačava se i respiracija zemljišta koja umanjuje ulogu biljaka u apsorpciji CO₂ (slika 2.6). Emitovani CO₂ apsorbuje se u najnižim slojevima biljnog sklopa, čime se smanjuje fluks iz atmosfere ka biljnom sklopu.



Slika 2.6 Srednje mesečne vrednosti profila koncentracije CO₂ unutar šumskog sklopa izmerene u vegetacionom periodu (jun, jul, avgust) na lokalitetu HF-EMS 2009–2013. godine.

Depozicija. Kao što je pokazano u podpoglavlju 2.2.3 suva depozicija predstavlja uklanjanje čestica i gasova iz glavne struje na kontaktnim površinama kao što su površina zemljišta, listovi biljaka, grane i ostale prepreke na koje vazduh nailazi prilikom prolaska kroz određenu sredinu. Fluks suve depozicije se izražava preko brzine suve depozicije kao suma svih otpora na koje turbulentni tok vazduha nailazi (Walcek et al., 1986; Russell et al., 1993; Wesely and Hicks, 2000). Turbulentni vrtlozi koji obavljaju transport između neke referentne visine i tla koje je prekriveno vegetacijom naići će na niz prepreka koje će proizvesti odgovarajuće otpore između 1) referentnog nivoa i biljnog sklopa (r_a), 2) unutar biljnog sklopa (r_b) i 3) od biljnog sklopa do tla (r_t) (opisan u podpoglavlju 2.2.3). Aerodinamički otpor je karakteristika turbulentnog transporta između referentne visine i laminarnog podsloja i zavisi od atmosfenske stabilnosti, visine hrapavosti i brzine vetra. Pored aerodinamičkih otpora u svakom od navedenih slojeva može da dodje do uklanjanja čestica i gasova u laminarni podsloj u kom se javlja otpor na molekularnu difuziju (r_d) u sloju debljine 0,1 do 0,01 cm i otpor na samoj površini na kojoj dolazi do hemijske, biološke ili fizičke interakcije (r_l). Otpornost molekularnoj difuziji zavisi od koeficijenta difuzije gasa, kao i viskoznosti, provodljivost, temperature i gustine vazduha.

Brzinu depozicije gasova odmah iznad lista ograničavaju otpor procesu deponovanja na površini lista, kutikuli izgrađenoj od voštanog jedinjenja kutina (r_{kuti}), otpor difuziji kroz stome (r_{stom}) i otpor procesu rastvaranja u tečnoj vodi unutar lista (r_{mezo}). Kutikula je relativno nepropusna za vodenu paru čime se onemogućava veliki gubitak vlage preko listova. Ugljen-dioksid zajedno sa ostalim jedinjenjima prolazi kroz kutikulu i kroz stome u mezofil do hloroplasta. Istim putem produkti fotosinteze O₂ i vodena para koja nije iskorišćena u fotosintezi zajedno sa svim ostalim gasovima

napuštaju unutrašnjost lista. Procesi razmene se odigravaju simultano. O načinu parametrizacije pojedinih otpora biće više reči u poglavlju 4.2.

2.3.5 Hemijski procesi

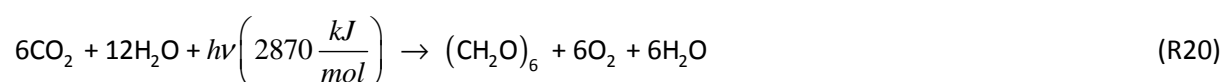
Intenzitet turbulencije unutar biljnog sklopa mnogo je manji nego iznad njega. U uslovima stabilne ili blago nestabilne stratifikacije vertikalni transport čestica i gasova je prigušen bez obzira na razlike u koncentracijama. Zadržavanje gasova unutar biljnog sklopa i oslabljeni procesi mešanja omogućavaju intenziviranje hemijskih reakcija gasne faze. Opisano stanje je karakteristično za guste šumske sklopove koji značajno ograničavaju količinu propuštene energije zračenja, smanjuju brzinu vetra i utiču na vlažnost.

Vazduh unutar biljnog sklopa predstavlja bogatu smešu pasivnih i hemijski aktivnih gasova produkovanih u zemljištu, od strane biljaka ili deponovanih iz atmosfere koja ga prekriva. Sa stanovišta produkcije i razlaganja NO_x najznačajnije su reakcije koje uključuju produkciju ozona (R18–R19).



Reakcija R19 je samo jedan od primera fotohemijskih reakcija koje se javljaju unutar biljnog sklopa, a čija efikasnost zavisi od količine energije dolaznog zračenja. U šumama sa gustom krošnjom vrlo je verovatno da će velika količina energije zračenja biti apsorbovana, u ekstremnim slučajevima i do 99 %. Tom prilikom će reakcija R18 biti pomerena u levu stranu i veća količina NO i O_3 će biti utrošena (R19). Razlog je i dnevna varijacija ciklusa koji dozvoljava uklanjanje ozona i u toku noći, jer za reakciju R19 nije neophodna energija zračenja. Opisani proces se uklapa u merenja koja su pokazala da su često fluksevi NO i O_3 iznad visoke vegetacije okrenuti ka vegetaciji, odnosno da šuma predstavlja ponor ove dve vrste, i da je koncentracija unutar biljnog sklopa manja nego koncentracija iznad njega, bez obzira što je zemljište značajan izvor NO.

Organski hemijski procesi - fotosinteza. Biljke imaju sposobnost usvajanja CO_2 iz atmosfere koji se koristi u kompleksnim hemijskim reakcijama obuhvaćenim terminom - fotosinteza. Fotosinteza je proces pretvaranja energija sunčevog zračenja u hemijsku energiju, pri čemu vodonik iz vode sa CO_2 iz atmosfere gradi makroenergetsko jedinjenje (glukozu $(\text{CH}_2\text{O})_n$, $n=6$), uz oslobađanje kiseonika, kao sporednog proizvoda. Oslobođeni kiseonik potiče iz molekula vode.

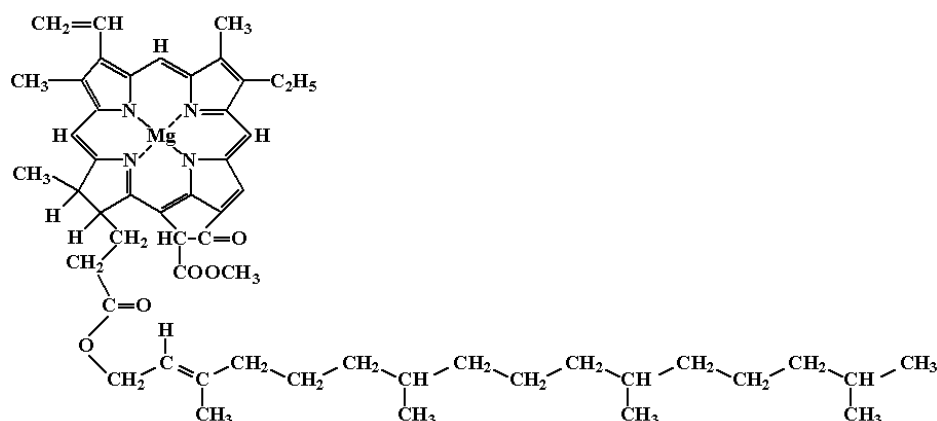


Sa biološkog stanovišta fotosinteza je proces korišćenja energije iz spoljašnje sredine i njeno skladištenje u vidu stabilnih organskih jedinjenja koja će potom služiti kao izvor energije za skoro sve energetske procese živog sveta planete. Sa hemijske strane proces fotosinteze predstavlja niz

reakcija oksidacije i redukcije. U procesu fotosinteze koristi se vidljivi deo spektra elektromagnetnog zračenja, označen kao fotosintetski aktivno zračenje (*photosynthetic active radiation* - PAR). Energija se koristi da bi elektrone pokretala „uzbrdo“ od molekula vode do slabog akceptora CO₂, gde akumulacijom energije nastaju energetska bogata jedinjenja – šećeri. Intenzitet fotosinteze predstavlja količinu usvojenog CO₂ ili odanog O₂ po jedinici lisne površine ili mase u jedinici vremena, a najčešće se izražava u μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ ili u mg CO₂ m⁻² h⁻¹. U svetu biljaka koje poseduju sposobnost fotosinteze, izvršena je podela na dve velike grupe, C3 biljke i C4 biljke. Broj u nazivu grupe zapravo predstavlja broj vezanih atoma ugljenika u primarnom organskom jedinjenju koje je produkt fotosinteze.

Proces fotosinteze se deli na dve faze: svetlosnu i tamnu. Za reakcije svetlosne faze, kao što joj i ime govori, potrebno je svetlo, a tamna faza, iako ne zahteva svetlo, zahteva produkte svetlosne faze. Svetlosna faza se odvija u tilakoidnim membranama hloroplasta za koju su vezani molekuli hlorofila (slika 2.7) i karotenoida. U okviru svetlosne faze odvija se transformacija svetlosne energije u hemijsku, fotoliza vode, sinteza ATP i NADPH. Tamna faza fotosinteze obuhvata fiksaciju CO₂ i njegovu redukciju pomoću proizvoda svetle faze, ATP i NADPH.

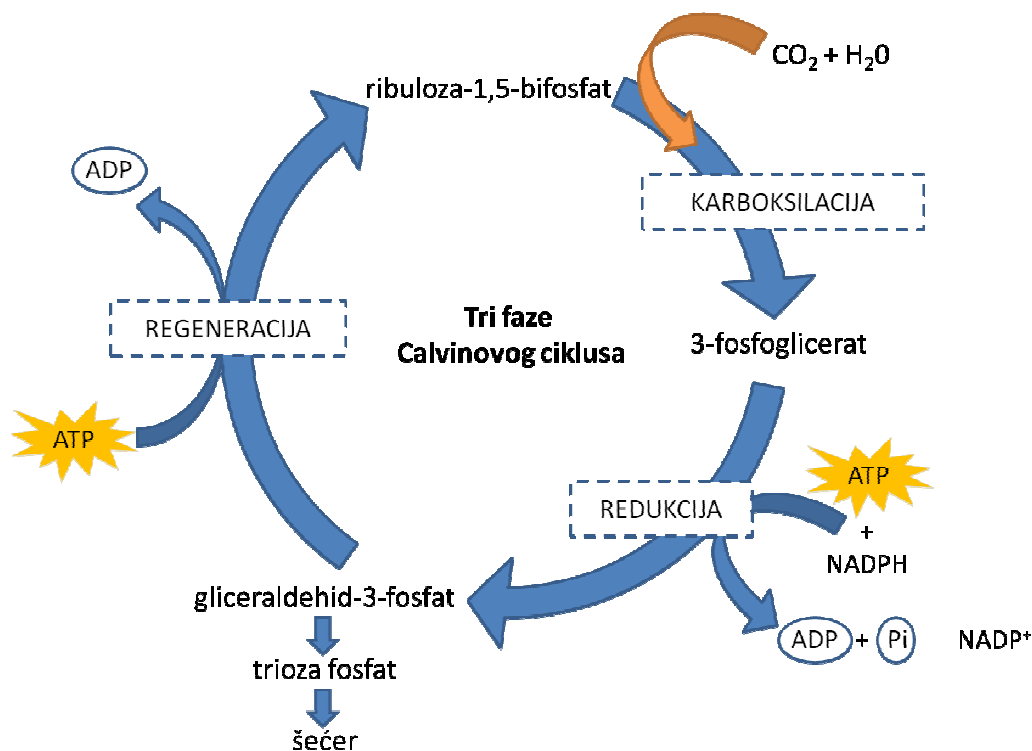
Spektar apsorpcije hlorofila ima dva maksimuma, jedan u plavom i jedan u crvenom delu spektra PAR. Elektromagnetni talasi talasnih dužina koje odgovaraju zelenoj i žutoj svetlosti uglavnom se reflektuju što rezultuje bojom hlorofila koja je plavo-zelena (hlorofil a) ili žuto-zelena (hlorofil b). Pigmenti su organizovani u dva fotosistema (PSI i PSII). Fotosistem čine antenski kompleks i reakcioni centar. Antenski kompleks predstavlja skup molekula pigmenata (karotenoida, hlorofila b i hlorofila a), vezanih za proteine tilakoidnih membrane, sa sposobnošću sakupljanja svetla i sprovođenja energije pobuđenog stanja, do reakcionog centra (hlorofil a vezan za specijalan protein) koji otpušta jedan elektron i započinje proces fotosinteze. Reakcioni centar fotosistema 1 (PSI) ima maksimum apsorpcije svetlosti talasne dužine 700 nm (P700), dok reakcioni centar fotosistema 2 (PSII) ima maksimum apsorpcije svetlosti na 680 nm (P680).



Slika 2.7 Molekul hlorofila a.

Pobuđeni molekuli pigmenata u antenskom kompleksu su vrlo nestabilni jer elektroni teže da se vrate u osnovno, niže energetska, stanje. Povratkom u osnovno stanje molekul oslobađa energiju koja se predaje susednom pigmentu, dok se deo gubi u obliku toplotne ili svetlosne energije.

Tamna faza fotosinteze odnosno Calvin-Bensonov (*Calvin-Benson*) ili samo Calvinov ciklus odvija se u stromi hloroplasta. Najvažniji enzim Calvinovog ciklusa je ribuloza-1,5-bifosfat-karboksilaza/oksigenaza (Rubisko), masivan protein koja katalizira vezivanje CO_2 i univerzalan je katalizator te reakcije u svim organizmima koji vrše fotosintezu. Prva faza Calvinovog ciklusa je faza karboksilacije u kojoj akceptor CO_2 , šećer sa pet ugljenikovih atoma, ribuloza-1,5-bifosfat (Ru-1,5-BP) u procesu karboksilacije gradi intermedijerno nestabilno jedinjenje koje se hidrolizom (primanjem vode) raspada na dva molekula 3-fosfoglicerinske kiseline. Ceo proces katališe enzim Rubisko. Sledi faza redukcije u kojoj se CO_2 , prethodno vezan u organsko jedinjenje, redukuje pomoću energije i atoma vodonika koji su produkti svetlosne faze fotosinteze (ATP, NADPH). Neposredni produkt redukcije ugljenika je gliceraldehid-3-fosfat (GAP). GAP se delimično transformiše u dihidroksi-acetn-3-fosfat (DHAP) sa kojim započinje poslednju fazu ciklusa. Poslednja faza Calvinovog ciklusa je regeneracija polaznog jedinjenja Ru-1,5-BP koja se odvija kroz niz hemijskih reakcija, a koju započinje kondenzacija GAP i DHAP (slika 2.8).



Slika 2.8 Tri faze Calvinovog ciklusa produkcije glukoze iz asimilovanog CO_2 .

Autotrofni organizmi, kao što su zelene biljke, iz šećera (glukoze) sintetizuju polisaharide, celulozu i skrob, kao i sve druge za sebe potrebne materije. Fotosinteza je osnovni proces koji doprinosi masovnoj proizvodnji organske materije na Zemlji. Usvajanje CO_2 odvija se preko složenog stomatarnog aparata koji dozvoljava transport gasova, između unutrašnjosti lista i vazduha koji ga okružuje, procesom difuzije. Kada se nađe u unutrašnjosti, CO_2 difunduje iz međućelijskog prostora u

ćelije u kojima se dalje koristi (slika 3.3). Ukoliko je stoma otvorena gradijent koncentracije između unutrašnjosti i spoljašnjosti omogućuje difuziju, ali će u transportu pored CO_2 biti transportovani i ostali gasovi, kao što su H_2O , NO_2 , O_3 . Difuzija gasova kroz otvorenu stomu povećava značaj modeliranja procesa fotosinteze ne samo sa aspekta usvajanja CO_2 nego i povezivanja intenziteta fotosinteze sa ciklusima ostalih gasova.

Azot je jedan od glavnih hranljivih materija neophodnih za sintezu proteina i neometan rast i razvoj biljaka. Glavni izvor azota za biljke je zemljište. Novija istraživanja su pokazala da biljka pored apsorpcije CO_2 iz vazduha usvaja i azotna jedinjenja. Eksperimenti u laboratorijskim uslovima i na terenu pokazali su relativno visok otpor difuziji NO i NO_2 kroz stome. Postojanje tačke kompenzacije daje graničnu vrednost koncentracija NO_2 iznad koje će list postati izvor NO_2 . Prolazak NO kroz stome je za red veličina manji od difuzije NO_2 , što ovaj proces čini veoma teškim za posmatranje (Neubert et al., 1993). Ipak usvajanje putem stoma nije jedini način da NO_x budu isključeni iz vazdušne struje. Drugi proces uklanjanja, za koji su odgovorne biljke, je depozicija na biljnim površinama na kojima se vrši hemijska transformacija u oblike rastvorljive u vodi, ukoliko je površina lista vlažna, ili samo skladištenje do momenta kad će ponovo biti emitovana usled pojačanog intenziteta vetra.

Faktori koji utiču na brzinu hemijske reakcije polutanata unutar biljnog sklopa.

Temperatura. Uticaj temperature na brzinu hemijske reakcije opisan je u podpoglavlju 2.2.3.

Intenzitet zračenja. Sunčevo zračenje veoma efikasno biva apsorbovano od strane biljnog pokrivača. Zračenje unutar biljnog sklopa interaguje sa biljkama u oba smera: a) biljke reaguju na promene u količini energije dospelog zračenja i menjaju tempo rasta, a b) promene u tempu rasta menjaju strukturu sklopa i utiču na količinu energije zračenja koja može da dospe od gornje granice sklopa do njegove unutrašnjosti. Merenja su pokazala da intenzitet zračenja eksponencijalno slabi unutar biljnog sklopa i da najviše zavisi od njegovih morfoloških karakteristika *LAI*-a, *LAD*-a i položaja listova (Brown et al., 1994). Raspodela zračenja unutar biljnog sklopa može značajno da utiče na hemijske procese koji se baziraju na fotohemijskim reakcijama. Kako su naglasili Volf i sar. (Wolfe et al., 2014) brzina reakcije R_2 značajno zavisi od gustine šumskog sklopa jer je od 3 do 6 puta manja nego brzina reakcije u uslovima bez limitiranja energije sunčevog zračenja. U jednačini 2.57 stopa fotohemijske konverzije zavisi od fluksa sunčevog zračenja u opsegu talasnih dužina koje spadaju u UV zračenje.

Energija koju nose zraci kratkih talasnih dužina dovoljna je za raskidanje veza u molekulu NO_2 (R_{18}). Unutar biljnog sklopa intenzitet direktnog sunčevog zračenja slabi dok prolazi kroz prostor ispunjen biljnom masom. Refleksija na listovima, granama, aerosolima doprinosi povećanju intenziteta difuznog zračenja koje pokreće do 85 % fotohemijskih reakcija unutar biljnog sklopa (Knohl and Baldocchi, 2008). Osetljivost fotohemijskih procesa, kako na raspodelu sunčevog zračenja unutar biljnog sklopa, tako i na direktno i difuzno zračenje, zahteva tačnu parametrizaciju profila zračenja. Nedostatak empirijskih formula za opisivanje profila UV zračenja unutar visoke vegetacije posledica je malog broja izvedenih eksperimenata. U modelima se, iz tog razloga, upotrebljava zavisnost brzine hemijske reakcije od intenziteta UV zračenja kao konstantna vrednost za dve visine. Dvoslojni model vrednost brzine reakcije fotolize ispod biljnog sklopa računa kao 5 % do 15 % od vrednosti dobijene iznad (Duyzer et al., 2005).

2.3.6 Vertikalna raspodela gustine biljnog sklopa

Cilj prethodnih poglavlja, pored detaljne analize pojedinačnih procesa, bio je i da se naglasi karakterističan uticaj biljnog sklopa na transport, produkciju i asimilaciju mase, energije i količine kretanja na tlu prekrivenom visokom vegetacijom. Uvođenje detaljnog opisa raspodele gustine biljne mase po visini prepoznato je od strane mnogih autora kao važan korak ka detaljnoj parametrizaciji površinskih procesa i jedan je od osnovnih karakteristika višeslojnih SVAT shema (Kramm et al., 1996; Treuhaft et al., 2002; Law et al., 2001; Lalic and Mihailovic, 2004). Nivo složenosti parametrizacije LAD je usko povezana sa izabranim modelom biljnog sklopa i pruža mogućnost „raslojavanja“ modela i prenosa informacija sa pojedinačnog lista na ceo biljni sklop, postupak u literaturi nazivn „skaliranje“ (Kotchenova et al., 2004). Studije su pokazale da realističan model biljnog sklopa koji u obzir uzima vertikalnu raspodelu gustine biljne mase može značajno smanjiti greške prilikom parametrizacije biofizičkih procesa (Drewry et al., 2010; Chen et al., 2012, Lalic et al., 2013). Problem inkorporacije modela biljnog sklopa sa $LAD(z)$ funkcijom nastao je zbog ograničenosti merenja na pojedinačne lokalitete (Treuhaft et al., 2002; Jupp et al., 2008; Hosoi et al., 2010) što je podstaklo pojavu različitih empirijskih modela za izračunavanje $LAD(z)$.

Prva i najjednostavnija formulacija koja se javlja u površinskim shemama, a koja proizilazi iz funkcionalne zavisnosti LAI i $LAD(z)$ je

$$LAI = \int_0^h LAD(z) dz \quad (2.76)$$

Najčešće se u modelima sreće pretpostavka o homogenom biljnom sklopu koja implicira konstantnu vrednost $LAD(z)$ ($LAD(z)=LAI/h$) i koja se često zamenjuje izrazom „kumulativan LAI “ (LAI_c) jer uzima u obzir da svaki sloj vegetacije, bilo da je u pitanju jedan (*big leaf*) ili više (višeslojni model) slojeva sadrže istu količinu biljne mase. Jednostavnost aproksimacije LAI_c iskorišćena je za skaliranje svih veličina (zračenja, fotosinteze, transpiracije) koje su karakteristične za lišće, ali se njihov efekat ogleda na celom biljnom sklopu. Ipak zanemarivanje vertikalne heterogenosti biljnog sklopa unelo je greške u parametrizaciju koje su bile veće od očekivanih.

Ostali empirijski modeli zasnivaju se na što boljem i fizički realističnom opisu funkcije $LAD(z)$. Trenutno u literaturi najzastupljenija su dva modela: 1) Teske&Tisle (Teske and Thistle, 2004) i 2) Lalić&Mihailović (Lalic and Mihailovic, 2004). Prvi profil dobijen je upotrebom oglednih podataka sa šesnaest lokaliteta i fitovanjem podataka na modifikovanu Vejbulovu (Weibull, 1951) raspodelu (u daljem tekstu $TT_{LAD(z)}$ model). Oblik modifikovane Vejbulove raspodele dao je oblik vertikalne distribucije lisne površine u obliku

$$\frac{LAI_k}{LAI_c} = \frac{1 - \exp \left[- \left(1 - \left(\frac{z_k}{h} \right) \right)^c \right]}{1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{b} \right)^c \right]}, \quad (2.77)$$

gde su h - visina vegetacije, z_k – visina na kojoj se računa nepoznati LAI_k (LAI na visini z_k), b i c su empirijski koeficijenti. Koeficijente b i c za različite tipove visoke vegetacije prikazali su Teske i Tisle (Teske and Thistle 2004).

Empirijski model predložen od strane Lalić i Mihailović (2004) baziran je na osmotrenoj prostornoj raspodeli biljne mase, lišća i grana (u daljem tekstu $LM_{LAD(z)}$ model). Parametri vegetacije uključeni u formiranje funkcije su visina biljnog sklopa (h), maksimalna gustina biljnog sklopa (L_m) i odgovarajuća visina (z_m). Uzimajući u obzir da je $L_m = LAD(z_m)$ funkcija $LM_{LAD(z)}$ zapisana je u obliku

$$LAD(z) = L_m \left(\frac{h - z_m}{h - z} \right)^n \exp \left\{ n \left[1 - \left(\frac{h - z_m}{h - z} \right) \right] \right\}. \quad (2.78)$$

Izbor ključnih parametara koji opisuju biljni sklop izveden je prema podacima već dostupnim u modelima životne sredine. Vrednost parametra n dobijena je metodom najmanjih kvadrata za podešavanje vrednosti parametara neke teorijske funkcionalne zavisnosti, na osnovu vrednosti $LAD(z)$ osmotrenih u različitim šumskim sklopovima, pri čemu se izračunava vrednost parametra n za koju je najmanja suma kvadrata odstupanja osmotrenih od izračunatih vrednosti

$$n = \begin{cases} 6 & 0 \leq z < z_m \\ 1/2 & z_m \leq z \leq h \end{cases}. \quad (2.79)$$

Vrednost L_m može da se odredi ili iz šumskih fenoloških kalendara ili na osnovu relacije (2.76) kada je poznata vrednost LAI za dati sklop. Verifikacija predloženog modela izvršena je na osmotrenim vrednostima profila lisne površine za četiri različite šume: borovoj (četiri seta podataka), brestovoj (jedan set podataka), hrastovoj (jedan set podataka) i javorovoj (četiri seta podataka) (Lalic and Mihailovic, 2004; Lalić, 2006).

3. MODELIRANJE TURBULENTNOG TRANSPORTA CO₂

3.1 Uvod

Stav da su klimatske promene ubrzane ili prouzrokovane povećanom koncentracijom GSB u atmosferi uveo je modeliranje procesa uklanjanja polutanata u sve aspekte modeliranja životne sredine. Na prvom mestu su simulacije budućeg stanja klime na koje se trenutno, pored ostalih, odvajaju i ogromni računarski resursi širom sveta. Prognoza odgovora ekosistema na klimatske promene spregnuta je sa samom pojavom klimatskih promena. Najkarakterističniji primer povratne sprege između klimatskih promena i odgovora ekosistema je planetarni ciklus CO₂. Povećana koncentracija CO₂ u atmosferi rezultovala je povećanjem intenziteta fotosinteze kod mnogih biljnih vrsta, jer je u početku delovala kao svojevrsno atmosfersko đubrivo. Povećan intenzitet procesa fotosinteze doveo je do povećanja produkcije biljne mase. Na kraju životnog veka biljka se suši i svoju organsku materiju predaje zemljištu ili sagoreva u šumskim požarima. Organsku materiju razgrađuju mikroorganizmi u zemljištu i procesom respiracije CO₂ biva oslobođen u atmosferu, posle čega se ciklus ponavlja. Prema tome, biljke su svojim rastom odgovorile na porast koncentracije CO₂, povećanom produkcijom biljne mase, posebno u šumama koje su najveće skladište organske materije na kopnu. Međutim, odgovor šuma na povećanu koncentraciju CO₂ uneo je promene u prirodnom balansu, a njegov uticaj na globalni ciklus CO₂ još uvek je nepoznat. Poznavanje složenih povratnih sprega između klime i ekosistema pruža kvalitetnu informaciju o toku promene globalne klime.

Proces usvajanja atmosferskog CO₂ odvija se na tlu isto kao i najveći procenat antropogene produkcije, te i modeliranje turbulentnog fluksa CO₂ treba da počne na tlu. Prvi korak je sagledavanje osnovnih procesa produkcije i degradacije jedinjenja na površini. Posle utvrđivanja prirode procesa pristupa se numeričkom modeliranju. Turbulentni transport CO₂ u ruralnoj sredini karakteriše proces usvajanja gasa od strane biljaka i proces produkcije CO₂ radom mikroorganizama u zemljištu. U ovoj glavi biće opisani postupci u modeliranju turbulentnog fluksa CO₂ i procesa koji na njega utiču.

3.2 Modeliranje razmene CO₂ na listu

3.2.1 Modeliranje procesa fotosinteze

Fotosinteza zelenih biljaka je najbrži i najefikasniji proces uklanjanja CO₂ iz atmosfere. Pioniri u modeliranju procesa fotosinteze Seki (Saeki, 1960), de Wit (de Wit, 1965) i Duncan i sar. (Duncan et al. 1967) prvu empirijsku vezu pronašli su u veoma očiglednom iskustvenom primeru, da je za odvijanje procesa potrebna energija sunčevog zračenja. Prema tome, bilo je neophodno pronaći matematičku zavisnost između izmerenog intenziteta fotosinteze i intenziteta zračenja. Biohemijska istraživanja na ćelijskom nivou pokazala su uticaj enzimski kataliziranih hemijskih reakcija i koncentracije CO₂ u unutrašnjosti lista na intenzitet fotosinteze. Detaljan opis procesa na molekularnom nivou dozvolio je modeliranje zajedničkog uticaja ključnih parametara temperature, koncentracije CO₂, intenziteta zračenja i fizioloških osobina biljke na efikasnost odvijanja procesa fotosinteze.

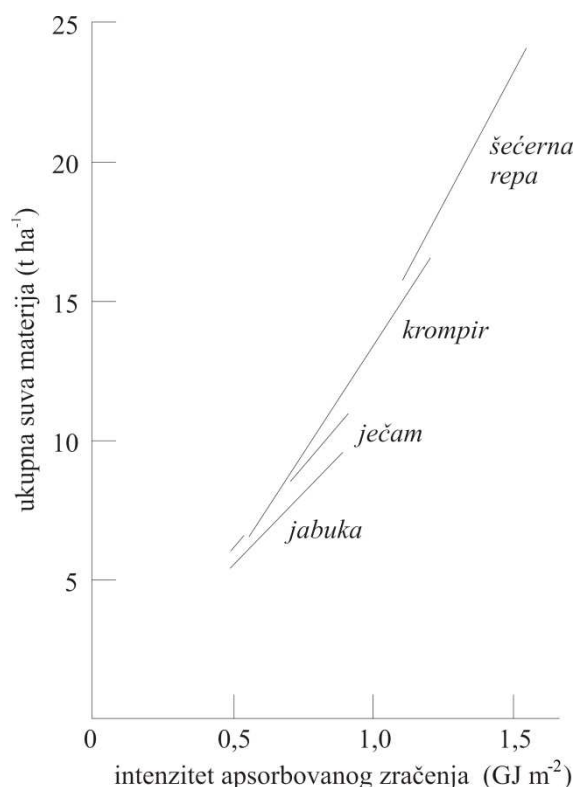
Razvoj modeliranja procesa fotosinteze odvijao se u dva pravca: empirijskom i biohemijskom. Empirijski modeli su razvijeni na osnovu osmotrenih vrednosti intenziteta asimilacije CO₂ i uticaja spoljašnjih faktora (intenziteta zračenja, temperature, koncentracije CO₂) na izvršavanje procesa. Biohemijski modeli su pošli od detaljne analize hemijskih reakcija fotosinteza, da bi došli do količine CO₂, intenziteta zračenja, temperature i vlažnosti potrebne za odigravanje procesa.

Jedan od prvih modela, čiji cilj je bio proračun intenziteta fotosinteze preko direktne veze između asimilacije CO₂ i produkcije biljne mase, razvio je Montit (Monteith, 1977). Eksperiment koji je sproveo Montit pokazao je snažnu zavisnost između intenziteta zračenja i rasta i razvoja biljke, u ovom slučaju poljoprivrednih kultura. Rezultati eksperimenta prikazani na slici 3.1 pokazuju linearnu vezu između produkovane suve organske materije i intenziteta zračenja u optimalnim uslovima.

Montitov model proistekao je iz slike 3.1, odnosno linearne zavisnosti između produkcije suve organske materije i intenziteta zračenja

$$A_{n,biljni\ sklop} = eF_t f_s, \quad (3.1)$$

gde je F_t ukupan intenzitet zračenja koji je dospao na gornju granicu biljnog sklopa za fiksni vremenski period od jednog dana, f_s - deo zračenja koji je apsorbovan od strane biljaka i e - koeficijent efikasnosti konverzije. Koeficijent efikasnosti konverzije je fleksibilna veličina i može biti izražen u odnosu na deo zračenja koje je apsorbovano ili propušteno, dok se kvantitativna mera dolaznog zračenja izražava u obliku intenziteta dolaznog kratkotalsnog ili fotosintetski aktivnog zračenja, a intenzitet asimilacije preko koncentracije CO₂ ili produkcije suve materije. Nedostatak Montitovog modela, pored veoma jednostavne i praktične formulacije, je ograničenje u vremenskoj skali odnosno nemogućnosti da prikaže zavisnost na dnevnom nivou, pa se danas koristi samo za mesečne, sezonske ili godišnje prognoze. Pored toga, ukoliko se koristi za modeliranje razmene CO₂ između biosfere i atmosfere, model daje veće vrednosti NEE jer ne uključuje proces fotorespiracije.



Slika 3.1 Rezultati Montitovog eksperimenta.
Zavisnost produkcije biljne mase od intenziteta apsorbiranog zračenja (Monteith, 1977).

Sledeći jednostavan model za parametrizaciju fotosinteze proistekao je iz difuzije gasova sa površine lista kroz stome u unutrašnjost lista. Analogno Omovom zakonu, difuzioni transport je srazmeran promeni koncentracije posmatranog gasa između površine lista i njegove unutrašnjosti i provodnosti (odnosno otpornosti) sredine za transport gasa. Prema tome, asimilacija CO₂ može se izraziti u obliku

$$A_{n,list} = g_c (C_a - C_i), \quad (3.2)$$

gde je $A_{n,list}$ - neto asimilacija CO₂ na nivou lista, g_c provodnost CO₂ kroz površinski sloj i stomu, C_a - koncentracija CO₂ u okolnom vazduhu, a C_i - koncentracija CO₂ unutar lista u vazduhu koji ispunjava intercelularni prostor. Jedan od osnovnih problema sa kojim se srećemo prilikom primene Omovog zakona jeste da on ne važi u dve različite sredine. Prema tome ovaj model može da opiše samo transport CO₂ iz vazduha izvan lista u vazduh koji ispunjava međucelijski prostor unutar lista. Vong i sar. (Wong et al., 1979) pokazali su da se koncentracija unutar lista u toku dana održava na relativno konstantnom nivou, i to na 280 ppm kod C3 biljaka i 130 ppm kod C4 biljaka. Razmena gasova kroz stomu ne odvija se u jednom pravcu. Stome su samo otvori na listu i ne poseduju mehanizam selektivne propustljivosti, što znači da se pri difuziji CO₂ odvija i difuzija svih ostalih gasova u oba pravca. Posledica ove pojave je proces transpiracije, isparavanja vode iz unutrašnjosti listova, koja se odvija svaki put kada su stome otvorene. Dakle, da bi biljka mogla da izvrši proces fotosinteze, odnosno da apsorbuje molekule CO₂ ona mora izgubiti neku količinu vode. Iz jednačine 3.2, može se izraziti odnos između asimilacije ($A_{n,list}$) i transpiracije (E_{list}) u obliku

$$\frac{A_{n,list}}{E_{list}} = \frac{g_s}{g_v} \frac{p_a (C_a - C_i)}{(e_s^* - e_a)}, \quad (3.3)$$

gde je p_a - atmosferski pritisak, g_s - difuziona provodnost CO₂ kroz stomu, g_v - difuziona provodnost vodene pare kroz stomu, e_s^* i e_a - saturacioni pritisak vodene pare unutar lista i pritisak vodene pare izvan lista, redom. Odnos između g_s/g_v varira u opsegu između 0,66–0,75 (Campbell and Norman, 1998). S obzirom na to što je transport delom difuzioni a delom konvektivni najčešće se uzima srednja vrednost za odnos g_s/g_v od 0,70. Ako se list nalazi u termodinamičkoj ravnoteži sa okolnim vazduhom onda se deficit pritiska vodene pare između vazduha i lista ($e_s^* - e_a$) može aproksimirati deficitom zasićenosti vazduha ($D_a = E_a^* - e_a$), jer je $e_s^* = E_a^*$, gde je E_a^* saturacioni pritisak vodene pare izvan lista. Prema tome jednačina 3.3 može se izraziti u jednostavnijem obliku

$$A_{n,list} = \frac{k_c E_{list}}{D_a}, \quad (3.4)$$

gde je $k_c = 0,7 p_a(C_a - C_i)$. Tarner i Sinkler (Tanner and Sinclair, 1983) su pokazali da se neto asimilacija na listu i biljnom sklopu razlikuje samo po vrednosti koeficijenta k_c .

Napredak u parametrizaciji i prognozi fluksa CO₂, odnosno GPP, napravili su Farkvar i sar. (Farquhar et al., 1980) razvijanjem modela fotosinteze baziranog na poznatim biohemijskim karakteristikama Rubiska (pogledaj podpoglavlje 2.3.5) i potrebne energije, pretvorene u NADPH i ATP, za asimilaciju CO₂ (FvCB model u daljem tekstu). Iako je model razvijen još 1980. godine, od tada je prošao kroz veliki broj različitih ekofizioloških testova i unapređivanja i danas je našao mesto u svakoj studiji koja za cilj ima praćenje NEE i uticaja okoline na njegove promene. Model predstavlja elegantnu vezu između osnovnih biohemijskih principa fotosinteze i fiziologije lista u kom se proces odvija.

Neto asimilacija CO₂ (A_n) je rezultat nivoa karboksilacije (V_c) umanjene za nivo fotorespiracije i drugih respiratornih procesa. U procesu fotorespiracije jedan molekul CO₂ je produkovan na svake dve reakcije oksigeneze (V_o). Prema tome A_n se može izraziti u obliku

$$A_n = V_c - 0,5V_o - R_{dan} \quad (3.5)$$

gde R_{dan} predstavlja gubitak apsorbovanog CO₂ u procesu fotorespiracije. Reakcije karboksilacije i oksigeneze su enzimski indukovane, te se za modeliranje efikasnosti procesa koristi Mihaels-Mentenina (*Michaelis-Menten*) kinetika. Efektivna Mihaels-Mentenina konstanta (K_m), koja numerički izražava afinitet enzima prema supstratu i koja u obzir uzima kompetitivnu inhibiciju O₂ kada su oba supstrata prisutna, za reakciju karboksilacije i oksigeneze može da se napise u obliku

$$K_m = K_{car} \left(1 + \frac{[O_2]}{K_o} \right), \quad (3.6)$$

gde su K_{car} i K_o - Mihaels-Mentenine konstante za reakcije karboksilacije i oksigeneze, redom, a $[O_2]$ - koncentracija kiseonika u vazduhu. Zavisnost K_{car} i K_o od temperature lista (T_f) se prema (Farquhar et al., 1980) opisuje funkcijama

$$K_{car} = 30 \cdot 2,1 \frac{(T_f - 298)}{10}, \quad (3.7)$$

$$K_o = 3 \cdot 10^4 \cdot 1,2 \frac{(T_f - 298)}{10}. \quad (3.8)$$

Stopa karboksilacije može se napisati u obliku

$$V_c = \frac{V_{cmax} C_c}{C_c + K_m}, \quad (3.9)$$

gde su V_{cmax} – visina asimilacije prilikom saturacione koncentracije CO_2 C_c , odnosno maksimalna vrednost karboksilacije pri datim uslovima (Farquhar et al., 1980). Odnos reakcija karboksilacije i oksigeneze zavisi od afiniteta Rubiska prema odnosu CO_2 i O_2 koja varira između različitih biljnih vrsta (von Caemmerer, 2000). Promena temperature smanjuje afinitet, jer se K_o smanjuje brže sa povećanjem temperature nego K_c .

Tačka kompenzacije CO_2 u odsustvu fotorespiracije (Γ^*) zavisi od afiniteta Rubiska prema CO_2 u odnosu na O_2 ($S_{c/o}$), koncentracije O_2 (izražene kao parcijalni pritisak O_2) i temperature. Rastvorljivost CO_2 u vodi opada brže od rastvorljivosti O_2 , porastom temperature (Lambers et al., 2008)

$$\Gamma^* = \frac{0,5[O_2]}{S_{c/o}}. \quad (3.10)$$

Parametar Γ^* se koristi za izračunavanje odnosa karboksilacije i oksigeneze (V_o) koji zavisi od koncentracije CO_2 unutar lista

$$\frac{V_c}{V_o} = \frac{2\Gamma^*}{C_c}. \quad (3.11)$$

Kada intenzitet fotosinteze postane zavistan od RuBP, stopa transporta elektrona u elektron-transportnom lancu je konstantna (J). Povećana saturaciona koncentracija CO_2 povećava efikasnost reakcije karboksilacije na račun reakcije oksigeneze. Postoji minimum elektrona koji moraju biti transportovani da bi do reakcija došlo, a to su četiri elektrona za svaku reakciju karboksilacije i za svaku reakciju oksigeneze. Prema tome, minimalna stopa elektrontransporta može se zapisati u sledećem obliku

$$J = 4(V_c + V_o). \quad (3.12)$$

Ukoliko list apsorbuje optimalnu količinu energije zračenja J je limitirano kapacitetom elektron-transportnog lanca i tada se nalazi na maksimumu J_{max} (slika 3.2). Upotrebom jednačine 3.11 i 3.12 stopa karboksilacije može se izračunati

$$V_c = \frac{J}{4 \left(1 + \frac{2\Gamma^*}{C_c} \right)}. \quad (3.13)$$

Proces fotosinteze limitiran procesom usvajanja CO₂ i saturacije RuBP (A_c) možemo predstaviti preko jednačina 3.6, 3.9 i 3.13 za C3 i C4 biljke (Farquhar et al., 1980, Collatz et al., 1992)

$$A_c = \begin{cases} \frac{V_{c\max} (C_c + \Gamma^*)}{C_c + K_m}, & C3 \\ V_{c\max}, & C4 \end{cases} \quad (3.14)$$

Proces fotosinteze limitiran od strane RuBP (A_j) izražava se preko jednačina 3.10, 3.12 i 3.13 (Farquhar et al., 1980, Collatz et al., 1992)

$$A_j = \begin{cases} \frac{J(C_c - \Gamma^*)}{4(C_c - 2\Gamma^*)}, & C3 \\ J, & C4 \end{cases} \quad (3.15)$$

Dodatno ograničenje procesu fotosinteze proizilazi iz teorije o prenosu produkata procesa fotosinteze sa mesta nastanka na mesto korišćenja (Farquhar et al., 1980, Collatz et al., 1992)

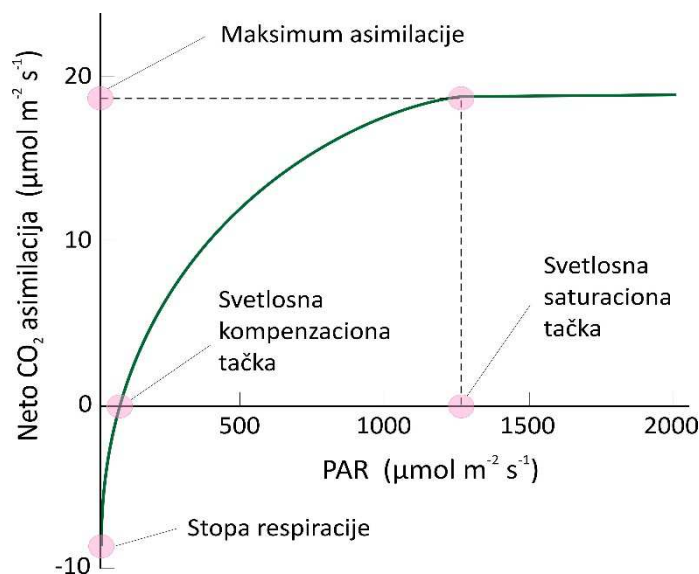
$$A_s = \begin{cases} 0,5 V_c, & C3 \\ 2 \cdot 10^4 V_c \frac{C_i}{p}, & C4 \end{cases} \quad (3.16)$$

Spoljni faktori koji limitiraju fotosintezu kao što su: intenzitet zračenja, temperatura i količina CO₂ preneseni su u ograničenja na biohemijskom i fiziološkom nivou, te se ukupna asimilacija (A) može izraziti kao

$$A = \min(A_c, A_j, A_s). \quad (3.17)$$

Grafički prikaz zavisnosti intenziteta fotosinteze od gustine fluksa fotosintetski aktivnog zračenja, sa obeleženim limitirajućim faktorima, predstavljena je na slici 3.2. Prikazana neto asimilacija je dobijena kao razlika između ukupnog intenziteta fotosinteze i intenziteta fotorespiracije

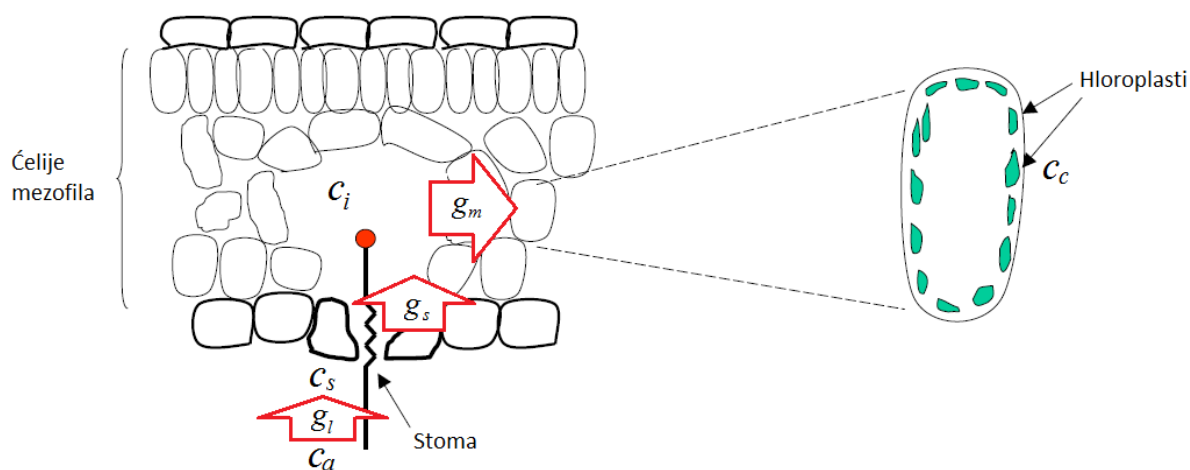
$$A_n = A - R_{dan}. \quad (3.18)$$



Slika 3.2 Zavisnost neto asimilacije CO₂ (intenziteta fotosinteze) od gustine fluksa PAR-a.

3.2.2 Snabdevanje lista ugljen-dioksidom

Ugljen-dioksid procesom difuzije prelazi iz atmosferskog vazduha u unutrašnjost lista, kroz otvorenu stomu. Unutrašnji prostor lista, mezofil, ispunjen je hloroplastima u kojima se vrši proces fotosinteze, pa se iz mezofila molekuli CO₂ upućuju ka njima. Iz prethodnog podpoglavlja vidi se da je za pravilno modeliranje neto asimilacije neophodna vrednost koncentracije CO₂ unutar hloroplasta.



Slika 3.3 Grafički prikaz mezofila lista sa stomom i odgovarajućim koncentracijama i transportima.

Transport CO₂ između mezofila i hloroplasta može da se opiše, kao i u slučaju transporta između površine lista i mezofila, preko razlike koncentracije gasa na ova dva mesta i provodnosti (otpornosti) sredine za ovaj transport u obliku

$$A = \frac{C_c - C_i}{r_m} = g_m (C_c - C_i), \quad (3.19)$$

gde r_m , odnosno njegova recipročna vrednost g_m , predstavlja provodnost CO₂ u mezofilu. U praksi se ovaj korak često zanemaruje zbog vrednosti g_m koja je nepoznata u velikom broju slučajeva, pa se koncentracija CO₂ unutar lista (C_i) izjednačava sa koncentracijom unutar hloroplasta (C_c). U ravnotežnom stanju intenzitetu asimilacije odgovara efikasnost procesa difuzije kroz stome

$$A = \frac{C_i - C_s}{r_s} = g_s (C_i - C_s), \quad (3.20)$$

gde r_s , odnosno njegova recipročna vrednost g_s , predstavlja provodnost CO₂ kroz stome, a C_s – koncentracija CO₂ na površini lista.

Podsetimo se na ovom mestu da, na putu do stoma, CO₂ prolazi kroz laminarni podsloj atmosfere u kome je dominantan mehanizam transporta turbulentna difuzija. Uvedena analogija sa Omovim zakonom daje nam mogućnost da sve otpore koji se javljaju na putu CO₂ od atmosfere do unutrašnjosti lista predstavimo kao redno vezane. Tada je moguće, kao u slučaju redne veze električnog otpora, rezultujući otpor transportu CO₂ između atmosfere i unutrašnjosti biljke (r_l) izračunati kao algebarski zbir svih otpora ($r_l = r_x + r_y + \dots$). Ako nam je poznata koncentracija na mestu gde se vrši proces karboksilacije jednačina 3.20 može se napisati u opštem obliku

$$A = \frac{C_i - C_a}{r_a} = g_a (C_i - C_a), \quad (3.21)$$

gde r_a , odnosno njegova recipročna vrednost g_a , predstavlja difuzivnu otpornost, odnosno provodnost, CO₂ između atmosfere i lista. Proces transpiracije, koji se odigrava istovremeno sa procesom asimilacije CO₂, može poslužiti za smanjivanje broja nepoznatih u sistemu jednačina. Intenzitet transpiracije (E) može da se napiše u obliku

$$E = \frac{w_i - w_a}{r_w} = g_w (w_i - w_a) \quad (3.22)$$

gde su: w_i i w_a – koncentracija vodene pare unutar lista i u vazduhu, redom, r_w difuziona otpornost lista za vodenu paru, g_w – difuziona provodnost lista za vodenu paru. Difuziona otpornost za transport vodene pare od lista do vazduha u atmosferi može se zapisati kao suma aerodinamičkog otpora (r_a), rezultujućim otporom vegetacije (r_b) i stomatarnog otpora (r_s)

$$r_w = r_a + r_b + r_s = \frac{1}{g_a} + \frac{1}{g_b} + \frac{1}{g_s}. \quad (3.23)$$

Poznavajući intenzitet transpiracije i uzimajući u obzir da je odnos koeficijenata difuzije molekula (D) CO₂ i vodene pare unutar lista, $D_{CO_2} / D_{H_2O} = 1,6$, i da se isti odnos može izraziti i za koeficijente difuzije na površini lista $D_{CO_2} / D_{H_2O} = 1,37$, stomatarni otpor difuzije CO₂ dobijamo (Lambers et al., 2008)

$$r_c = 1,6r_s + 1,37r_a = \frac{1}{g_c}. \quad (3.24)$$

Korišćenjem jednačine 3.24 FvCB modela, opisanog jednačinama 3.6–3.17, i izjednačavanjem koncentracije CO₂ unutar lista i unutar hloroplasta, može se izračunati koncentracija CO₂ unutar lista. U mnogim slučajevima vrednost stomaterne provodnosti je značajno niža od vrednosti gasova u površinskom sloju (dostiže vrednost od 10 mol m⁻² s⁻¹ pri brzini vetra od 5 m s⁻¹, dok je vrednost g_s u optimalnim uslovima, sa velikom gustinom stoma na listu koje su potpuno otvorene 1 mol m⁻² s⁻¹). Prema tome, stomaterna provodnost značajno utiče na difuziju CO₂ u unutrašnjost lista. Međutim, ukoliko je vlažnost vazduha unutar biljnog sklopa, koji karakteriše velika lisna površina, visoka i ukoliko je vertikalni turbulentni transport minimalan situacija će biti obrnuta (Lambers et al., 2008).

3.2.3 Otpornost stoma na difuziju CO₂

Modeliranje stomatarnog otpora zastupljeno je u različitim atmosferskim, biohemijskim i modelima životne sredine, što je dovelo do razvoja širokog spektra različitih modela. Međutim, postoje tri opšte prihvaćena pristupa u modeliranju stomatarnog otpora. Prvi pristup bazira se na multiplikativnim algoritmima kojima se podešava vrednost otpora prema uslovima sredine. Drugi pristup povezuje otpor sa transpiracijom, dok ga treći skalira prema intenzitetu fotosinteze. U daljem tekstu opisana su tri najprisutnija algoritma Džarvisov (*Jarvis*), Bol&Berijev (*Ball&Berry*) i Veslijev (*Wesely*) koji oslikavaju različite pristupe modeliranju.

Džarvisov algoritam (Jarvis, 1976) je jedan od najčešće korišćenih multiplikativnih modela koji je pronašao svoje mesto u atmosferskim i klimatskim modelima (Sellers et al., 1997a; Mihailovic, 1996) kao i u modelima suve depozicije gasova (Baldocchi et al., 1987; Niyogi et al., 2003). Korekcije u algoritmu za upotrebu u atmosferskim modelima većih razmera napravili su Nolan i Planton (Noilhan and Planton, 1989). Model uzima u obzir uticaj meteoroloških elemenata (temperatura, vlažnost vazduha, intenzitet zračenja i vlaga u zemljištu) na vrednost stomatarnog otpora u obliku

$$r_s = \frac{r_{s\min}}{LAI} \frac{F_1}{F_2 F_3 F_4}, \quad (3.25)$$

gde su $r_{s\min}$ – minimalna vrednost otpora stoma karakteristična za posmatranu biljnu vrstu dobijena eksperimentalno, a F_1 , F_2 , F_3 i F_4 predstavljaju funkcije zavisnosti otpora od spoljašnjih faktora sredine. Zavisnost r_s od intenziteta zračenja izražena je u obliku

$$F_1 = \frac{1+f}{f + \frac{r_{s,\min}}{r_{s,\max}}} \quad \text{kada je funkcija } f = 0,55 \frac{I_n}{I_{nl}} \frac{2}{LAI}, \quad (3.26)$$

gde je I_n - intenzitet zračenja iznad biljnog sklopa, a I_{nl} - intenzitet zračenja koji je potreban da bi započeo proces fotosinteze i obično uzima vrednost od 100 W m⁻². Za maksimum otpora najčešće se koristi konstantna vrednost od 5000 s m⁻¹ (Noilhan and Planton, 1989). Funkcija F_2 koja uključuje uticaj vlažnosti zemljišta može da se napiše u obliku,

$$F_2 = \begin{cases} 1, & w_2 > 0,75w_s \\ \frac{w_2 - w_{ve}}{0,75w_s - w_{ve}}, & w_{ve} \leq w_2 < 0,75w_s \\ 0, & w_2 < w_{ve} \end{cases}, \quad (3.27)$$

gde je w_{ve} - tačka venjenja, w_s - tačka saturacije (maksimalna vrednost zapreminske vlažnosti zemljišta), a w_2 - količina vode na dubini od 1 m. Funkcije F_3 i F_4 izražavaju zavisnost stomatarnog otpora od vlažnosti vazduha preko deficita vodene pare D_a i temperature vazduha na referentnom nivou T_r , redom

$$F_3 = 1 - 0,025D_a, \quad (3.28)$$

$$F_4 = 1 - 0,0016(298 - T_r)^2. \quad (3.29)$$

Bol&Beri algoritam (Ball et al., 1987) nastao je posle objavljivanja testova koji su ukazali na snažnu funkcionalnu zavisnost između intenziteta fotosinteze i stomatarnog otpora (Wong et al., 1979). Testovi su potvrdili da se stome otvaraju i zatvaraju da bi se održala konstantna razlika u koncentraciji CO₂ unutar i izvan mezofila u iznosu od približno $C_i = 0,7 C_a$. U kasnijim istraživanjima, pretpostavka o konačnoj razlici u koncentracijama iskorišćena je za formulisanje novog modela stomatarnog otpora (Ball et al., 1987; Leuning, 1990; Collatz et al., 1991). Model difuzionog otpora stoma je povezao intenzitet fotosinteze (A), relativnu vlažnost vazduha (r_h) i koncentraciju CO₂ na površini lista (C_s)

$$g_s = \frac{mAr_h}{C_s} + g_0, \quad \text{gde je } r_s = \frac{1}{g_s}, \quad (3.30)$$

gde je m – bezdimenzioni koeficijent koji je određen na osnovu laboratorijskih eksperimenata i za C3 biljke iznosi 9, g_0 – vrednost provodnosti, kada je intenzitet fotosinteze A jednak nuli, za C3 biljke je 0,01 m s⁻¹ (Ball et al., 1987; Sellers et al., 1992).

Vesli (Wesely, 1989) je predložio funkciju zavisnosti stomatarnog otpora na difuziju od temperature i intenziteta procesa transpiracije u obliku

$$r_{s,X} = r_{s,\min} \left\{ 1 + \left[\frac{1}{200(I - 0,1)} \right]^2 \right\} \frac{400}{T_l(40 - T_l)} \frac{D_{H_2O}}{D_X} \quad (3.31)$$

gde je $r_{s,\min}$ – minimalna vrednost stomatarnog otpora na difuziju gasa X (s m⁻¹), I – intenzitet zračenja (W m⁻²), parametar koji se oduzima 0,1 W m⁻², T_l – temperatura vazduha na površini lista (°C), izraz važi za opseg temperatura od 0°C do 40°C, D_{H_2O} - koeficijent molekularne difuzije vodene pare u vazduhu, D_X - koeficijent molekularne difuzije gasa X u vazduhu. Ukoliko se temperatura vazduha na površini nalazi izvan zadatog opsega, s obzirom da tada izraz postaje negativan, za $r_{s,X}$ se uzima velika vrednost, najčešće 5000 s m⁻¹ koja će isključiti proces difuzije kroz stome.

3.2.4 Modeliranje procesa respiracije zemljišta

Velike razlike u fizičkim i hemijskim karakteristikama zemljišta uslovile su razvoj „*site specific*“ algoritama, tj. algoritama koji koriste osmotrene vrednost fluksa CO₂ u toku noći i vrednosti parametara kojima se opisuje trenutno stanje zemljišta (klasa, tekstura, vlažnost), za regresionu analizu i kalibraciju osmotrenih vrednosti u funkciji temperature (Fang and Moncrieff, 2001; del Grosso et al., 2005; Tuomia et al., 2008). Problem kod upotrebe algoritama je njihova ograničenost na jedan lokalitet ili na prostor koji poseduje približno iste fizičko-hemijske karakteristike zemljišta (sadržaj organske materije u zemlji, vlaga i temperatura) u istim klimatskim uslovima. Pored toga, problem nastaje ukoliko ne postoji dovoljno dugačak niz podataka koji može da se iskoristi za formiranje funkcije i ukoliko ovakav princip računanja respiracije zemljišta treba iskoristiti u modelu većih razmera.

U praksi se najčešće koristi empirijski model koju su razvili Lojd i Tejlor (Lloyd and Taylor, 1994) na osnovu velikog broja osmatranja i uzimajući u obzir biohemijske osnove procesa respiracije. Funkciju, koja predstavlja zavisnost između temperature zemljišta i intenziteta respiracije, predložili su u obliku

$$R_{eco} = R_{ref} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{obs} - T_0} \right)}, \quad (3.32)$$

gde je R_{ref} nivo respiracije na referentnoj temperaturi (T_{ref}) za koju se najčešće uzima 10°C, E_0 – temperaturna osetljivost (°C), T_{obs} - osmotrena temperatura zemljišta, a T_0 - parametar koji uzima vrednost -46.02°C. Osmotreni podaci omogućuju da se koeficijenti R_{ref} i E_0 izraze nelinearnom regresionom analizom za različite sezone. Iako je proces dobijanja koeficijenata R_{ref} i E_0 isti kao i kod *site specific* algoritama, analize su pokazale da se može primeniti na širem prostornom razmeru sa varirajućim vrednostima parametara zemljišta uz manje greške u simulaciji (Portner et al., 2010).

3.3 Modeliranje turbulentnog fluksa CO₂ na nivou biljnog sklopa

Razmena gasova unutar biljnog sklopa odvija se na nivou lisne površine. Jedan od ključnih zadataka modeliranja fluksa CO₂ između atmosfere i biosfere je adekvatan opis veličina karakterističnih za male razmere na velikim prostornim i vremenskim razmerima. Primarni cilj skaliranja, u kontekstu interakcije vegetacije i atmosfere, je da pruži pouzdanu proceduru za računanje veličine od interesa na nivou biljnog sklopa preko veličina izračunatih na nivou lista. Prvi korak u postupku skaliranja je identifikacija procesa od kojih tražena veličina zavisi, jednako na osnovnom i na višem nivou, i da se odredi prostorna mera za površinu na kojoj se posmatrani proces odvija.

Fotosinteza je proces karakterističan za ćelije lista, a potrebna informacija je, recimo, koliko jedno drvo ili šumski sklop apsorbuje CO₂ u toku jednog dana, sezone ili godine. Zato se proces

fotosinteze mora predstaviti na nivou biljnog sklopa, odnosno za svo lišće posmatranog biljnog sklopa. Iz toga proizilazi da tačnost opisa strukture biljnog sklopa igra značajnu ulogu u proceni NEE.

3.3.1 Osnovni postupak skaliranja turbulentnog fluksa CO₂

Najjednostavniji princip skaliranja javlja se u shemama velikog lista u kojima je biljni sklop predstavljen bez strukture, zanemarljive visine i u obliku jednog lista koji prekriva tlo. Zbog ograničenog modela biljnog sklopa, razmena gasova računata na nivou lista predstavlja se jednostavnim množenjem intenziteta razmene sa površinom na kojoj se razmena odigrava, odnosno sa *LAI* (Friend, 2001). Kod složenijih višeslojnih modela biljnog sklopa princip skaliranja ostaje isti, ali se ponavlja onoliko puta koliko je slojeva vegetacije u kojima se razmena vrši.

Osnovni princip skaliranja intenziteta fotosinteze izveden je iz profila zračenja unutar biljnog sklopa uzimajući u obzir da je biljni sklop homogen i izotropan u svim pravcima i da ga čine listovi postavljeni pod istim uglom koji jednako vrše fotosintezu. Prenos zračenja unutar biljnog sklopa zavisi od intenziteta upadnog zračenja (suma direktnog i difuznog zračenja) i strukture biljnog sklopa. Zbog visoke apsorpcije od strane biljaka u vidljivom delu spektra, intenzitet apsorbovanog zračenja veoma je blizak intenzitetu upadnog zračenja, što dozvoljava zanemarivanje rasejanja (Roujean, 1996). Osnovni pristup modeliranju profila zračenja izražen je iz Lamber-Berovog (*Lambert-Beer*) zakona koji se koristi u optici. Prema Lamber-Berovom zakonu intenzitet zračenja koje prođe kroz *plan-paralel* sredinu (sredinu podeljenu na paralelne slojeve jednake debljine), koja zauzima prostor visine dz , biće smanjen u odnosu na intenzitet upadnog zračenja ($I(z)$) i to zbog karakteristika sredine kroz koju se prostire ($\mu(z)$) i dužine pređenog puta (dS)

$$dI(z) = -\mu(z)I(z)dS. \quad (3.33)$$

Ukoliko je poznat ugao pod kojim se zračenje prostire kroz sredinu, dS se može izraziti preko odnosa debljine sloja i kosinusa upadnog ugla (zenitni ugao ϑ)

$$z = S \cos \vartheta \Rightarrow dz = dS \cos \vartheta \Rightarrow dS = \frac{dz}{\cos \vartheta}. \quad (3.34)$$

Zamenom jednačine 3.34 u jednačinu 3.33

$$dI(z) = -\frac{\mu(z)}{\cos \vartheta} I(z) dz, \quad (3.35)$$

i integracijom jednačine 3.35 po z koordinati od neke visine z_0 dobijamo vrednost intenziteta zračenja koje prolaskom kroz karakterističnu sredinu dospe do određene visine z (jednačine 3.35–3.42)

$$\int_{z_0}^z \frac{dI(z)}{I(z)} = -\int_{z_0}^z \frac{\mu(z)}{\cos \vartheta} dz. \quad (3.36)$$

S obzirom to što se zrak sunca probija od gornje visine biljnog sklopa (h) prema tlu, visinu z_0 zamenjujemo sa h

$$\int_h^z \frac{dI(z)}{I(z)} = - \int_h^z \frac{\mu(z)}{\cos \vartheta} (-dz). \quad (3.37)$$

Veličina $\mu(z)$ opisuje uticaj strukture vegetacije na količinu apsorbovanog zračenja. U šumama $\mu(z)$ varira sa visinom i zavisi od površine vegetacionih elemenata u sloju debljine dz na visini z što u potpunosti odgovara definiciji $LAD(z)$. Prema tome, $\mu(z)$ možemo zameniti sa $k'LAD(z)$, gde je k' koeficijent ekstinkcije zračenja koji zavisi od tipa šume.

$$\int_h^z \frac{dI(z)}{I(z)} = - \int_h^z \frac{k' LAD(z)}{\cos \vartheta} (-dz), \quad (3.38)$$

$$\ln [I(z)] \Big|_h^z = - \frac{k'}{\cos \vartheta} \int_z^h LAD(z) dz, \quad (3.39)$$

$$\ln [I(z)] - \ln (I_h) = - \frac{k'}{\cos \vartheta} \int_z^h LAD(z) dz, \quad (3.40)$$

$$\ln \left(\frac{I(z)}{I_h} \right) = - \frac{k'}{\cos \vartheta} \int_z^h LAD(z) dz, \quad (3.41)$$

$$I(z) = I_h e^{\left(- \frac{k'}{\cos \vartheta} \int_z^h LAD(z) dz \right)}. \quad (3.42)$$

Kada je reč o biljnom sklopu, intenzitet zračenja na nekoj visini unutar biljnog sklopa u funkciji površine koja vrši apsorpciju, a koja zavisi isključivo od strukture sklopa izražava se najčešće za ceo biljni sklop, odnosno za fiksno $z=0$. Prema tome integral na desnoj strani jednačine 3.42 može se, prema definiciji, zameniti sa LAI (jednačina 2.76)

$$I(z) = I_h e^{\left(- \frac{k'}{\cos \vartheta} LAI \right)}, \quad (3.43)$$

gde je I_h - intenzitet zračenja na vrhu vegetacije. Poznavajući intenzitet zračenja koji dolazi do određene visine biljnog sklopa može se izračunati intenzitet fotosinteze. Smanjenje intenziteta dolaznog zračenja po visini biljnog sklopa ograničava proces fotosinteze lisne površine koja se nalazi u nižim slojevima vegetacije. Prema tome, ukoliko se krećemo od vrha biljnog sklopa, maksimum intenziteta fotosinteze biće karakteristika listova na vrhu i opadaće eksponencijalno u skladu sa smanjenjem intenziteta zračenja. Suma intenziteta fotosinteze po slojevima daje intenzitet fotosinteze biljnog sklopa.

3.3.2 SS postupak skaliranja turbulentnog fluksa CO₂

Dugo korišćeni Lamber-Berov pristup zamenilo je deljenje lisne površine na listove koji su izloženi direktnom sunčevom zračenju (*sun*) i listove u senci do kojih dolazi difuzno i rasejano sunčevo zračenje (*shade*). Razdvajanje na osunčane i osenčene delove biljnog sklopa proisteklo je iz merenja koja su pokazala da: 1) listovi izloženi direktnom sunčevom zračenju vrše fotosintezu u saturacionim uslovima, 2) saturacioni uslovi ne predstavljaju i maksimalnu moguću vrednost intenziteta fotosinteze i 3) vrednosti V_{cmax} razlikuju se za listove koji su osunčani i listove u senci. Jedan od prvih, i danas najprisutnijih, principa skaliranja intenziteta fotosinteze, koji je u obzir uzeo različite intenzitete fotosinteze na osunčanim i osenčenim listovima, razvijen je od strane de Puri i Farkvara (de Pury and Farquhar, 1997) (SS princip skaliranja u daljem tekstu). Prva promena, u odnosu na prethodni koncept, uočava se u predstavljanju strukture biljnog sklopa. Raspodela osunčanih (f_{sun}) i osenčenih (f_{sha}) listova je razdvojena izražava se u obliku

$$f_{sun} = e^{-k_b LAI} , \quad (3.44)$$

$$f_{sha} = 1 - f_{sun} , \quad (3.45)$$

gde je k_b - koeficijent ekstinkcije direktnog sunčevog zračenja dok prolazi kroz biljni sklop, a zavisi od ugla pod kojim su postavljeni listovi i upadnog ugla zračenja. Koeficijent ekstinkcije i najčešće uzima vrednost $0.5/\cos\vartheta$. Ukupan intenzitet zračenja koje apsorbuju osunčani (I_{sun}) i osenčeni listovi (I_{sha}) prema de Puri i Farkvaru (de Pury and Farquhar, 1997) predstavlja se u obliku

$$I_{sun} = \int_0^{L_c} I_{beam}(L) f_{sun}(L) dL + \int_0^{L_c} I_{diff}(L) f_{sun}(L) dL + \int_0^{L_c} I_{sca}(L) f_{sun}(L) dL , \quad (3.46)$$

$$I_{sha} = \int_0^{L_c} I_{diff}(L) f_{sha}(L) dL + \int_0^{L_c} I_{sca}(L) f_{sha}(L) dL \quad (3.47)$$

gde je, zbog pojednostavljivanja pisanja, sa L_c dato LAI_c u odnosu na koji je izvršen proces integracije i koji u jednačinama 3.44–3.47 ima ulogu vertikalne koordinate. U jednačinama 3.46 i 3.47 sa I_{beam} , I_{diff} i I_{sca} obeleženi su delovi ukupnog PAR koji prolaze kroz biljni sklop u obliku direktnog, difuznog i rasejanog zračenja, redom.

Ukoliko se za proračun intenziteta fotosinteze koristi FvCB model opisan u 3.2.1 onda se SS proces skaliranja odnosi na skaliranje fotosintetskog kapaciteta i zračenja potrebnog da se fotosinteza izvrši, dok se ostale veličine kao što su koncentracija CO₂ ili promena temperature po visini uzimaju za konstantne (Calvet et al., 1998). Profil V_c proizašao je iz njegove linearne zavisnosti od koncentracije azota u listovima koja je potvrđena u velikom broju biohemijskih istraživanja $V_c = \chi_n N$, gde je χ_n koeficijent proporcionalnosti (Ingestad and Lund, 1986; Norman, 1993; Kull and Jarvis, 1995; Kimball et al., 1997; Niu et al., 2005). Naime, visok stepen korelacije pronađen je između sadržaja azota u listovima i broja hlorofila (Kastori, 1998), te se i preko te činjenice intenzitet fotosinteze može dovesti u vezu sa količinom azota u biljci. Profil koncentracije azota opisuje se preko funkcije

$$N = N_h e^{-k_n LAI} , \quad (3.48)$$

gde je N_h - koncentracija azota u listovima na vrhu biljnog sklopa, k_n - koeficijent stope raspada azota koji iznosi 0,3 (de Pury and Farquhar, 1997). Uzimajući u obzir razlike u V_c listova koji su izloženi direktnom zračenju i listova u senci, ukupan $V_{c,sum}$ za osunčane listove na nivou biljnog sklopa može se izraziti u obliku

$$V_{c,sum} = \int_0^{L_c} V_0(L) f_{sun}(L) dL = L_c \chi_n N_h \left[\frac{1 - e^{-(k_n - k_b L_c)}}{k_n + k_b L_c} \right], \quad (3.49)$$

dok je fotosintetski kapacitet listova u senci $V_{c,sha}$

$$V_{c,sha} = 1 - V_{c,sum}. \quad (3.50)$$

Brzina prenosa elektrona preko elektron-transportnog lanca takođe se izražava u funkciji sadržaja azota u listovima

$$J_{sun/sha} = 29,1 + 1,6V_{c,sum/sha}. \quad (3.51)$$

Na kraju se intenzitet fotosinteze biljnog sklopa ($A_{SS/sum}$) svodi na sumu ukupne asimilacije na osunčanim i na osenčenim listovima

$$A_{SS/sum} = \left[\min(A_{c,sun}, A_{j,sun}, A_{s,sun}) - R_{d,sun} \right] + \left[\min(A_{c,sha}, A_{j,sha}, A_{s,sun}) - R_{d,sha} \right]. \quad (3.52)$$

4. MODELIRANJE TURBULENTNOG TRANSPORTA AZOTNIH OKSIDA

4.1 Uvod

Promena koncentracije reaktivnih jedinjenja u PS rezultat je prisustva izvora i/ili ponora jedinjenja, brzine transportnog procesa i reaktivnosti posmatranog jedinjenja ili familije jedinjenja. Brzina reakcija produkcije i destrukcije NO_x nalaze se u vremenskom razmeru turbulentnog transporta, te se prilikom parametrizacije turbulentnog transporta NO_x hemijska aktivnost mora uzeti u obzir. Modeliranje turbulentnog transporta azotnih oksida u najnižem sloju atmosfere pokazalo se kao jedan od ključnih parametara za procenu uticaja promenjenih klimatskih i mikrometeoroloških uslova na stanje sredine. Intenzitet izvora azotnih oksida u prirodnim uslovima izbalansiran je: a) procesom suve depozicije na tlo i biljke, b) apsorpcije od strane biljaka i c) hemijske transformacije, tako da samo mali deo produkovanih gasova stigne do gornjih slojeva atmosfere.

Iako se NO i NO_2 prilikom prikazivanja koncentracije i fluksa uzimaju u ukupnoj sumi koncentracija kao familija jedinjenja (NO_x), za njihovo nastajanje i uklanjanje iz površinskog sloja odgovorni su različiti procesi. Biološka aktivnost zemljišta rezultuje emisijom NO koji u brzim hemijskim reakcijama, odmah po emitovanju, oksidira do višeg oblika NO_2 . Životni vek NO_2 zavisi od intenziteta uklanjanja suvom depozicijom na čvrstim podlogama. Prema tome, ukupna koncentracija zavisi od procesa emisije NO i depozicije NO_2 .

Merne kampanje u okviru istraživanja kvaliteta vazduha izvedene 80-tih i 90-tih godina XX veka rezultirale su razvojem modela suve depozicije baziranih na aproksimaciji velikog lista (Wesely, 1989; Ganzeveld et al., 1995). U tim modelima uklanjanje polutanata (O_3 , NO_2 , SO_2) od strane vegetacije opisano je preko aproksimacije velikog lista. Postupak skaliranja veličina najčešće je bio linearan izveden jednostavnim množenjem sa LAI , ali i nelinearan preko podele LAI na osunčani i osenčeni deo (Flechard et al., 2011). Modeliranje turbulentnog transporta jedinjenja od interesa izvedeno je pomenutom otpornom reprezentacijom. Danas su u upotrebi dvoslojni modeli koji koriste različite vrednosti otpora na listu koji opisuje krošnju i na listu nižeg biljnog sklopa uz parametrizaciju turbulentnog transporta između slojeva (Lamaud et al., 2009; Stella et al. 2011).

Međutim, modeli najčešće ne uzimaju u obzir hemijske reakcije koje se odigravaju u vazduhu koji ispunjava biljni sklop. Izuzetak je analitički model suve depozicije koji je razvio Dajzer (Duyzer et al., 2005). Model uzima u obzir jednostavnu hemijsku trijadu O_3 -NO-NO₂, koja se odvija unutar biljnog sklopa predstavljenu preko zakona održanja mase. Drugi model koji u obzir uzima hemijske reakcije razvio je Kram sa sar. (Kramm et al., 1996). Kram je iskoristio koncept konzervacije gasova u tragovima koje je podelio u grupe jedinjenja ($[NO_x]=[NO]+[NO_2]$, $[O_x]=[NO_2]+[O_3]$ i $[NO_x-O_x]$). Za predstavljene grupe pretpostavio je nepostojanje divergencije turbulentnog fluksa, što je dozvolilo upotrebu otporne reprezentacije sve dok su otpori jednaki za svaku grupu jedinjenja. Međutim, teorija koju je predstavio Kram nije mogla da se koristi unutar slojeva vazduha u kom je difuzija osnovni transportni mehanizam, jer su koeficijenti difuzije gasova različiti. Hemijski transportni modeli i hemijski klimatski modeli velikih razmera koriste model velikog lista za opis razmene NO_x i O₃ između atmosfere i biosfere (Flechard et al., 2011). U nastavku su iznesene teorijske osnove u modeliranju turbulentnog fluksa NO_x zajedno sa detaljnom analizom dominantnih procesa i aktuelnim načinima parametrizacije.

4.2 Modeliranje procesa suve depozicije

Algoritmi, čiji je zadatak proračun brzine depozicije gasova prisutnih iznad i unutar biljnog sklopa, razvijali su se u dva pravca. Prvi je detaljan opis procesa depozicije i transporta gasova, a drugi parametrizacija procesa depozicije preko analogije sa Omovim zakonom, odnosno preko otporne reprezentacije. Prvi modeli, čiji cilj je bio modeliranje transporta polutanata između atmosfere i biosfere, bez obzira da li se radi o reaktivnim ili pasivnim jedinjenjima, uključili su neku vrstu sheme za parametrizaciju suve depozicije. Analogno turbulentnom transportu mase u PS i proces suve depozicije, koji je isto tako rezultat turbulentnog kretanja vazduha, zavisice od kretanja vazduha unutar i iznad biljnog sklopa.

Razmatranje procesa suve depozicije preko jednačina turbulentnog transporta opisano je u podpoglavlju 2.2.3. Prema Vesliu (Wesely, 1989), ukupan otpor difuziji (r_{dif}) različitih gasovitih polutanata prilikom transporta kroz biljni sklop, površinski otpor, izražava se otpornom reprezentacijom gde su otpori u rednim i paralelnim vezama (slika 4.1)

$$r_{dif} = \left(\frac{1}{r_s + r_m} + \frac{1}{r_k} + \frac{1}{r_{konv} + r_p} + \frac{1}{r_{veg} + r_{tlo}} \right)^{-1} \quad (4.1)$$

U jednačini (4.1) javljaju se r_s - stomatarni otpor, r_m - mezofilni otpor, r_k - kutikularni otpor, r_{konv} - otpor konvekciji unutar biljnog sklopa, r_p - otpor listova, grana i ostalih izloženih površina u donjem sloju biljnog sklopa, r_{veg} - otpor vegetacije čiji je uzrok gustina i visina biljnog sklopa, r_{tlo} - otpor na površini tla ili stelje. Mezofilni otpor predstavlja sposobnost gasa da se rastvori i reaguje u vodi unutar lista. Rastvaranje gasova u vodi opisano je Henrijevom konstantom (H^*), dok je faktor

reaktivnosti predstavljen sa f_0 . Faktor reaktivnost je uveden da bi opisao brzinu reakcija posmatranog jedinjenja

$$f_0 = \begin{cases} 1 & \text{izuzetno reaktivno jedinjenje} \\ 0,1 & \text{slabo reaktivno jedinjenje} \\ 0 & \text{nereaktivno jedinjenje} \end{cases} \quad (4.2)$$

Sa tim u vidu mezofilni otpor opisuje se na sledeći način

$$r_{m,X} = \left(\frac{H_X^*}{3000} + 100 f_{0,X} \right)^{-1} \quad (4.3)$$

Otpor difuziji na samoj površini lista, kutikuli, razlikuje vlažnu od suve površine (tabela 4.1) i predstavlja se za SO_2 , O_3 i ostale hemijske vrste u obliku

$$r_{k,SO_2,O_3,X}^{suvo} = \frac{r_{k,0}}{10^{-5} H_{SO_2,O_3,X}^* + f_{0,SO_2,O_3,X}} \quad (4.4)$$

Otpornost konvektivnom transportu unutar biljnog sklopa za sve hemijske vrste izražen je u obliku

$$r_{konv} = 100 \left(1 + \frac{1000}{\varepsilon + 10} \right) \frac{1}{1 + 1000\varepsilon} \quad (4.5)$$

gde je ε nagib lokalnog terena izražen u radijanima. Otpor na površinama na koje gasovi nailaze prilikom transporta kroz biljni sklop, listovi, grane i ostale čvrste podloge opisuje se površinskim otporom u obliku

$$r_{p,X} = \left(\frac{H_X^*}{10^5 r_{p,SO_2}} + \frac{f_{0,X}}{r_{p,O_3}} \right)^{-1} \quad (4.6)$$

Otpornost vegetacije predstavlja se preko jednostavne relacije koja u obzir uzima vrednost indeksa liste površine. Najčešće korišćen izraz za ovaj otpor je

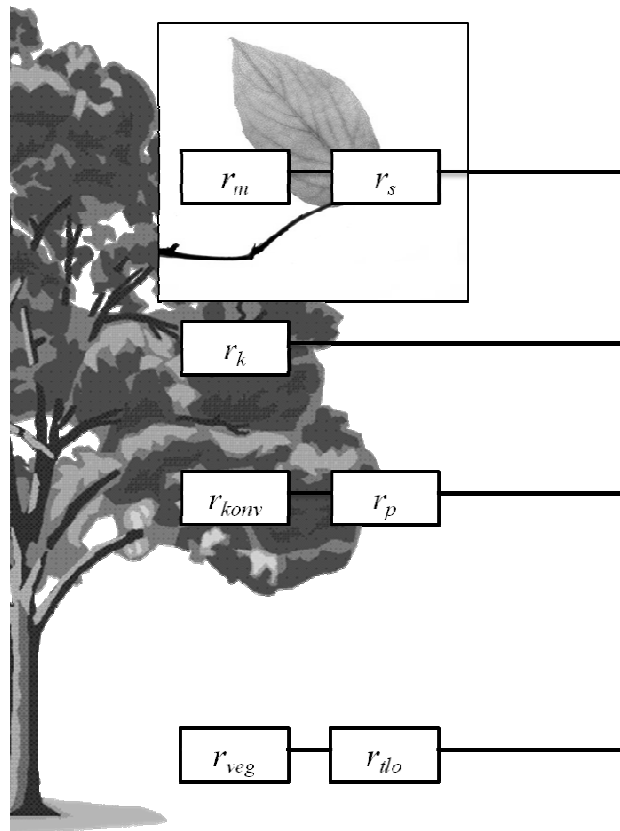
$$r_{veg} = \frac{14hLAI}{u_*} \quad (4.7)$$

Otpor na tlu, površini zemljišta ili stelje, određen je izrazom 4.8 u kom figurišu vrednosti otpora koji se suprotstavlja transportu SO_2 i O_3 na tlu

$$r_{tlo,X} = \left(\frac{H_X^*}{10^5 r_{tlo,SO_2}} + \frac{f_{0,X}}{r_{tlo,O_3}} \right)^{-1} \quad (4.8)$$

Na površini lista gasovi još mogu da prođu kroz stomu u unutrašnjost listova i da tamo budu rastvoreni ili hemijski vezani u vodi. Različiti oblici modeliranja otpora koji se javlja prilikom difuzije

gasova kroz stome opisani su u podpoglavlju 3.3.2. Vrednosti za r_{p,SO_2} , r_{p,O_3} , r_{tlo,SO_2} i r_{tlo,O_3} objedinjene su u tabelama koje je sastavio Džejkobson (Jacobson, 2005).



Slika 4.1 Otporna reprezentacija površinskog otpora depoziciji gasovitih polutanata (Wesely, 1989; Jacobson, 2005).

Tabela 4.1 Vrednosti kutikularnog otpora u zavisnosti od podloge.

	r_{k,SO_2}		r_{k,O_3}	$r_{k,X}$
	ruralni	Urbani		
Suva površina	r_{k,SO_2}^{suvo}	r_{k,SO_2}^{suvo}	r_{k,O_3}^{suvo}	$r_{k,X}^{suvo}$
Rosa	100	50	$\left(\frac{1}{3000} + \frac{1}{3r_{k,0}}\right)^{-1}$	$\left(\frac{1}{3r_{k,X}^{suvo}} + \frac{H_X^*}{10^7} + \frac{f_{0,X}}{r_{k,O_3}^{suvo}}\right)^{-1}$
Kiša	$\left(\frac{1}{5000} + \frac{1}{3r_{k,0}}\right)^{-1}$	50	$\left(\frac{1}{1000} + \frac{1}{3r_{k,0}}\right)^{-1}$	$\left(\frac{1}{3r_{k,X}^{suvo}} + \frac{H_X^*}{10^7} + \frac{f_{0,X}}{r_{k,O_3}^{suvo}}\right)^{-1}$
Literatura	Jacobson (2005)			

Tabela 4.2 Koeficijenti korišćeni u otpornoj reprezentaciji za računanje suve depozicije različitih gasova.

Gasovita jedinjenje	Simbol	D_{H_2O}/D_X	H^* (M atm ⁻¹)	f_0
Sumpor-dioksid	SO ₂	1,9	1,0·10 ⁻⁵	0
Ozon	O ₃	1,6	0,01	1
Azot-dioksid	NO ₂	1,6	0,01	0,1
Azot-monoksid	NO	1,3	2,0·10 ⁻³	0
Azotna kiselina	HNO ₃	1,9	1,0·10 ¹⁴	0
Vodonik-peroksid	H ₂ O ₂	1,4	1,0·10 ⁵	1
Acetaldehid	CH ₃ CHO	1,6	15,0	0
Formaldehid	CH ₂ O	1,3	6,0·10 ³	0
metil-hidroperoksid	CH ₃ OOH	1,6	2,4·10 ²	0,1
Peroksi-acetatna kiselina	PAA	2,0	5,4·10 ²	0,1
Metanska kiselina	CH ₂ O ₂	1,6	4,0·10 ⁶	0
Amonijak	NH ₃	0,97	2,0·10 ⁴	0
Peroksiacetil nitrat	PAN	2,6	3,6	0,1
Azotasta kiselina	HNO ₂	1,6	1,0·10 ⁵	0,1
Literatura	Wesely (1989)			

4.3 Modeliranje emisije iz zemljišta

Najzastupljeniji empirijski model za simuliranje emisije familije azotnih oksida NO_x iz zemljišta objavili su Jinger i Levi (Yienger and Levy, 1995). Model je zasnovan na karakterističnoj produkciji NO (koji se veoma brzo oksidira u NO₂, u različitim ekosistemima) i funkcionalnoj zavisnosti od vlažnosti zemljišta, površinske temperature, padavina i primene azotnih đubriva. Ekosistemi su podeljeni u 12 klasa (tabela 4.3), prema količini vlage u zemljištu. Podela na vlažna i suva zemljišta određuje se preko prethodno izmerenih podataka ili preko trenutnih vrednosti. Ukoliko je vlažnost zemljišta niža za jednu desetinu od srednje vrednosti smatra se da su suvi uslovi, dok povećanje od 10 % u odnosu na srednju vrednost predstavlja vlažne uslove. Zavisnost emisije NO od temperature podloge (T) izražena je u obliku

$$F_{NO}(T, A_w) = \begin{cases} 0,28 A_w T & 0^\circ C < T \leq 10^\circ C \\ A_w \exp(0,103T) & 10^\circ C < T \leq 30^\circ C, \\ 21,97 A_w & T > 30^\circ C \end{cases} \quad (4.9)$$

$$F_{NO}(T, A_d) = \begin{cases} A_d \frac{T}{30} & 0^\circ C < T \leq 30^\circ C \\ A_d & T > 30^\circ C \end{cases}, \quad (4.10)$$

gde su A_w i A_d empirijski koeficijenti karakteristični za vlažna i suva zemljišta, redom (tabela 4.3). Ukupnoj emisiji dodaje se faktor pulsiranja određen empirijski (P_u), u obliku eksponencijalne funkcije

($P_u = P_{u,0} \exp(a d)$), u zavisnosti od količine padavina i broja dana u kojima su se padavine javile (dan) (Yienger and Levy, 1995)

$$P_u = \begin{cases} 11,19 \exp(0,805 dan) & 1 < dan < 3 \text{ i } 1-5 \text{ mm } dan^{-1} \\ 14,68 \exp(0,384 dan) & 1 < dan < 7 \text{ i } 5-15 \text{ mm } dan^{-1} \\ 18,46 \exp(0,208 dan) & 1 < dan < 14 \text{ i } > 15 \text{ mm } dan^{-1} \end{cases} \quad (4.11)$$

Proces oksidacije emitovanog NO u NO₂ koji delom biva suvom depozicijom uklonjen opisuje se redukcionim faktorom biljnog sklopa (CRF) koji se kreće u granicama od 0 do 1, a zavisi od LAI (Yienger and Levy, 1995). Uzimajući u obzir CRF i pulsiranje ukupan fluks NO (f_{NO}) može da se izrazi u obliku

$$f_{NO} = CRF P_u F_{NO}(T, A_{d/w}). \quad (4.12)$$

Tabela 4.3 Faktori emisije različitih ekosistema prema Jingeru i Leviju.

Ekosistem		Koeficijent emisije	
		Vlažno (A_w)	Suvo (A_d)
1	Voda	0	0
2	Led	0	0
3	Pustinja	0	0
4	Žbunoviti predeo	0	0
5	Tundra	0,05	0,37
6	Stepa	0,36	2,65
7	Šumoviti predeo	0,17	1,44
8	Listopadne šume	0,03	0,22
9	Zimzelene šume	0,03	0,22
10	Suve listopadne šume	0,06	0,4
11	Kišne šume	2,6	8,6
12	Poljoprivredno zemljište	0	0
Literatura		Yienger and Levy (1995)	

4.4 Modeliranje hemijskih procesa

Hemijski ciklusi u kojima učestvuju NO_x i njihovi primarni i sekundarni produkti hemijskih reakcija, mogu značajno da utiču na promenu koncentracije NO_x unutar i iznad biljnog sklopa, što dovodi do neočekivanih razlika u površinskim fluksevima. Najčešći način predstavljanja hemijske aktivnosti NO_x u SVAT shemama je preko spregnute trijade generisanja i razlaganja O₃ u kojima je osnovni reaktant NO_x. Prva kompletna SVAT shema koja je uključila osnovni fotohemijski ciklus NO_x razvijena je od strane Krama i sar. (Kramm et al., 1996).

Merenja koncentracije i flukseva NO_x bila su retka u momentu razvijanja prvih SVAT shema, pa su mogućnosti i tačnost shema bile ograničene. Kasnija merenja, koja su omogućila testiranje osetljivosti shema na različite meteorološke uslove, ukazale su na veći broj problema (Flechard et al.,

2011). U osnovi, problemi u simulacijama javili su se zbog nedovoljno tačnog modela velikog lista koji se i u parametrizaciji turbulentnog transporta NO_x pokazao kao neadekvatan. Greške su se prvenstveno javile u shemama suve depozicije (Fitzjarrald and Lenschow, 1983), a potom i u ograničenoj hemijskoj shemi. Poznato je da je prirodni biljni sklop, sa hemijskog stanovišta, veoma dinamičan sistem. Pored osnovnih fotohemijskih reakcija i oksidacije NO javlja se čitav niz različitih hemijskih procesa nastao kao odgovor na produkciju ozona, VOC, PAN i ostalih. Za sagledavanje složenih hemijskih procesa, različitih slojeva troposfere potrebna je i dovoljno kompleksna hemijska shema koja uključuje odgovarajuće izvore i ponore supstance. Hemijske reakcije u gasnoj fazi između različitih organskih jedinjenja su mnogobrojne. Eksplicitno rešavanje hemijskih jednačina više hiljada međusobno spregnutih procesa u trodimenzionalnom prostoru je razvijeno (Jenkin et al., 2003; Saunders et al., 2003), ali njegova vremenska neefikasnost diktira korišćenje modela. Da bi se povećala efikasnost modela neophodno je smanjiti broj organskih reakcija. Smanjivanje broja reakcija izvodi se metodom spajanja ugljeničkih vrsta (*carbon-bond lumping method*, CBM4) (Whitten et al., 1980; Gery et al., 1989), metodom surogatnih vrsta (Atkinson et al., 1982; Griffin et al., 2002) ili metodom spajanja hemijskih vrsta (Stockwell, 1986). CBM4 predstavlja osnovnu hemijsku shemu u modelima različitih vremenskih i prostornih razmera koji su razvijeni za modeliranje buduće klime ili monitoring aerozagađenja. Ova shema koristi Ojlerovu shemu unazad za rešavanje spregnutih hemijskih procesa.

Ojlerova shema unazad. U širokom spektru numeričkih shema za rešavanje diferencijalnih jednačina Ojlerova shema unazad izdvojila se kao najstabilnija u rešavanju spregnutih hemijskih jednačina (Jacobson, 2005). U shemi su sve koncentracije, osim onih koje se računaju, izražene u jednom koraku unazad. Koncentracija hemijske vrste od interesa izražena je u koraku t u obliku

$$N_{i,t} = N_{i,t-1} + h \frac{dN_{i,t,t-h}}{dt}, \quad (4.13)$$

pri čemu je

$$\frac{dN_{i,t,t-h}}{dt} = f(N_{i,t}, N_{i,t-h}). \quad (4.14)$$

Primer za primenu Ojlerove sheme unazad prikazaćemo preko već pomenute hemijske trijade produkcije i razlaganja NO_x



Razlaganjem prethodne tri hemijske jednačine preko Ojlerove sheme unazad u prvom koraku dobijamo

$$\frac{d[\text{NO}_2]_{t,t-h}}{dt} = k_1[\text{NO}]_{t-h}[\text{O}_3]_{t-h} - k_2[\text{NO}_2]_t[\text{O}_3]_{t-h} - j[\text{NO}_2]_t. \quad (4.15)$$

Smenom jednačine 4.15 u jednačinu 4.13 dobijamo

$$[\text{NO}_2]_t = [\text{NO}_2]_{t-h} + h\{k_1[\text{NO}]_{t-h}[\text{O}_3]_{t-h} - k_2[\text{NO}_2]_t[\text{O}_3]_{t-h} - j[\text{NO}_2]_t\}. \quad (4.16)$$

Članovi u vitičastoj zagradi predstavljaju produkciju (P) i razlaganje (R) NO_2 u trijadi.

$$P_{[\text{NO}_2]_{t-h}} = k_1[\text{NO}]_{t-h}[\text{O}_3]_{t-h}, \quad (4.17)$$

$$R_{[\text{NO}_2]_{t,t-h}} = k_2[\text{NO}_2]_t[\text{O}_3]_{t-h} - j[\text{NO}_2]_t. \quad (4.18)$$

Svi članovi koji predstavljaju razlaganje, odnosno ponor poseduju $[\text{NO}_2]_t$ pa se cela jednačina može podeliti sa tim članom čime se dobija implicitni koeficijent razlaganja (Λ)

$$\Lambda_{[\text{NO}_2]_{t-h}} = \frac{R_{[\text{NO}_2]_{t,t-h}}}{[\text{NO}_2]_t} = k_2[\text{O}_3]_{t-h} + j. \quad (4.19)$$

Zamenom u jednačinu 4.16 izražavamo koncentraciju NO_2 u vremenskom koraku t

$$[\text{NO}_2]_t = [\text{NO}_2]_{t-h} + h\{P_{[\text{NO}_2]_{t-h}} - \Lambda_{[\text{NO}_2]_{t-h}}[\text{NO}_2]_t\}, \quad (4.20)$$

$$[\text{NO}_2]_t \{1 + h\Lambda_{[\text{NO}_2]_{t-h}}\} = [\text{NO}_2]_{t-h} + hP_{[\text{NO}_2]_{t-h}}, \quad (4.21)$$

$$[\text{NO}_2]_t = \frac{[\text{NO}_2]_{t-h} + hP_{[\text{NO}_2]_{t-h}}}{1 + h\Lambda_{[\text{NO}_2]_{t-h}}}. \quad (4.22)$$

Rešenje može da se generalizuje i za ostale hemijske vrste (i) i napiše u obliku

$$N_{i,t} = \frac{N_{i,t-h} + hP_{i,t-h}}{1 + h\Lambda_{i,t-h}}. \quad (4.23)$$

Prednost Ojlerove shema unazad, i razlog zašto se izdvojila od ostalih shema, ogleda se u finalnoj koncentraciji koja ne može da padne ispod nule bez obzira koji vremenski korak se koristi (Jacobson, 2005). Ipak, ova shema zajedno sa jednostavnom eksponencijalnom shemom spada u rešenja koja ne održavaju masu, čime se greška akumulira u toku vremena. Razlog je različita linearizacija koeficijenata brzine reakcije prilikom rešavanje jednačina različitih hemijskih vrsta.

4.5 Skaliranje koncentracija

Skaliranje koncentracija u višeslojnom modelu svodi se na računanje vrednosti koncentracija u svakom pojedinom sloju modela. Izlazna informacija je najčešće profil koncentracija kroz slojeve modela, ili turbulentni fluks posmatranog gasa. Profil koncentracija unutar određenog sloja vazduha

zavisiće prvenstveno od prisustva izvora ili ponora, ali i od transportnih karakteristika vazduha i razmene između slojeva. Ukoliko posmatramo emisiju NO na izvoru, odnosno emisiju iz zemljišta, sloj vazduha na čiju koncentraciju najviše utiče je sloj vazduha koji prekriva tlo, u šumama sloj vazduha oko stabala iznad stelje. Turbulentne karakteristike vazduha najnižeg sloja diktiraju transport NO u više slojeve vazduha, dok će prisustvo ostalih gasova uticati na hemijsku konverziju. S obzirom na to što su šume „fabrike“ kiseonika, najverovatnija je trenutna oksidacija NO do NO₂. Prema tome, sledeći sloj će procesom turbulentne difuzije primiti jedan deo emitovanog NO i produkovanog NO₂ uz gubitke istog kroz hemijsku i fotohemijsku razgradnju i suhu depoziciju. Za razliku od CO₂, u najjednostavnijoj parametrizaciji, površina lista ne predstavlja glavni izvor niti ponor NO_x, ali učestvuje u svim procesima od značaja za životni vek NO_x unutar i iznad biljnog sklopa. Lisna površina je receptor gasa, prepreka u transportu, uzrok turbulentne kaskade i apsorber dolaznog zračenja. Skaliranje koncentracije svodi se na upotrebu informacije o lisnoj površini (*LAI*) u parametrizaciji procesa koji utiču na promenu koncentracije, odnosno turbulentnog fluksa posmatranog gasa.

Proces skaliranja koncentracija azotnih oksida i ostalih reaktivnih gasova zavisi i od prirode hemijskih reakcija u koje stupaju. Ukoliko su reakcije fotohemijskog karaktera tada se koristi profil intenziteta zračenja u posmatranoj sredini koji utiče na brzinu i verovatnoću odigravanja reakcije. U modelima najprisutniji je Lamber-Berov profil zračenja uz primenu odgovarajućeg koeficijenta transmittivnosti (jednačina 3.40).

Ukoliko je brzina hemijske reakcije zanemarljiva u odnosu na brzinu turbulentnog transporta, u prethodno tekstu opisana kao nisko reaktivna jedinjenja, tada će se skaliranje na biljni sklop obaviti preko veličina koje utiču na intenzitet vertikalnog turbulentnog transporta, a to su najčešće prepreke koje onemogućavaju ili redukuju vertikalni transport. U prirodnoj sredini, unutar vegetacije, prepreke su delovi biljaka, grane, listovi. Ukoliko je opis biljnog sklopa u modelu izveden iz aproksimacije velikog lista, tada će skaliranje koncentracije biti izvedeno preko linearne veze između *LAI* i intenziteta procesa koji diktira površina lista. Prema tome, vrednosti stomatarnog otpora u otpornoj reprezentaciji suve depozicije (jednačina 3.25) i otpora vegetacije (jednačina 4.7) biće skalirane preko vrednosti *LAI*. Model stomatarnog otpora koji se javlja u parametrizaciji suve depozicije gasova u tragovima, a koji zavisi od *LAI* i profila PAR razvio je Sellers sa sar. (Sellers et al., 1986)

$$r_s = \frac{k'c}{\left[\frac{b}{dPAR} \ln \left(\frac{de^{k'LAI} + 1}{d+1} \right) - \left(\frac{de^{-k'LAI} + 1}{d+1} \right) \right]} F(w_s) \quad (4.24)$$

gde je $d=(a+bc)/cPAR$, $k' = 0,9$, $a = 5000 \text{ J m}^{-2}$, $b = 10 \text{ W m}^{-2}$ i $c = 100 \text{ s m}^{-1}$, $F(w_s)$ količina vlage u zemljištu na dubini korenovog sistema.

Višeslojni model zahteva informaciju o vrednosti $LAD(z)$. Međutim, najveći broj modela ne upotrebljava funkcije za opis $LAD(z)$ koje su opisane u podpoglavlju 2.3.6. Najčešće se u praksi svakom sloju modela vizuelno odredi odgovarajući procenat od ukupnog *LAI* prema *in situ* karakteristikama biljnog sklopa.

5. KAPLOVANA MLC-LAPS SVAT SCHEMA

5.1 Uvod

Razvoj SVAT shema odvijao se na dva polja: a) razvijanje „fizike” modela koja treba što tačnije da kvantifikuje turbulentni transport mase, energije i količine kretanja na tlu i b) razvijanje „hemije” modela čiji je cilj kvantifikacija koncentracija i flukseva gasova i aerosola od značaja za klimatske i hemijske simulacije. Vrlo brzo se pokazalo da nepovezanost između fizičkih, bioloških i hemijskih procesa u SVAT shemama dovodi do značajnih grešaka u simulacijama.

Sve fizičke SVAT sheme razvijene za potrebe atmosferskih i klimatskih modela pružaju odličnu podlogu za razvoj hemijsko-biofizičke sheme. Međutim, kompleksan hemijski modul sa velikim brojem ulaznih parametara i različitih hemijskih vrsta koje učestvuju u spregnutim hemijskim reakcijama numerički je neefikasan, te se modeliranje fizičkih procesa u hemijskim shemama najčešće svodi na minimum. Prve hemijsko-biofizičke sheme uključile su samo osnovne atmosferske reaktante NO_x i O_3 i njihove međusobne reakcije. Jednostavni hemijski modul ograničen na reakciju fotodisocijacije NO_2 i produkciju O_3 umanjio je uticaj hemijskih procesa na ukupnu razmenu NO_x između biosfere i atmosfere. Razlog tome je, kao što je pokazano u poglavlju 4.3, složenost hemijskih procesa karakterističnih za vazduh unutar i iznad biljnog sklopa, kao i nemogućnost jednostavnih parametrizacija da uračunaju transport različitih dugoživećih jedinjenja transportovanih sa većih udaljenosti. Problemi prilikom modeliranja hemijskih reakcija javili su se zbog jednostavnosti modeliranja fizičkih procesa unutar biljnog sklopa, a od kojih direktno zavisi njihova efikasnost.

Potreba za unapređenjem, kako hemijske tako i biofizičke sheme, dovela je do spajanja, odnosno kaplovanja[‡] dve sheme. Kaplovana biofizičko-hemijska shema prevazilazi glavne nedostatke obe sheme uz proširivanje spektra njihove upotrebe. Za biofizičku shemu izabrana je *Land-Air Parameterization Scheme* (LAPS) razvijena na Poljoprivrednom fakultetu, Univerziteta u Novom Sadu, od strane Prof. dr D.T. Mihailovića (Mihailovic, 1996). Izabrana hemijska shema je *Multi-Layer Canopy exchange model* (MLC-Chem) razvijena na Univerzitetu u Wageningenu (*Wageningen*) od

[‡] Iako je prevod reci *coupling* – uparivanje, u ovom tekstu je reč zadržana u obliku „kaplovanje” upravo zato što i u engleskom jeziku u stručnom kontekstu ona ukazuje ne samo na prosto sparivanje dve šeme već suštinsku integraciju svih procesa koji se u njima odigravaju

strane dr L. Ganzevelda (Ganzeveld et al., 2002a). Izbor shema izvršen je prema njihovoj kompatibilnosti u pogledu ulaznih podataka i parametara vegetacije. Obe sheme su prošle kroz dugačak razvojni period testiranja u *in situ* simulacijama, kao i testiranja u sklopu većih numeričkih modela, i pokazale su izuzetno dobre rezultate (Mihailovic and Rumul, 1996; Mihailovic et al., 2001; Mihailovic et al., 2010; Ganzeveld et al., 2002a; Ganzeveld et al., 2002b; Ganzeveld et al., 2006a; Ganzeveld et al., 2006b).

Osnovne jednačine koje karakterišu LAPS shemu date su u podpoglavlju 5.1.1. Opis MLC-Chem sheme i njene osnovne karakteristike opisane su u podpoglavlju 5.1.2. Osnovne karakteristike razvijenog CO₂ modula sa predloženim postupkom skaliranja opisani su u poglavlju 5.2. Osnove kaplovanja shema date su u poglavlju 5.3.

5.1.1 LAPS shema

LAPS shema opisuje procese prenosa mase, energije i količine kretanja između zemljine površine i atmosfere. Dizajnirana je u obliku softverskog paketa koji se može pokretati samostalno ili u okviru atmosferskog, ekološkog ili hidrološkog modela većih razmera (Mihailovic and Kallos, 1997; Mihailovic et al., 2000; Mihailovic et al., 2002; Mihailovic et al., 2010). Shema uzima u obzir transportne procese u prisustvu podloge prekrivene vegetacijom, stenama ili golim zemljištem. Najveća pažnja, prilikom kreiranja sheme, pružena je određivanju pravog broja ulaznih parametara u cilju što tačnijeg proračuna glavnih fizičkih procesa uz minimalan broj ograničenja. LAPS razlikuje 12 tipova vegetacije (*plant functional types*, PFT, npr. Bonan et al., 2002), 16 morfoloških i fizioloških parametara vegetacije i 11 teksturnih klasa zemljišta (Mihailovic et al., 2002). Biofizički procesi u shemi obuhvataju: emisiju, refleksiju i apsorpciju zračenja u biljnim sklopu i na površini tla; razmenu fluksa količine kretanja; razmenu turbulentnih flukseva osetne i latentne toplote; provođenje toplote kroz tlo; transpiraciju; isparavanje vode sa površine tla i vode zadržane na površini listova; vertikalnu difuziju vode kroz tlo i površinsko i podzemno oticanje vode.

Strukturu sheme čini sedam prognostičkih jednačina. Prve tri jednačine služe za računanje temperature biljnog sklopa (T_f), površine zemljišta (T_g) i dubljeg sloja zemljišta (T_d)

$$C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = R_f^{net} - H_f - \lambda E_f, \quad (5.1)$$

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = R_g^{net} - H_g - \lambda E_g - G, \quad (5.2)$$

$$C_g \frac{\partial T_d}{\partial t} = \frac{2(R_g^{net} - H_g - \lambda E_g)}{(365\pi)^{\frac{1}{2}}}, \quad (5.3)$$

gde su sa indeksom „*f*“ obeležene veličine koje se odnose na biljni sklop, sa „*g*“ veličine koje se odnose na tlo. U jednačinama 5.1–5.3 sa C je obeležen toplotni kapacitet, R^{net} - apsorbovani fluks kratkotalasnog i dugotalasnog zračenja, H - fluks osetne toplote, λ - latentna toplota isparavanja, E -

brzina evapotranspiracije, koja uključuje isparavanje vode, kako sa površine tla tako i vode zadržane na listovima i transpiraciju, a G - fluks toplote u podlogu. Fluks toplote u podlogu je parametrizovan koristeći takozvani „force-restore“ metod (Mihailovic, 1999). Četvrta prognostička jednačina je jednačina za količinu vode zadržanu unutar biljnog sklopa (w_f) izraženu kao zapremina vode po jedinici površine biljnog sklopa

$$\frac{\partial w_f}{\partial t} = P_f - \frac{E_{wf}}{\rho_w}, \quad (5.4)$$

gde je ρ_w - gustina vode, P_f - brzina zadržavanja padavina u biljnom sklopu, E_{wf} - brzina isparavanja vode sa mokre površine listova. Kada su zadovoljeni uslovi za formiranje rose, E_{wf} je ispod nule, pa se kondenzovana voda dodaje veličini w_f . Poslednje tri prognostičke jednačine javljaju se u troslojnom modelu za proračun sadržaja vode u tlu

$$\frac{\partial w_1}{\partial t} = \frac{1}{D_1} \left(P_1 - F_{1,2} - \frac{E_g + E_{tf,1}}{\rho_w} - R_1 \right), \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{D_2} \left(F_{1,2} - F_{2,3} - \frac{E_{tf,2}}{\rho_w} - R_2 \right), \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial w_3}{\partial t} = \frac{1}{D_3} (F_{2,3} - F_3 - R_3), \quad (5.7)$$

gde je w_i - zapreminski sadržaj vode u i -tom sloju tla, D_i - debljina i -tog sloja, P_1 - brzina infiltracije padavina u gornji sloj tla, $F_{i,i+1}$ - fluks vode između i -tog i $i+1$ sloja, F_3 - fluks vertikalne drenaže kroz donju granicu, R_i - podzemno horizontalno oticanje iz i -tog sloja tla, a $E_{tf,1}$ i $E_{tf,2}$ su članovi kojima se parametriše izgubljen deo vode u procesu transpiracije iz prvog i drugog sloja tla, redom, koji zadovoljavaju relaciju $E_{tf,1} + E_{tf,2} = E_{tf}$ (Mihailović, 1991).

Turbulentni fluksevi su opisani preko već pomenute otporne reprezentacije po analogiji sa Omovim zakonom, a particionisanje flukseva na osetnu i latentnu toplotu izvršeno je za različite slojeve sheme. Fluksevi osetne (H_f) i latentne toplote (λE_f) sa lista u vazduh unutar biljnog sklopa izračunati su preko relacija

$$H_f = \rho c_p \frac{2(T_f - T_a)}{r_b}, \quad (5.8)$$

$$\lambda E_f = \left(e_s^*(T_f) - e_a \right) \frac{\rho c_p}{\gamma} \left(\frac{W_f}{r_b} + \frac{1 - W_f}{r_b + r_s} \right), \quad (5.9)$$

gde su sa indeksom „f“ obeležene veličine vezane za list, a druge veličine su ρ – gustina vazduha, C_p – specifična toplota pri konstantnom pritisku, γ – psihrometerska konstanta, T_f – temperatura lista, T_a – temperatura vazduha unutar biljnog sklopa, r_b – rezultujući otpor površinskog sloja vegetacije,

r_s – otpor stome na difuziju, $e_s^*(T_f)$ maksimalan pritisak vodene pare na temperaturi biljke, e_a – pritisak vodene pare na temperaturi vazduha, W_f – deo površine vegetacije koji je pokriven vodom.

Relacije kojima se izračunavaju fluksevi osetne (H_{gs}) i latentne toplote (λE_{gs}) sa zemljišta u vazduh unutar biljnog sklopa su oblika

$$H_{gs} = \rho c_p \frac{2(T_{gs} - T_a)}{r_d}, \quad (5.10)$$

$$\lambda E_{gs} = \frac{(\alpha_s e_s^*(T_{gs}) - e_a) \rho c_p}{r_b + r_d} \frac{\rho c_p}{\gamma}, \quad (5.11)$$

gde je sa indeksom „gs“ obeležena površina zemlje, dok su ostale veličine T_{gs} – temperatura površine tla, $e_s^*(T_{gs})$ – maksimalni pritisak vodene pare na temperaturi T_{gs} , r_d – aerodinamički otpor između površine tla i vazduha unutar biljnog sklopa, i α_s – faktor koji uračunava vlažnost zemljišta.

Fluksevi osetne (H_{gs}) i latentne toplote (λE_{gs}) iz vazduha unutar biljnog sklopa do referentnog nivoa iznad biljnog sklopa predstavljeni su u obliku

$$H_r = H_f + H_{gs} = \rho c_p \frac{(T_a - T_r)}{r_a}, \quad (5.12)$$

$$\lambda E_r = \lambda E_f + \lambda E_{gs} = \frac{\rho c_p}{\gamma} \frac{(e_a - e_r)}{r_a}, \quad (5.13)$$

gde je indeksom „r“ obeležen referentni nivo, a veličine T_r – temperature vazduha na referentnom nivou, e_r – pritisak vodene pare na referentnom nivou i r_a – aerodinamički otpor kretanju vazduha između referentnog nivoa i biljnog sklopa ujedno predstavljaju i osnovne ulazne veličine.

Neto fluks zračenja izražen je preko sume flukseva apsorbovanih od strane biljnog pokrivača ($R_{neto,f}$) i tla ($R_{neto,gs}$)

$$R_{neto,f} = R_{k,f} + R_{d,f}, \quad (5.14)$$

$$R_{neto,gs} = R_{k,gs} + R_{d,gs} \quad (5.15)$$

gde su $R_{k,f}$ i $R_{k,gs}$ fluks kratkotalasnog zračenja apsorbovan na vegetaciji i tlu, respektivno, $R_{d,f}$ i $R_{d,gs}$ fluks dugotalasnog zračenja apsorbovan na vegetaciji i tlu. Detaljna parametrizacija zračenja data je u Mihailovic (1996).

Testiranje kvaliteta simulacija mikrometeoroloških veličina LAPS shemom, kalibracija i verifikacija sheme izvršena je na četiri šumska lokaliteta u različitim klimatskim uslovima na mesečnim setovima podataka. Kvantitativna analiza dobijenih rezultata prikazana je u poglavlju 6.3.

5.1.2 MLC-Chem shema

Višeslojna hemijska MLC-Chem shema koja se koristi za simulaciju razmene reaktivnih gasovitih jedinjenja i aerosola između biosfere i atmosfere inicijalno je razvijena radi implementacije u *Single Column chemistry and climate Modeling system* (SCM) (Ganzeveld et al., 2002a). Dizajnirana je u obliku softverskog paketa koji se može pokretati samostalno ili u okviru hemijskog i hemijskog-klimatskog modela. Za razliku od ostalih shema sličnih karakteristika, razlog za izbor MLC-Chem sheme je njena upotreba u okviru modela širokih razmera. MLC-Chem je inkorporirana u *Global chemistry-climate modeling system* ECHAM4 modela radi predviđanja uticaja vegetacije na globalnu emisiju NO_x iz zemljišta (Ganzeveld et al., 2002b). Značaj interakcije između atmosfere i biosfere prepoznat je od strane autora, pa je ključni deo razvoja MLC-Chem sheme bio parametrizacija karakteristika biljnog sklopa i uticaj vegetacionog pokrivača na kompleksnu hemijsku strukturu PS (Ganzeveld and Lelieveld, 2004; Ganzeveld et al., 2006a). Hemijski modul unutar MLC-Chem delom obuhvata karakteristične reaktivne hemijske vrste, kao što je na primer NO_x (Seok et al., 2013), a delom nekaracteristične sekundarne proizvode hemijskih reakcija, kao što su peroksidi, VOC (izopren, monoterpeni) i hidroksilni jon (Ganzeveld et al., 2006b). Hemijska shema unutar MLC-Chem obuhvata koncentraciju metana (CH_4), ugljen-monoksida (CO), grupe NO_x , grupe NO_y (NO, NO_2 , peroksi azotne kiseline (HNO_4), nitrata (NO_3), azot-pentoksida (N_2O_5), metil peroksiacetil nitrata (MPAN) i azotne kiseline (HNO_3)), hidroksilnog jona (OH), O_3 i nemetanskih ugljovodonika (formaldehida (CH_2O), viših aldehida i acetona (CH_3COCH_3)). Sva ova jedinjenja uvrštena su u CBM4 hemijsku shemu koja je upotrebljena u MLC-Chem i koju smo predstavili u poglavlju 4.3.

MLC-Chem shema koristi osmotrene vrednosti polutanata (NO_x , CO, O_3 , i dr.) i osmotrene vrednosti temperature, brzine vetra, intenziteta PAR, vlažnosti vazduha i padavina iznad biljnog sklopa na referentnom nivou kao ulazne podatke. Vrednosti koncentracija polutanata na referentnom nivou koriste se za proračun njihove vrednosti na visini biljnog sklopa. Značajna odlika modela je postupak približavanja simuliranih vrednosti koncentracija u sloju vazduha između referentne visine i biljnog sklopa, osmotrenim vrednostima. Dati postupak se koristi radi uračunavanja advekcije vazduha iz urbanih regija i naglih promena u koncentracijama izazvanim spoljašnjim uticajem s obzirom da shema ne poseduje modul koji računa advekciju (Ganzeveld et al., 2002a). Ukoliko se shema koristi kao deo globalnog modela, tada se advekcija uzima u obzir.

Struktura sheme je formirana uzimajući u obzir da se promena koncentracije određene hemijske supstance u određenom sloju atmosfere dominantno odvija preko sledećih procesa: a) turbulentnog transporta uz emisiju primarnih ili sekundarnih reaktanata iz zemljišta i biljnog sklopa, b) uklanjanjem mase suvom depozicijom na različitim kontaktnim površinama (receptorima) i c) produkcijom ili destrukcijom posmatrane supstance u hemijskim reakcijama. U toku jednog vremenskog koraka svi ovi procesi simultano će da utiču na promenu koncentracije polutanata. Moduli iskorišćeni u MLC-Chem shemi opisani su u glavi 4. Za modeliranje emisije iz zemljišta iskorišćen je Jinger i Levi (Yienger and Levy, 1995) algoritam (poglavlje 4.2). Uticaj suve depozicije na koncentracije polutanata izračunat je prema Vesliovoj otpornoj reprezentaciji (Wesely, 1989) (poglavlje 4.1). Otpori za karakteristične hemijske vrste se dobijaju preko njihove rastvorljivosti u vodi i reaktivnosti u gasnoj fazi. Otpori iz originalne verzije rada korigovani su u MLC-Chem prema

različitim eksperimentima i pojavom dostupnih izmerenih vrednosti koncentracije gasova i aerosola u različitim uslovima sredine (Ganzeveld and Lelieveld, 1995; Ganzeveld et al., 1998). Turbulentni transport iznad i unutar vegetacije predstavljen je preko K -sheme razmatrane u podpoglavlju 2.2.2.

Model biljnog sklopa MLC-Chem sheme kompatibilan je sa LAPS-ovim i predstavljeni su u obliku sendvič modela. Biljni sklop je podeljen na dva dela, prvi koji ispunjava krošnja drveća i drugi čija je gornja granica visina baze biljnog sklopa, a donja površina zemlje. Za potrebe računanja profila zračenja unutar biljnog sklopa, koji je osnova za računanje intenziteta fotodisocijacije ključnih hemijskih vrsta (NO_2 , O_3), dvoslojni model je podeljen u četiri sloja sa konstantnom gustinom biljnog sklopa.

MLC-Chem shema ne obuhvata izračunavanje turbulentnog transporta energije i količine kretanja čime su mogućnosti upotrebe u modelima širih razmera značajno ograničene. Pored toga, iako shema zahteva ulazne vrednosti količine vlage u zemljištu na koju su pojedine simulacije izuzetno osetljive (npr. stomatarni otpor), shema ne poseduje fizički model za kvantifikaciju vlage niti temperature zemljišta.

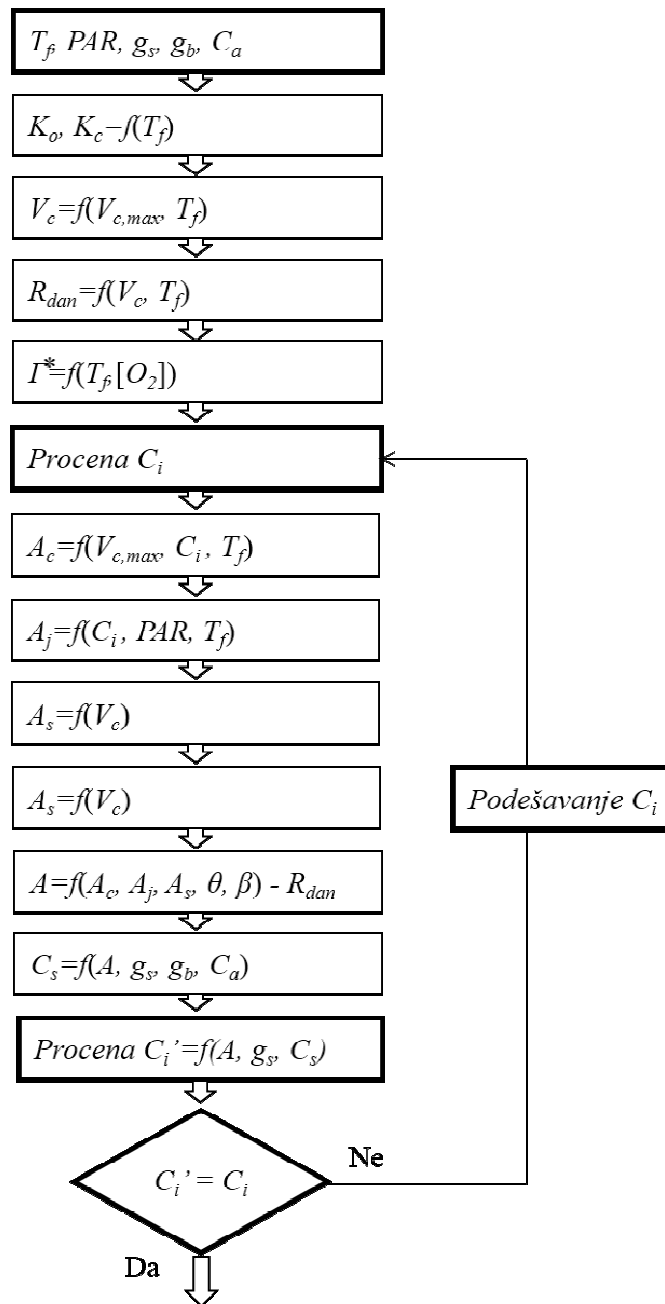
Simulacije koncentracije NO_x unutar biljnog sklopa i izračunate vrednosti turbulentnog fluksa iznad biljnog sklopa dobijene korišćenjem MLC-Chem sheme uz proračun koncentracija sekundarnih proizvoda hemijskih reakcija predstavljen je u poglavlju 6.4 uz kvantitativnu analizu dobijenih rezultata.

5.2 Modul za parametrizaciju turbulentnog fluksa CO_2 – CO_2 modul

FvCB model za parametrizaciju intenziteta fotosinteze napravio je revoluciju u razvoju SVAT shema. Od objavljivanja osnovnog modela 1980. godine model je zamenio sve do tada postojeće algoritme za računanje intenziteta fotosinteze. Vremenom su se javile i varijacije FvCB modela koje su se razlikovale prema načinu skaliranja veličina sa lista na biljni sklop (de Pury and Farquhar, 1997; Sellers et al., 1992), računanju V_c (Sellers et al., 1992), iterativnom ili analitičkom rešavanju sistema jednačina (Baldocchi, 1994), broju limitirajućih faktora (Collatz et al., 1991), načinu računanja difuznog otpora stoma (Leuning, 1990) i dr.

U ovom radu iskorišćen je osnovni FvCB model za proračun razmene CO_2 između atmosfere i biosfere tako što je kreiran u obliku dodatnog potprograma. Izdvajanje je izvršeno radi efikasnosti proračuna u zavisnosti od ulaznih podataka. Jednačine iskorišćene za proračun GPP predstavljene su u podpoglavlju 3.2.1. Blok shema 5.1 pokazuje redosled operacija koje se izvode u svakom računskom koraku SVAT sheme za koju je modul vezan CO_2 modul. Ulazni podaci, temperatura lista, PAR, vlažnost vazduha, koncentracija CO_2 u vazduhu koji okružuje list, stomatarni otpor i otpor transportu CO_2 iz vazduha do stome, koriste se za izračunavanje vrednosti fizioloških parametara. Sistem jednačina koji zapravo čini okosnicu FvCB modela rešava se iterativno ili analitički. Blok shema 5.1 opisuje proceduru iterativnog rešavanja jednačina koje zapravo ograničavaju intenzitet fotosinteze u odnosu na dostupnu količinu energije zračenja i količine CO_2 (jednačine 3.14–3.16). Jednačine se rešavaju dok se ne dostigne odgovarajuća vrednost CO_2 unutar lista. Ukoliko uslov nije

ispunjen jednačine se rešavaju sa dobijenom novom vrednošću koncentracije unutar lista. Konvergencija se najčešće javlja već u trećem koraku.



Slika 5.1 Blok shema iterativnog postupka rešavanja jednačina u CO₂ modulu.

Proces fotosinteze odvija se na najmanjem prostornom razmeru unutar modela, na listu, što zahteva poznavanje veličina unutar biljnog sklopa i na lisnoj površini. Meteorološke ulazne veličine obezbeđuje LAPS shema koja izračunava temperaturu i vlažnost vazduha unutar biljnog sklopa. Parametrizacija uvrštena u FvCB model u obzir uzima samo kretanje mase iz vazduha unutar biljnog sklopa do površine lista i nazad. Takvo kretanje izuzima promenu koncentracije CO₂ sa visinom. Veličine koje se smatraju konstantnim sa visinom unutar biljnog sklopa su CO₂, temperatura i

vlažnost vazduha. Iako pretpostavka o konstantnim vrednostima nije fizički opravdana, izmereni vertikalni profili datih veličina u gustom šumskom sklopu pokazuju da se ona ipak može koristiti zarad održavanja složenosti modela. Jedina veličina od koje zavisi fotosinteza na listu, a za koju se ne uzima konstantna vrednost prilikom računanja u FvCB je PAR.

Iako se osnovni FvCB model pokazao kao vrhunski alat u simuliranju intenziteta fotosinteze na listu, samo parametrizacija fotosinteze nije dovoljna da bismo izračunali turbulentni fluks CO₂. Kao što je naglašeno u poglavlju 3.3 neophodno je izvršiti skaliranja veličina od interesa sa nivoa lista na ceo biljni sklop. U sklopu CO₂ modula iskorišćena su dva postupka skaliranja, SS - predložen od strane de Puri i Farkvara (de Pury and Farquhar, 1997) (podpoglavlje 3.3.2) i unapređeni SS - predložen u ovom radu i opisan u nastavku (Firanj et al., 2014). Verifikacija CO₂ modula izvršena je na četiri lokaliteta i data je u poglavlju 6.5. Poređenje predloženog procesa skaliranja sa osnovnim uz kvantitativnu analizu dobijenih rezultata dato je u poglavlju 6.6. Verifikacija predloženog SSL principa skaliranja uz testove osetljivosti na karakteristike biljnog sklopa i uticaj spratnosti vegetacije na ukupan GPP simuliran preko SSL skaliranja predstavljeni su u podpoglavljima 6.6.1 i 6.6.2.

5.2.1 Nedostaci SS postupka skaliranja turbulentnog fluksa CO₂

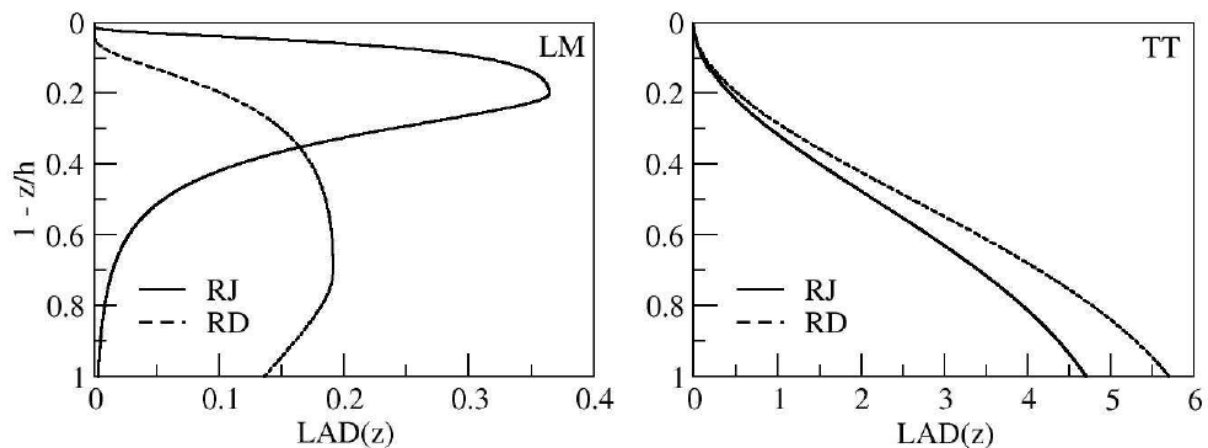
Nedostaci SS postupka skaliranja proizilaze iz nedovoljno dobre parametrizacije strukture biljnog sklopa u kojoj se pretpostavlja jednaka distribucija lisne površine po visini. Pretpostavka o uniformnoj distribuciji lisne površine u višeslojnom modelu korišćena je zbog pojednostavljivanja procesa integracije jednačina po visini koje daju ukupnu vrednost GPP biljnog sklopa. Međutim, konstantan $LAD(z)$ u prirodi se javlja samo u izuzetno homogenim biljnim sklopovima. Skaliranje zasnovano na SS principu, uz zanemarivanje vertikalne heterogenost biljnog sklopa, unosi greške u postupak modeliranja svih veličina koje direktno zavise od $LAD(z)$. U procesu skaliranja fotosinteze sa osenčenih i osunčanih listova, podela na intenzitet direktnog i difuznog zračenja, bez kojih se proces ne odvija, od krucijalnog je značaja za adekvatnu parametrizaciju. SS postupak parametrizacije određuje samo količinu zračenja koju će posmatrani biljni sklop da propusti do tla i ne razlikuje spratnost vegetacije. Prema tome, SS princip skaliranja ne pravi razliku u apsorpciji CO₂ od strane četinarskih ili listopadnih šuma čija se lisna površina koncentriše na različitim visinama unutar biljnog sklopa. Poseban problem nastaje ukoliko se prognoza NEE radi za šumski sklop sa gustom nižom vegetacijom do koje dolazi mali intenzitet zračenja, ali koja zbog visokog fotosintetskog kapaciteta, nastalog adaptacijom na uslove sredine, značajno menja NEE snažno apsorbujući CO₂ oslobođen u procesu respiracije tla.

5.2.2 Novi postupak skaliranja turbulentnog fluksa CO₂ - SSL postupak

Proces skaliranja razmene CO₂ sa lista na ceo biljni sklop oslanja se na tačnost parametrizacije meteoroloških elemenata iznad i unutar vegetacije i kompleksnosti parametrizacije arhitekture biljnog sklopa. Osnovni procesi skaliranja, trenutno zastupljeni u literaturi, zasnovani su

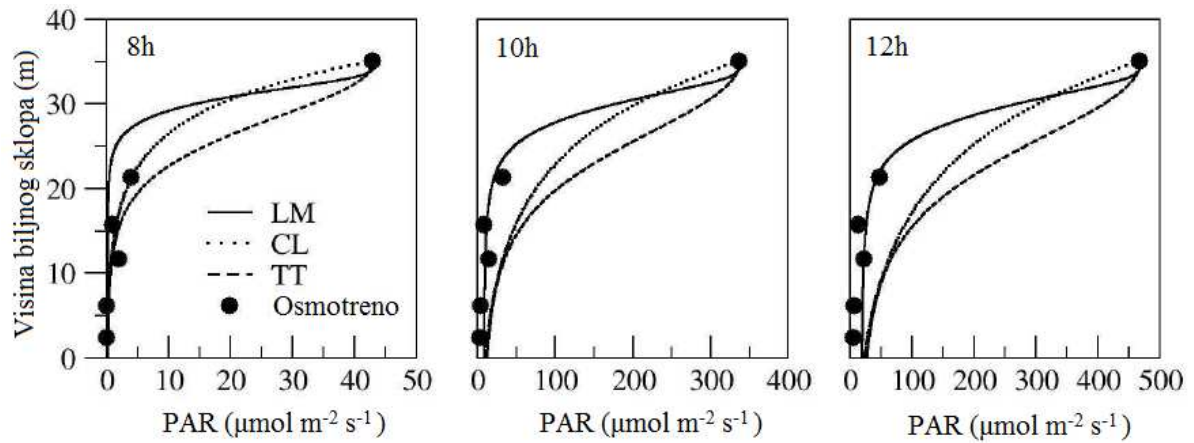
na pretpostavkama da je biljni sklop sastavljen od ravnomerno vertikalno raspoređene biljne mase i profila zračenja izvedenog iz Lamber-Berovog zakona u funkciji LAI .

Unapređivanje procesa skaliranja započelo je konceptom predloženim od strane Kočenovice i sar. (Kotchenova et al. 2004), koji su pokazali da detaljniji opis strukture biljnog sklopa i fizički realističnije modeliranje profila PAR-a unutar biljnog sklopa smanjuje greške prilikom modeliranja GPP u različitim vremenskim i prostornim koracima. Kao što smo već naglasili u podpoglavlju 2.4.6, struktura biljnog sklopa u SVAT modelima opisuje se preko LAI i vertikalne distribucije LAI , odnosno $LAD(z)$. Kriterijumi za izbor odgovarajućeg $LAD(z)$ bili su kvalitet parametrizacije profila PAR, fizički realan opis strukture biljnog sklopa i broj potrebnih parametara. Poređenje profila PAR unutar biljnog sklopa dobijenih sa različitim $LAD(z)$ prikazali su Lalić i sar. (Lalić et al., 2013). Izračunavanje intenziteta zračenja, koje stigne do različitih visina unutar biljnog sklopa, izvedeno je preko jednačine 5.15, u nastavku teksta, koja opisuje uticaj $LAD(z)$ na proračun profila PAR. Prilikom testiranja korišćeni su $LAD(z)$ opisani u podpoglavlju 2.3.6. Verifikacija $LAD(z)$ koncepta iskorišćenog za modeliranje profila PAR unutar biljnog sklopa izvedena je na 615 profila zračenja osmotrenih u periodu od 8 do 18 časova, u toku 72 dana na dve lokacije u Amazonskoj šumi na lokalitetima Reserva Jaru (RJ) i Reserva Duche (RD) (slika 5.2). Rezultati koje su predstavili Lalić i sar. (Lalić et al., 2013) pokazali su da $LM_{LAD(z)}$ daje



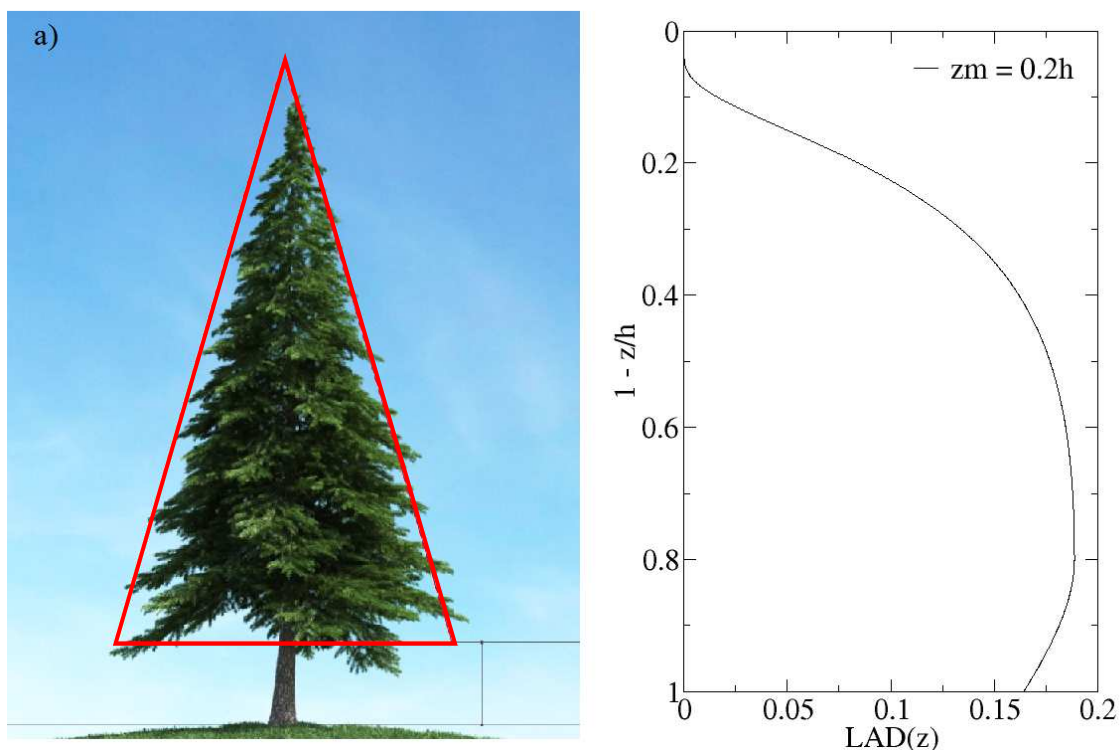
Slika 5.2 $LM_{LAD(z)}$ i $TT_{LAD(z)}$ profili izračunati za dve lokacije RJ i RD u amazonskoj šumi.

statistički bolje rezultate od $TT_{LAD(z)}$ i konstantnog $LAD(z)$ prilikom proračuna intenziteta zračenja na različitim visinama unutar biljnog sklopa, što se može uočiti i na slici 5.3 koja predstavlja jedan od rezultata objavljenih od strane Lalić i sar. (Lalić et al., 2013). Takođe, značajna prednost je i veća

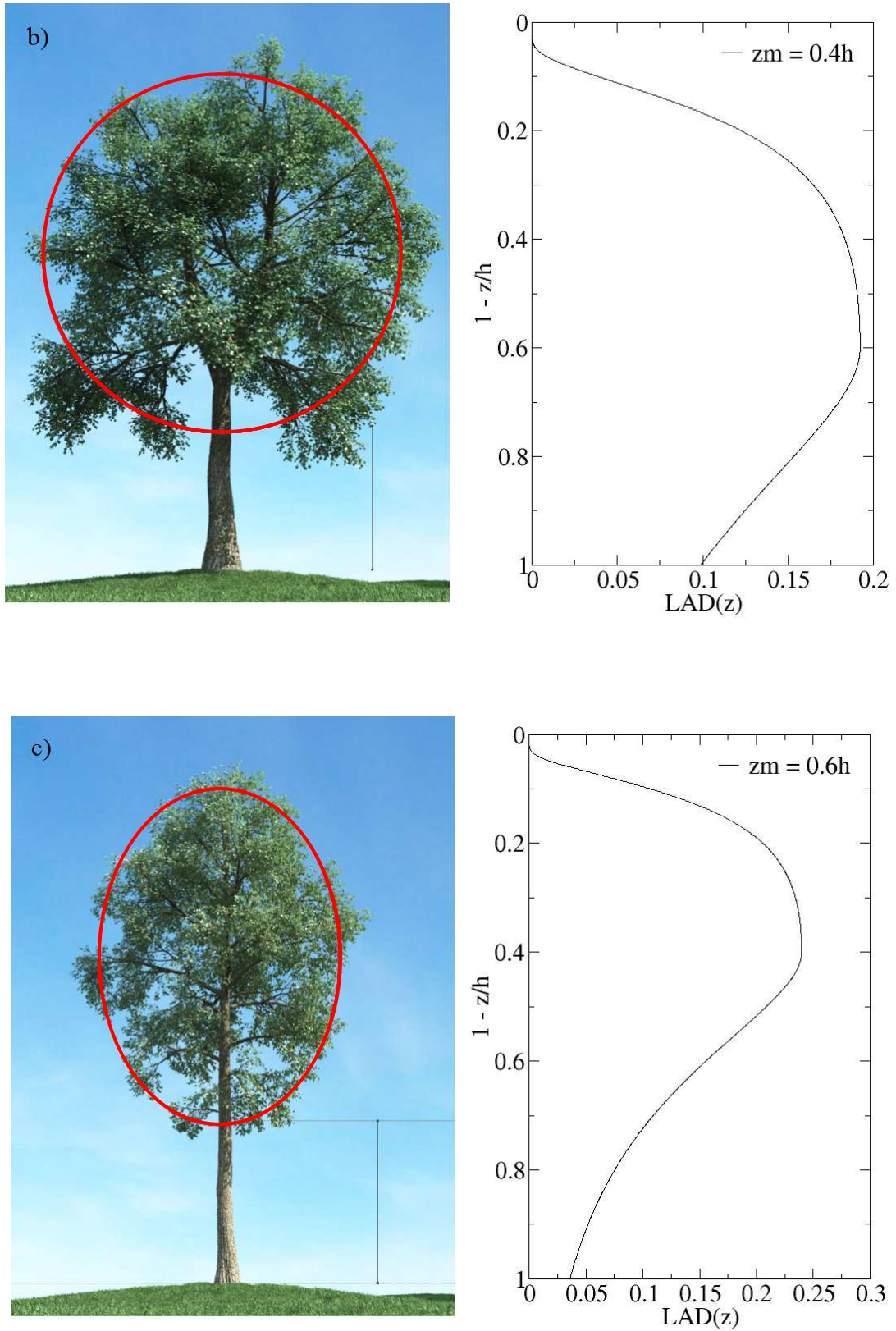


Slika 5.3 Poređenje profila zračenja izračunatih za RJ lokalitete sa tri LAD profila: $LM_{LAD(z)}$, $TT_{LAD(z)}$ i osnovnim logaritamskim $CL_{LAD(z)}$.

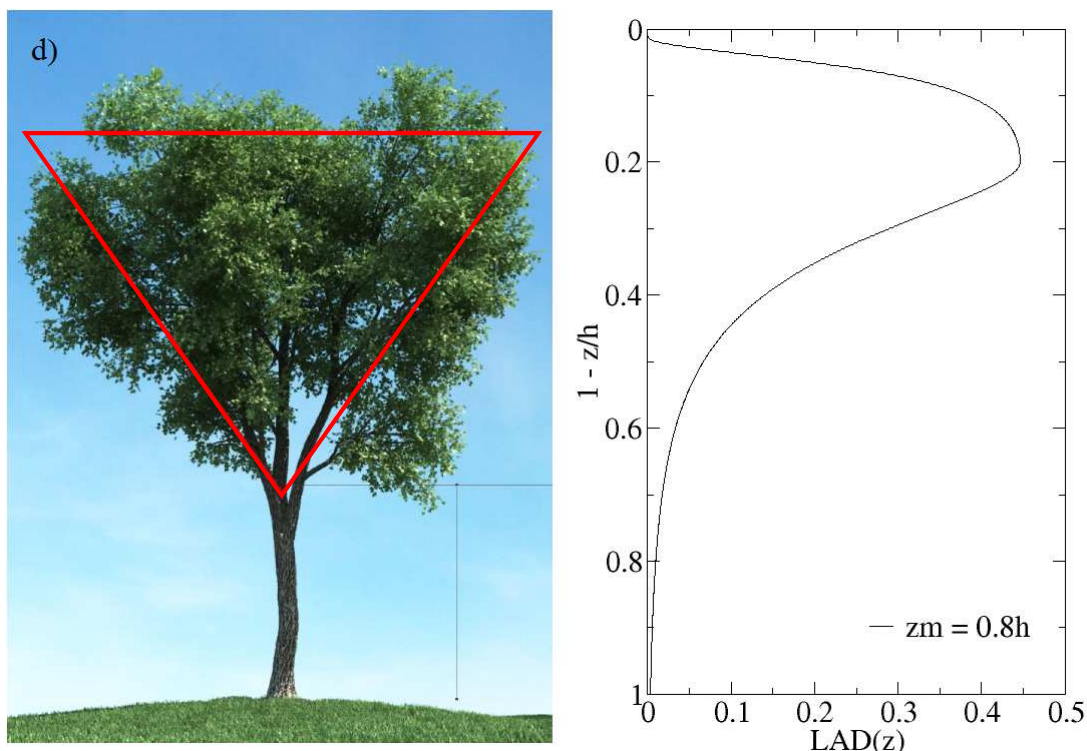
osetljivost na različite oblike krošnje drveća (slika 5.3 i 5.4). Imajući u vidu ove rezultate, za opis distribucije lisne površine koja vrši fotosintezu i razmenu gasova sa atmosferom izabrali smo $LM_{LAD(z)}$ profil.



Slika 5.4 Nastavak na drugoj strani.



Slika 5.4 Nastavak na drugoj strani.



Slika 5.4 $LM_{LAD(z)}$ i oblici krošnji zastupljeni u ekološkim modelima

a) trouglaste na dole (četinari), b) loptaste (staro listopadno drveće), c) ovalne (mlado listopadno drveće), d) trouglaste na gore (tropske šume i stare listopadne šume).

Aplikacija višeslojnog modela biljnog sklopa u procesu skaliranja GPP zahteva detaljne informacije o vertikalnoj distribuciji lisne površine, intenziteta fotosinteze i intenziteta PAR, dok se koncentracija CO_2 i temperature mogu smatrati nepromenljivim unutar biljnog sklopa (Calvet et al., 1998).

Izabrani $LM_{LAD(z)}$ iskoristili smo da predstavimo ukupan LAI biljnog sklopa zamenom jednačine 2.77 u jednačinu 5.16

$$LAI = \int_0^h LAD(z) dz = \int_0^h L_m \left(\frac{h - z_m}{h - z} \right) e^{\left\{ n \left[1 - \left(\frac{h - z_m}{h - z} \right) \right] \right\}} dz \quad (5.16)$$

gde vrednost parametra n varira u odnosu na visinu za koju se računa gustina biljnog sklopa, kao što je prikazano u podpoglavlju 2.3.6. Uvođenjem $LAD(z)$ u skaliranje, sve veličine koje su do sada zavisile od LAI , dobile su drugu dimenziju, raspodelu po visini i osetljivost na vertikalnu heterogenost biljnog sklopa. Profil direktnog sunčevog zračenja dobio je oblik verifikovan od strane autora Lalić i sar. (Lalic et al., 2013)

$$I(z) = I_h e^{-\frac{k'}{\cos \vartheta} \int_z^h LAD(z) dz}, \quad (5.17)$$

gde je $I(z)$ - intenzitet PAR na nekoj visini z unutar biljnog sklopa, gde je k' faktor transmitivnosti biljnog sklopa koji zavisi od vrste šume, ϑ – zenitni ugao. Zamenjujući jednačinu 5.16 u eksponencijalni oblik parametrizacije vertikalne distribucije osunčanih i osenčenih listova po visini biljnog sklopa (jednačina 3.41) dobijamo

$$f_{sun,l}(z) = e^{-\frac{k'}{\cos\vartheta} \int_z^h LAD(z) dz}, \quad (5.18)$$

$$f_{sha,l}(z) = 1 - f_{sun}(z). \quad (5.19)$$

Izračunavanjem distribucije $f_{sun,l}(z)$ i $f_{sha,l}(z)$ i integracijom po $LAD(z)$, koji u ovom slučaju zamenjuje vertikalnu osu, mogu se izraziti vrednosti $LAI_{sun,l}$ i $LAI_{sha,l}$ za ceo biljni sklop, prema jednačinama

$$LAI_{sun,l} = \int_0^{Lc} f_{sun,l}(L) dL = \int_0^{Lc} e^{-\frac{k'}{\cos\vartheta} \int_z^h LAD(z) dz} dL, \quad (5.20)$$

$$LAI_{sha,l} = LAI - LAI_{sun,l}. \quad (5.21)$$

Fotosintetski aktivno zračenje koje dospe do osunčanih listova predstavlja sumu intenziteta direktnog, difuznog i rasejanog zračenja, dok do osenčenih listova dospeva samo difuzno i rasejano zračenje. Prema tome, u jednačine koje opisuju ukupan intenzitet zračenja koje primi osunčani i osenčeni list (jednačine 3.43 i 3.44) iz SS skaliranja uveli smo jednačinu 5.16, tako da smo dobili da je

$$I_{sun,l} = \int_0^{Lc} I_{beam} e^{-k_b \int_z^h LAD(z) dz} dL + \int_0^{Lc} I_{diff} e^{-k_d \int_z^h LAD(z) dz} dL + \int_0^{Lc} I_{sca} e^{-k_s \int_z^h LAD(z) dz} dL, \quad (5.22)$$

$$I_{sha,l} = \int_0^{Lc} I_{diff} e^{-k_d \int_z^h LAD(z) dz} dL + \int_0^{Lc} I_{sca} e^{-k_s \int_z^h LAD(z) dz} dL, \quad (5.23)$$

Svaki profil zračenja vezan je za karakterističan koeficijent propustljivosti biljnog sklopa, koeficijent $k_b=0,46/\cos\vartheta$ za direktno, $k_d=0,719$ za difuzno i $k_s=0,46/\cos\vartheta$ za rasejano direktno zračenje. Vrednosti koeficijenata transmisije preuzeti su iz de Puri i Farkvara (de Pury and Farquhar, 1997).

Poznavanje profila zračenja unutar biljnog sklopa omogućava razvijanje funkcija ostalih veličina koje od njega direktno zavise. Intenzitet fotosinteze, pored intenziteta zračenja, zavisi i od količine hranljivih materija, čija raspodela po visini zavisi od količine biljne mase, odnosno LAI . Prema tome, i profil azota u biljkama može se predstaviti u obliku eksponencijalne funkcije koja opisuje smanjenje koncentracije dostupnog azota sa visinom. Koristeći jednačinu 5.16 dobijamo karakterističan profil azota koji zavisi od strukture biljnog sklopa u obliku

$$N = N_h e^{-k_n LAI} = N_h e^{-k_n \int_z^h LAD(z) dz}. \quad (5.24)$$

Prema SS metodu skaliranja vrednost V_{cmax} zavisi od profila dostupnog azota. Ako se pretpostavi da je poznata vrednost za V_c listova koji se nalaze na vrhu biljke, a koja zavisi od vrste biljke i određuje se eksperimentalno, može se upotrebiti jednostavna linearna zavisnost između profila N i V_c prema SS principu skaliranja tako da je $V_c(z) = \chi_n N(z)$. Uzimajući u obzir da listovi direktno izloženi zračenju i listovi u senci poseduju različite fotosintetske kapacitete, $V_{c,sun}$ i $V_{c,sha}$ možemo zapisati

$$V_{c,sun} = \int_0^{L_c} V_c(L) f_{sun}(L) dL = \int_0^{L_c} \chi_n N_h e^{-k_n \int_z^h LAD(z) dz} e^{-\frac{k'}{\cos \theta} \int_z^h LAD(z) dz} dL, \quad (5.25)$$

$$V_{c,sha} = 1 - V_{c,sun}. \quad (5.26)$$

Konačno, intenzitet fotosinteze ($A_{SSL/sum}$) izražava se numeričkom integracijom integracije profila zračenja ($I_{sun,l}(L)$ i $I_{sha,l}(L)$), azota ($N(z)$) i fotosintetskog kapaciteta ($V_{c,sun}(L)$ i $V_{c,sha}(L)$) pojedinačno za osunčane i osenčene listove koji u sumi daju ukupan intenzitet fotosinteze za biljni sklop.

$$A_{SSL/sum} = \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\min(A_{c,sun}, A_{j,sun}, A_{s,sun}) - R_{d,sun} \right] + \left[\min(A_{c,sha}, A_{j,sha}, A_{s,sun}) - R_{d,sha} \right] \right\}_{sloj} (h_i). \quad (5.27)$$

5.3 Kaplovanje SVAT shema

Problem koji se javio prilikom upotrebe MLC-Chem sheme, kako samostalno tako i u okviru modela većih razmera, jeste nedovoljno razvijen opis mikrometeoroloških veličina unutar sheme koji je uzrokovao i nedovoljno tačan opis transporta gasova i aerosola unutar PS. Da bismo prevazišli ovaj problem kaplovali smo dve sheme, tako da je jedna odgovorna za modeliranje mikrometeoroloških veličina biljnog sklopa (LAPS shema), a druga za modeliranje razmene gasova i aerosola između biljnog sklopa i atmosfere (MLC-Chem shema). Komunikacija između shema ostvarena je preko meteoroloških veličina koje nisu deo MLC-chem sheme. Da bismo povećali kvalitet simulacija, mikrometeorološke veličine (temperatura unutar biljnog sklopa, temperatura lista i relativna vlažnost unutar biljnog sklopa) i Ričardsonov broj izračunati LAPS-om predati su MLC-chem shemi. Kaplovana MLC-LAPS shema sad poseduje mogućnost računanja turbulentnog fluksa mase, energije, količine kretanja, različitih reaktivnih jedinjenja, CO₂, vlažnosti zemljišta, i svih ostalih veličina koje su karakteristične za pojedinačne sheme. Rezultati koji su dobijeni korišćenjem MLC-LAPS sheme prikazani su u poglavlju 6.7.

6. VERIFIKACIJA KAPLOVANE MLC-LAPS SCHEME

6.1 Opis mernih mesta i podataka korišćenih za verifikaciju sheme

Validacija, odnosno verifikacija kaplovane MLC-LAPS površinske sheme započela je validacijom osnovnih shema i novih modula. Setovi podataka korišćeni prilikom validacije izmereni su u okviru tri velika mikrometeorološka eksperimenta: 1) Projekat *Boreal Ecosystem- Atmosphere Study* (BOREAS) (Sellers et al., 1997b), 2) Projekat *Harvard Forest - Environmental Measurement Site* (HF-EMS) (Munger and Wofsy, 1999a, 1999b), 3) Projekat *Anglo- Brazilian Amazonian Climate Observation Study* (ABRACOS) (Gash et al., 1996). Kriterijum za izbor lokaliteta za validaciju SVAT shema pored dostupnosti podataka bio je i karakterističan oblik biljnog sklopa, karakteristični klimatski uslovi kao i objavljivanje rezultata. U procesu verifikacije shema korišćeni su nizovi podataka od mesec dana, ili manje ukoliko je broj podataka u datom periodu bio manji. Granica je napravljena zbog merenja koja su pokazala da se u toku jednog letnjeg meseca, na severnoj Zemljinoj hemisferi, vrednost *LAI* održava relativno konstantnom. Izbor meseca je izveden preko osmotrenih podataka vrednosti *LAI*, literarnih podataka na svakom pojedinačnom lokalitetu i dostupnih podataka.

BOREAS projekat realizovan je na širokoj površini prirodnih severnih šuma Kanade. Intenzivne kampanje, uz dugoročna merenja, izvedene su u periodu od 1994. do 1996. godine na više od 11 lokaliteta podeljenih prema tipu vegetacije na severna merenja, zimzelena vegetacija i južna merenja, listopadna vegetacija. Projekat je realizovan u cilju identifikacije najvažnijih procesa interakcije između šuma i atmosfere, kao i uticaja ekosistema na klimatski sistem i obrnuto. U okviru projekta izvršena su merenja meteoroloških elemenata, vertikalnih profila mikrometeoroloških veličina, hidrologije, ekologije, biohemijskih ciklusa gasova, biofizičkih karakteristika zemljišta, fenologije i arhitekture biljnog sklopa, u cilju obezbeđivanja podataka za modele opšte cirkulacije atmosfere i odgovarajuće modele manjih razmera. Setovi podataka korišćeni u radu izmereni su na dve lokacije, severna smrekova šuma i južna jasikova šuma. Kriterijum za izbor lokaliteta u pogledu biljnih vrsta ogledao se u zahtevu za dominacijom jedne biljne vrste. Naime, modeliranje višespratnog šumskog sklopa (kome će u radu nakon završetka disertacije sigurno biti posvećena dužna pažnja) bi dodatno povećalo složenost problema.

Smrekova šuma spada u grupu severnih lokaliteta na kojima dominiraju četinarske šume (*Northern Study Area Old Black Spruce*, u daljem tekstu NSA-OBS). Srednja visina drveća je 10 m sa trouglastim oblikom krošnje u kojoj se maksimum gustine krošnje javlja na većoj visini nego kod drugih zimzelenih vrsta sa dugačkim otkrivenim stablom (slika 6.1). Merenja su postavljena da bi poslužila za kalibraciju i validaciju SVAT, ekoloških, hidroloških ili bioloških modela i obuhvatila su polusatne vrednosti temperature vazduha, kratkotalasnog i neto zračenja, vlažnosti vazduha, brzine i pravca vetra, padavina i koncentracije CO₂. Merenja turbulentnih flukseva osetne i latentne toplote, kao i NEE izvedena su na visini od 5 m iznad biljnog sklopa. Merenja obavljena na tornju predstavljaju osnovni set podataka za inicijalizaciju i puštanje LAPS sheme.



Slika 6.1 Smrekova šuma, NSA-OBS.
[<http://daac.ornl.gov/BOREAS/bhs/Sites/NSA-OBS.html>]

Listopadna jasikova šuma spada u južno područje obuhvaćeno BOREAS projektom (*South Study Area Old Aspen*, u daljem tekstu SSA-OA). Prosečna starost šume je 70 godina i uspostavljena je posle šumskog požara. Prosečna visina stabala je 21 m, dok je visina baze krošnje na približno 15 m. Gustina biljnog sklopa je 830 stabala ha⁻¹. Za razliku od ostalih, na SSA-OA lokalitetu javlja se niži sprat unutar biljnog sklopa sačinjen pretežno od stabala lešnika visine 2 m (slika 6.2). Tekstura zemljišta je praškasta ilovača, a korenov sistem prodire do dubine od 60 cm. Mikrometeorološka merenja na tornju su obuhvatila polusatne vrednosti temperature vazduha, kratkotalasnog zračenja, vlažnosti vazduha, brzine i pravca vetra, padavina zabeležene na mikrometeorološkim stanicama i koncentracije CO₂. Na visini od 5 m iznad biljnog sklopa postavljen je sistem za merenje turbulentnih

flukseva latentne i osetne toplote i NEE. Posebne kampanje su uvrstile merenja vertikalnih profila flukseva da bi se utvrdio uticaj nižeg sklopa lešnika na ukupni NEE izmeren iznad biljnog sklopa.



Slika 6.2 Jasikova šuma, SSA-OA.
[<http://daac.ornl.gov/BOREAS/bhs/Sites/SSA-OA.html>]

Tropska šuma u Rezerva Jaru (Brazil) (u daljem tekstu ABR- RJ) deo je ABRACOS projekta, čiji cilj je bio monitoring klime Amazonskih šuma, proučavanje efekta krčenja šuma i obezbeđivanje ulaznih podataka za modele različitih prostornih i vremenskih razmera. Merenja su organizovana u kampanjama u sušnom i vlažnom periodu 1991. i 1992. godine. Tlo je u potpunosti prekriveno vegetacijom u okolini mernog mesta (slika 6.3). Prosečna visina biljnog sklopa je 33 m, a LAI iznosi $4,3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ uz veliku gustinu biljnog pokrivača koji propušta samo mali procenat zračenja u niže slojeve biljnog sklopa. Mikrometeorološka merenja izvedena su na automatskim meteorološkim stanicama unutar (5, 10, 15, 20, 25 m) i iznad biljnog sklopa (35 i 52 m), i uključila su merenje intenziteta globalnog i neto zračenja, fluksa toplote u zemljištu, temperature suvog i vlažnog termometra, brzine i pravac vetra, količine padavina, intenziteta isparavanja, koncentracije i fluksa CO_2 .



Slika 6.3 Tropska šuma, ABR-RJ.
[https://lba.inpa.gov.br/lba/lba_ingles/prelba/abracos/climate.html].

Tabela 6.1 Osnovni podaci o četiri lokaliteta korišćena u verifikaciji LAPS, MLC-Chem i MLC-LAPS sheme.

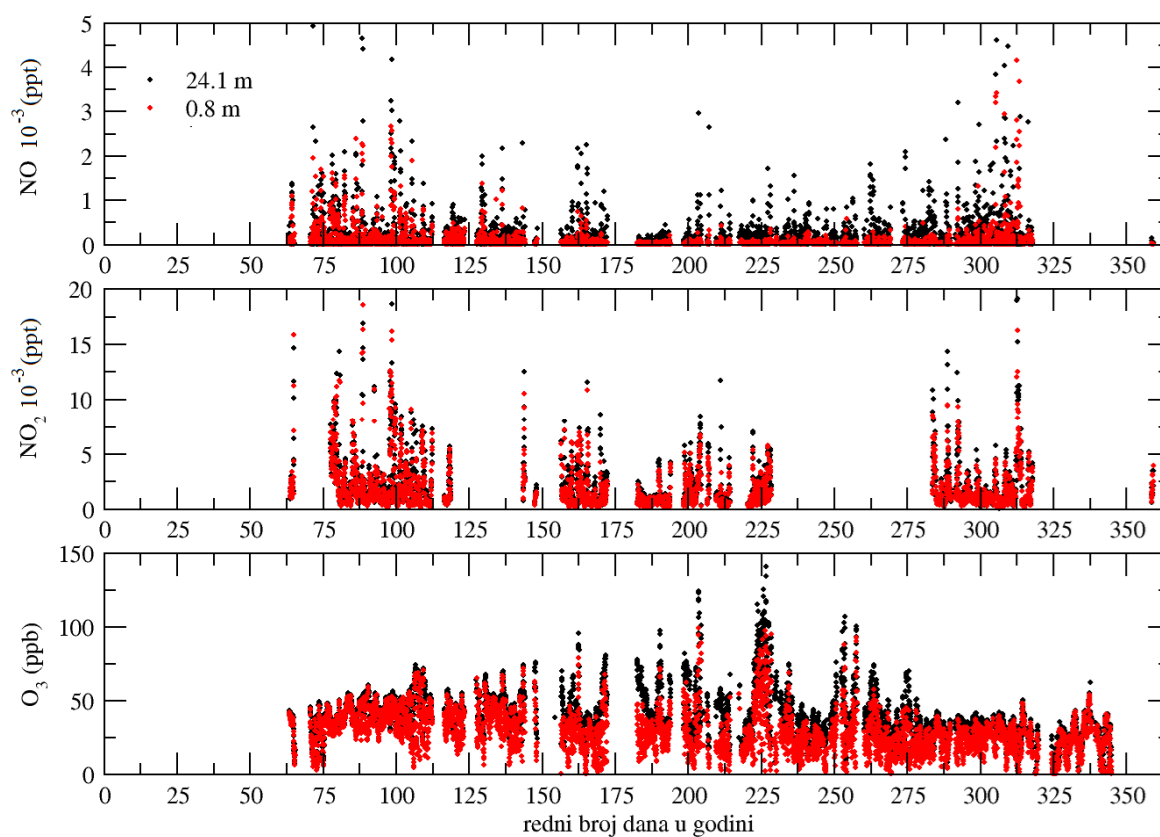
Podaci	NSA-OBS	SSA-OA	HF-EMS	ABR-RJ
Geografska širina	55,88° N	53,63° N	42,54° N	10,08° S
Geografska dužina	98,48° W	106,20° W	72,17° W	61,92° W
mesec/godina	06/1996	08/1996	07/2006	09/1992
Tip šume	Zimzelena	Listopadna	Listopadna	Tropska
Srednja visina vegetacije (m)	10	21.5	24	33
Srednja vrednost <i>LAI</i> u vegetacionom periodu (m ² m ⁻²)	1.9	2.7	4.0	4.3
Srednja godišnja temperatura (°C)	-3,9	0,4	8,1	24,8
Srednja godišnja količina padavina (mm)	590	467	1100	2200
Literatura	Gower et al. (1997); Kimball et al. (1997); Misson et al. (2007)		Munger and Wofsy (1999); Urbanski et al. (2007); Hadley et al. (2009)	Gash et al. (1996)

Mešovita šuma u sklopu *Harvard forest* projekta (u daljem tekstu HF-EMS). Merenje razmene CO₂, vodene pare i energije između biljnog sklopa i atmosfere odvija se u sklopu HF-EMS projekta kontinualno od 1991. godine. Cilj eksperimenta je procena uticaja lokalne i regionalne razmene CO₂ u umerenim širinama na globalni ciklus ugljenika. HF-EMS eksperiment je lociran na oko 1,6 km istočno od glavne projektne stanice na ruti 32, Petersham, Masačusets. Dominantne biljne vrste su crveni hrast (*Q. rubra*) i crveni javor (*A. rubrum*), sa srednjom visinom vegetacije od 24 m i prosečnom gustinom od 660 stabala ha⁻¹ (slika 6.4). Pored dugoročnog merenja NEE koje treba da ukaže na anomalije u fluksu CO₂ izazvane klimatskim promenama, izvode se i merenja meteoroloških elemenata temperature, vlage, intenziteta zračenja, brzine i pravca vetra, količine padavina. Sistem za merenje turbulentnih flukseva postavljen je na vrhu tornja 5 m iznad biljnog sklopa. Vrednosti turbulentnih flukseva CO₂, latentne i osetne toplote, posle obrade podataka, osrednjavaju se na satnom nivou. Veličine od interesa, koncentracija CO₂, koncentracija H₂O i temperatura mere se profilno kroz biljni sklop na visinama 30, 24, 18, 12, 6, 3, 1, 0.05 m i koriste za modeliranje vrednosti kojima se popunjavaju nizovi podataka.

Isti toranj poslužio je i za eksperiment merenja razmene azotnih oksida i profila koncentracija različitih polutanata u period od 1990. do 2003. godine u prekidima. Praćene su



Slika 6.4 Mešovita listopadna šuma HF-EMS.
[<http://harvardforest.fas.harvard.edu/>].



Slika 6.5 Vremenska distribucija merenja koncentracije NO, NO₂ i O₃ u 2002. godini na HF-EMS.

koncentracije NO, NO₂, CO, O₃, kao i fluksevi PAN, NO_y, O₃ na sedam visina unutar biljnog sklopa (0,3, 0,8, 4,5, 7,5, 12,7, 18,3, i 24,1) i jednoj visini iznad (29 m) biljnog sklopa. Izvedena merenja predstavljaju jedan od retkih eksperimenata koji je ukazao na značaj razmene NO_x između prirodnih šumskih lokaliteta i atmosfere. Podaci dobijeni gasnim analizatorom beleženi su u obliku srednjih

časovnih vrednosti. Vremenska distribucija merenja koncentracija u 2002. godini (slika 6.5) pokazuje razlike u izmerenim koncentracijama NO, NO₂ i O₃ u blizini tla i na srednjoj visini vegetacije. Iako su se pojedini biljni sklopovi pokazali kao ponor NO_x to nije slučaj sa HF-EMS. Analizom slike 6.5 lako se može utvrditi da je koncentracija svih predstavljenih jedinjenja, u većem delu godine viša iznad biljnog sklopa nego iznad tla. Međutim, iako postoje razlike one su veoma male, te možemo pretpostaviti da bilo koja promena u hemizmu ili transportnim karakteristikama najnižeg sloja vazduha može lako promeniti izvor u ponor i obrnuto.

6.2 Kvantitativna analiza dobijenih rezultata

Kvantifikovanje kvaliteta simulacija, obavljenih u cilju testiranja korišćenih shema u uslovima visoke vegetacije kao i novog postupka skaliranja, izvedeno je na osnovu vrednosti: a) srednjeg kvadratnog odstupanja (ν) simuliranih podataka od osmotrenih vrednosti, b) standardne devijacije izračunatih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti i c) koeficijenta determinacije. Srednje kvadratno odstupanje i standardna devijacija izračunati su korišćenjem sledećih relacija

$$\nu = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_c - X_o)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6.1)$$

$$\sigma_o = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{oi} - \overline{X_o})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6.2)$$

$$\sigma_c = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ci} - \overline{X_c})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6.3)$$

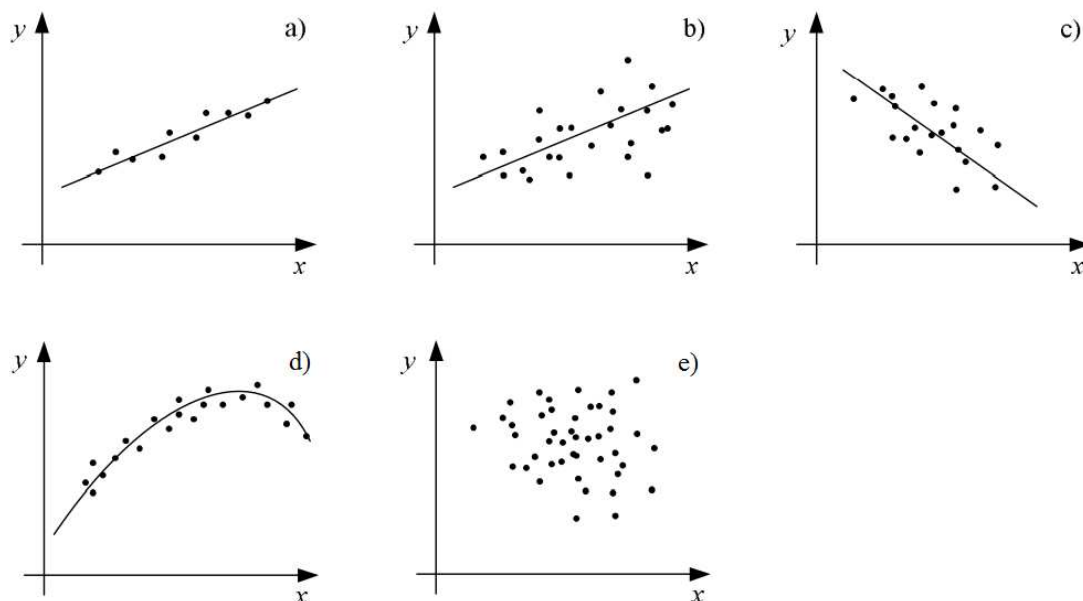
gde je sa N obeležen broj merenja, X_o predstavlja izmerene vrednosti veličine X , dok su X_c izračunate vrednosti veličine X , koje kada su prikazane nadvučene označavaju srednju vrednost. Analiza rezultata izvršena je preko kriterijuma koje je predložio Pilke (Pielke, 1984), a kasnije potvrdili Mahfouf (Mahfouf, 1990) i Mihailović i sar. (Mihailovic et al., 2000). Prema navedenim autorima simulacija je tačnija ukoliko je ν manje od σ_o i ukoliko je manja razlika između σ_c i σ_o . Takođe, izračunati su koeficijenti korelacije (r) koji opisuju slaganje između osmotrenih i modeliranih veličina. Korišćena je Pirsonova (*Pearson*) formulacija koeficijenta korelacije oblika (Wilks, 2006)

$$r = \frac{N \sum X_o X_c - \sum X_o \sum X_c}{\left(N \sum X_o^2 - \sum X_o \right)^{\frac{1}{2}} \left(N \sum X_c^2 - \sum X_c \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (6.4)$$

U statistici je uobičajeno da se kao mera slaganja između stvarnih i modeliranih vrednosti koristi koeficijent determinacije. Ovaj koeficijent se izračunava kao kvadrat koeficijenta korelacije (r^2) i može imati vrednosti od 0 do 100 %, odnosno od 0 do 1 (tabela 6.2).

Tabela 6.2 Empirijski kriterijum ocene jačine korelacije.

r_{xy}	r^2	r^2 (%)	jačina linearne veze
$r \leq 0,3$	$r^2 \leq 0,09$	$r^2 \leq 9$	neznačajna korelacija
$0,5 < r < 0,7$	$0,25 < r^2 < 0,49$	$25 < r^2 < 49$	značajna korelacija
$0,7 \leq r \leq 0,9$	$0,49 \leq r^2 \leq 0,81$	$49 \leq r^2 \leq 81$	jaka korelacija
$r > 0,9$	$r^2 > 0,81$	$r^2 > 81$	vrlo jaka korelacija
Literatura	Vukadinović (1990)		



Slika 6.6 Prikaz različitih korelacija podataka na dijagramu rasipanja
a) jaka pozitivna linearna korelacija, b) slaba linearna korelacija, c) negativna korelacija,
d) nelinearna korelacija, e) bez korelacije (Vukadinović, 1990)

Koeficijenti determinacije dati su na dijagramima rasipanja koji su deskriptivan način prikazivanja veze između osmotrenih i modeliranih parova podataka (slika 6.6). Ukoliko se dijagrami rasipanja koriste, kao u ovom slučaju, za opis kvaliteta modeliranih podataka najčešće se javljaju dijagrami sa jakim linearnom korelacijom (slika 6.6a), slabom linearnom korelacijom (slika 6.6b) i bez korelacije (slika 6.6e). Negativna korelacija između osmotrenih i modeliranih vrednosti (slika 6.6c) ili nelinearna korelacija (slika 6.6d) je pokazatelj da model poseduje ozbiljne greške. Prema tome grupisanje podataka oko „srednje linije“ i visok koeficijent determinacije (1 ili 100 %) prikazuju najbolje slaganje između osmotrenih i modeliranih veličina. Na svim dijagramima rasipanja, predstavljenim u nastavku, sa crnom punom linijom je obeležena srednja linija najboljeg slaganja.

6.3 Verifikacija LAPS sheme

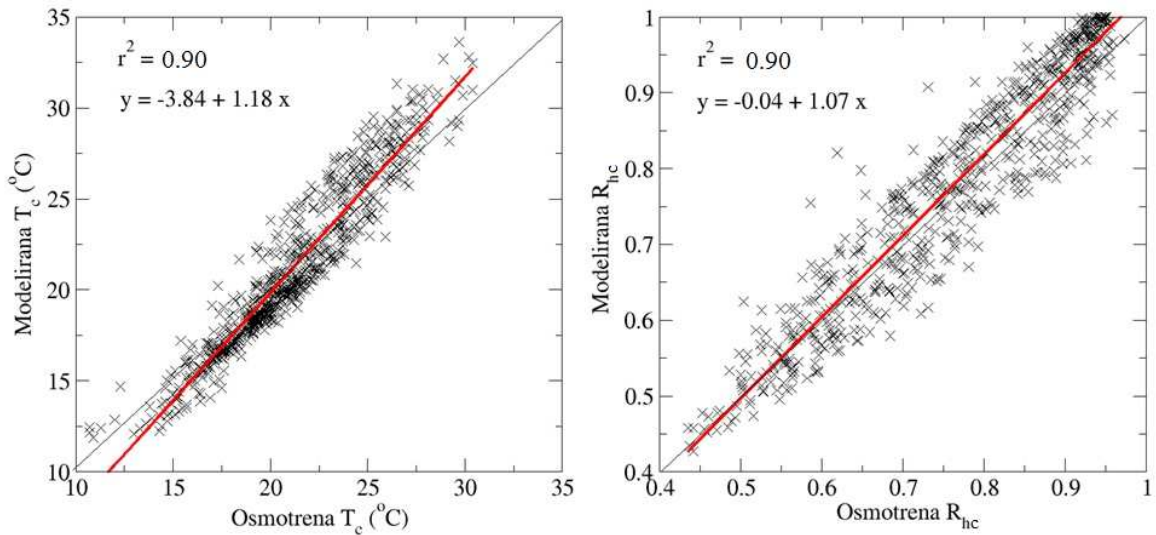
Verifikacija osnovne fizičke SVAT sheme LAPS izvedena je za četiri lokacije opisane u poglavlju 6.1. Izračunavanja sa LAPS shemom su obavljena sa vremenskim korakom koji je odgovarao vremenskom koraku osmotrenih podataka. Za NSA-OBS i SSA-OA lokalitete vremenski koraci su bili 30 minuta, dok su za lokalitete HF-EMS i ABR-RJ bili 60 minuta. Osmotrene vrednosti meteoroloških elemenata na referentnom nivou iznad biljnog sklopa, koji predstavlja visinu tornja na kojem su merenja izvedena (temperatura, pritisak vodene pare, intenzitet kratkotalasnog zračenja, brzina vetra i količina padavina) iskorišćene su za izračunavanje veličina na osnovu kojih je verifikacija obavljena: a) temperature vazduha unutar biljnog sklopa (T_c), b) relativne vlažnosti vazduha unutar biljnog sklopa (R_{hc}), c) osetne toplote (H), d) latentne toplote (λE) i e) neto zračenja (R_{neto}) (jednačine 5.12–5.15). Dobijeni rezultati su prikazani na slikama 6.7–6.15. Izuzetno, simulacije temperature i vlažnosti vazduha unutar sklopa verifikovane su samo na lokalitetu HF-EMS jer na ostalim lokalitetima ova merenja nisu dostupna.

Parametri vegetacije korišćeni za simulacije na različitim lokalitetima preuzeti su iz LAPS-ovih ulaznih parametara i literature prema odgovarajućim PFT. Vegetacija na NSA-OBS opisana je grupom parametara karakterističnom za četinarske šume, za SSA-OA i HF-EMS iskorišćeni su podaci karakteristični za listopadne šume, a posebna kategorija zimzelene tropske šume iskorišćena je za vegetaciju na ABR-RJ lokalitetu.

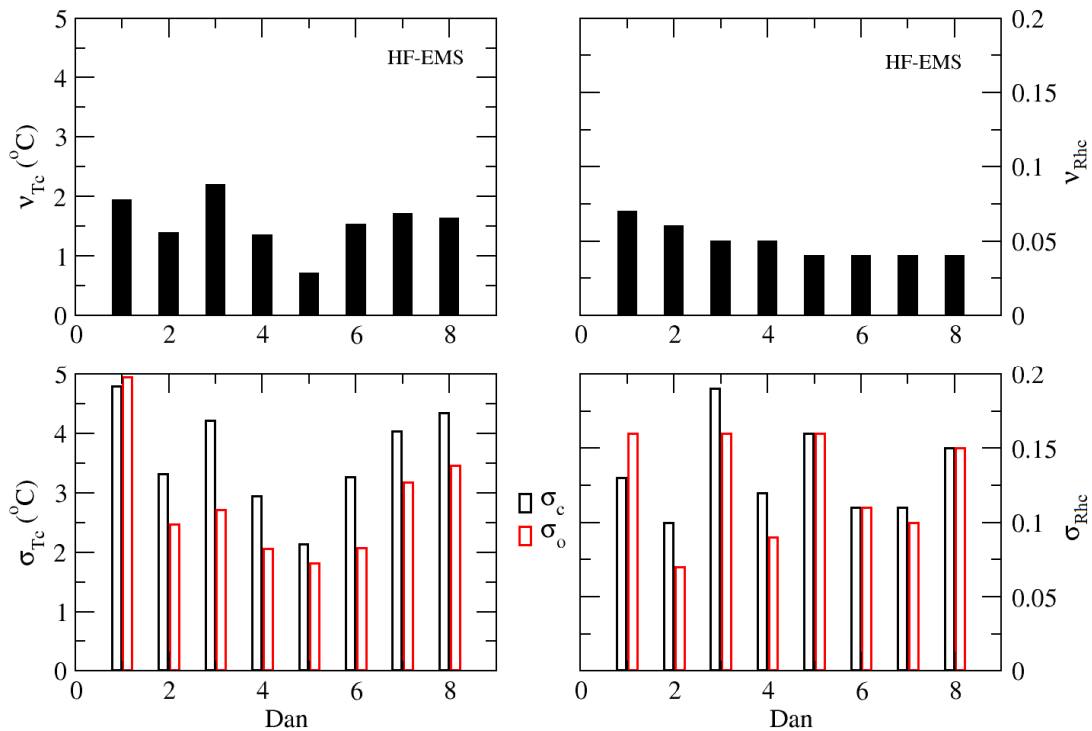
Tabela 6.3 Parametri vegetacije PFT LAPS sheme.

Podaci	NSA-OBS	SSA-OA / HF-EMS	ABR-RJ	Literatura
albedo vegetacije	0,17	0,17	0,125	Stull (1988)
emisivnost vegetacije	0,97	0,97	0,97	Houghton (1986)
pokrivenost	0,7	0,85 / 0,9	0,99	Gower et al. (1997); Urbanski et al. (2007); Gash et al. (1996)

Na osnovu rezultata prikazanih na dijagramu rasipanja (slika 6.7) lako je zaključiti da LAPS shema dobro simulira temperaturu i relativnu vlažnost vazduha na HF-EMS lokalitetu. To pokazuje i vrednost koeficijenta determinacije (u daljem tekstu r^2) između modeliranih i osmotrenih vrednosti T_c i R_{hc} od 0.90 koji prema kriterijumu iz tabele 6.2 ukazuje na veoma jaku korelaciju između podataka. Dalja kvantitativna analiza modeliranih i osmotrenih vrednosti T_c i R_{hc} prikazana je na slici 6.8. Srednja kvadratna greška u modeliranju T_c kreće se u opsegu od 0,7 do 2,2°C (slika 6.8, tabela B.1 u dodatku B). Standardna devijacija modeliranih vrednosti javlja se u opsegu od 1,1 do 5,9°C za modelirane



Slika 6.7 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti T_c i R_{hc} unutar biljnog sklopa na HF-EMS.



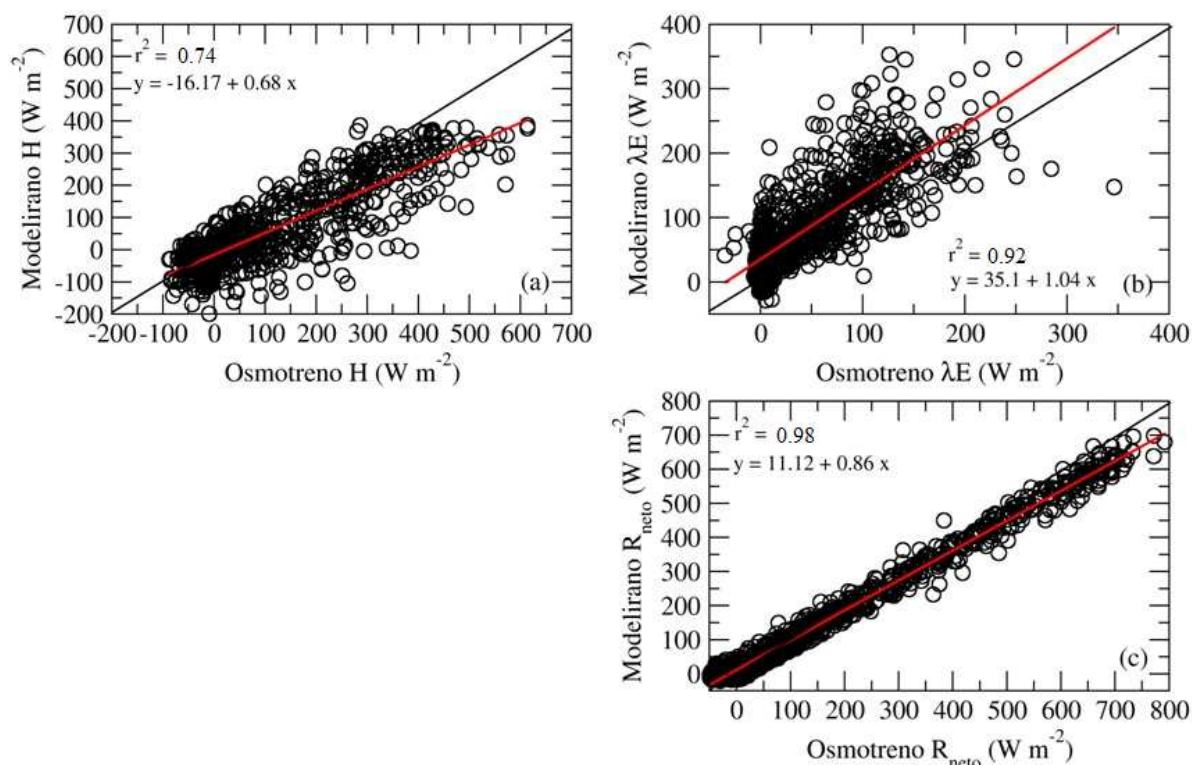
Slika 6.8 Vrednosti ν , σ_o i σ_c temperature (T_c) i relativne vlažnosti vazduha (R_{hc}) unutar biljnog sklopa.

vrednosti i od 1,0 do 5,0°C za osmotrene. Kvalitet simulacija T_c je veoma visok na šta ukazuje, pored koeficijenta determinacije, i odnos između ν i σ_o . Vrednost ν je manja od vrednosti σ_o u svim danima dok razlika između σ_o i σ_c nije prešla $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Srednje kvadratne greške u modeliranju R_{hc} javile su se u opsegu od 4 do 8 % za vrednosti relativne vlažnosti vazduha, koja se u osmotrenom periodu kretala od 42 do 100 %. Izračunata σ_c odstupa od σ_o za $\pm 2\%$ (tabela B.1 u dodatku B). Vrednost ν za R_{hc} u svim danima bila je niža od vrednosti σ_o , što ukazuje na zadovoljavajuću tačnost simulacije. U daljem tekstu i u opisu slika obeležavaćemo srednje kvadratno odstupanje za različite veličine sa ν , standardnu devijaciju osmotrenih podataka sa σ_o , a standardnu devijaciju izračunatih podataka sa σ_c

uz upotrebu indeksa ukoliko je u pitanju direktno poređenje v , σ_o i σ_c istih veličina simuliranih na drugačiji način.

Statistički parametri kvantitativne analize simuliranih vrednosti flukseva osetne i latentne toplote i neto zračenja prikazani su u tabeli 6.4 i u tabelama B.2–B.4 u dodatku B. Takođe, rezultati kvantitativne analize modeliranih turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} prikazani su na slikama 6.9–6.15. Veliki broj podataka onemogućio je grafički prikaz svih rezultata. Iz tog razloga na slikama 6.13–6.15 predstavljeni su rezultati analize za prvih osam dana sa svakog od četiri lokaliteta, dok su svi ostali rezultati prikazani u dodatku B. Prema Vilsonu i sar. (Wilson et al., 2002) karakteristika severnih četinarskih šuma je veća vrednost H u odnosu na λE u letnjim mesecima, kao i niža vrednost H u odnosu na λE u letnjim mesecima u listopadnim šumama umerenih širina. Lokaliteti izabrani za analizu „ispratili su“ karakterizaciju koju je opisao Vilson i sar. (Wilson et al., 2002). Prema tome, bilo je značajno uporediti mogućnosti sheme da simulira varijacije u turbulentnim fluksevima na izabranim lokacijama.

Kvantitativna analiza osmotrenih i modeliranih turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} prikazana je preko dijagrama rasipanja i koeficijenta determinacija na slikama 6.9–6.13. Vrednosti H variraju u različitim opsezima, u zavisnosti od geografske širine lokaliteta. Kao što je prethodno naglašeno, vrednosti H u severnim četinarskim šumama su značajno veće od vrednosti λE što su pokazali podaci sa NSA-OBS lokaliteta (slika 6.9a). Na ostalim lokalitetima, umerenih širina i u tropskoj šumi

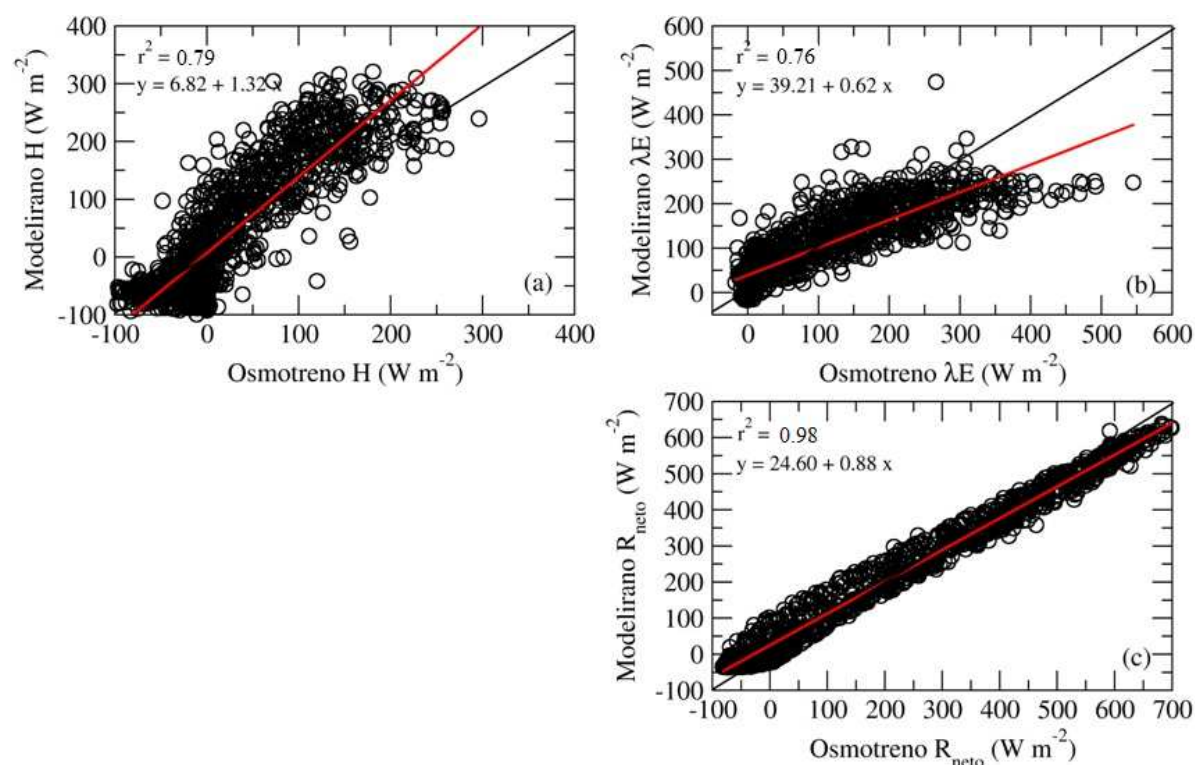


Slika 6.9 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) na NSA-OBS.

turbulentni fluks H je manji od λE . Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti na sva četiri lokaliteta pokazala su slaganje sa visokim koeficijentima korelacije, bez obzira na lokalitet i vrstu šume (tabela 6.4). Najniži r^2 izračunat je za NSA-OBS i iznosi 0,74 što ukazuje na jako korelisane podatke (tabela 6.2). Na lokalitetu SSA-OA zapaža se manja sistematska greška koja dovodi do toga da model daje veće vrednosti od osmotrenih, ali uz visok koeficijent determinacije (slika 6.10a). Najbolje slaganje sa osmotrenim podacima, tj. sa srednjom linijom koja opisuje najidealnije moguće rešenje, zabeleženo je na HF-EMS lokalitetu, sa koeficijentom determinacije od 0,93 (slika 6.11a).

Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnog fluksa λE pokazalo je visoke koeficijente determinacije na svim lokalitetima (tabela 6.4). Izdvajaju se lokaliteti NSA-OBS (slika 6.9b) i ABR-RJ (slika 6.12b) na kojima koeficijenti determinacije iznose 0,92. Vrednosti na dijagramu rasipanja pokazuju da u modeliranju λE na NSA-OBS, pored visokog koeficijenta determinacije, postoji sistematska greška i da model daje više vrednosti u odnosu na simulirane u pojedinim situacijama (slika 6.9b). Na lokalitetu SSA-OA model daje više vrednosti u odnosu na simulirane u pojedinim situacijama (slika 6.10b). Najniži koeficijent determinacije javio se na HF-EMS i iznosi 0,72 (slika 6.11b).

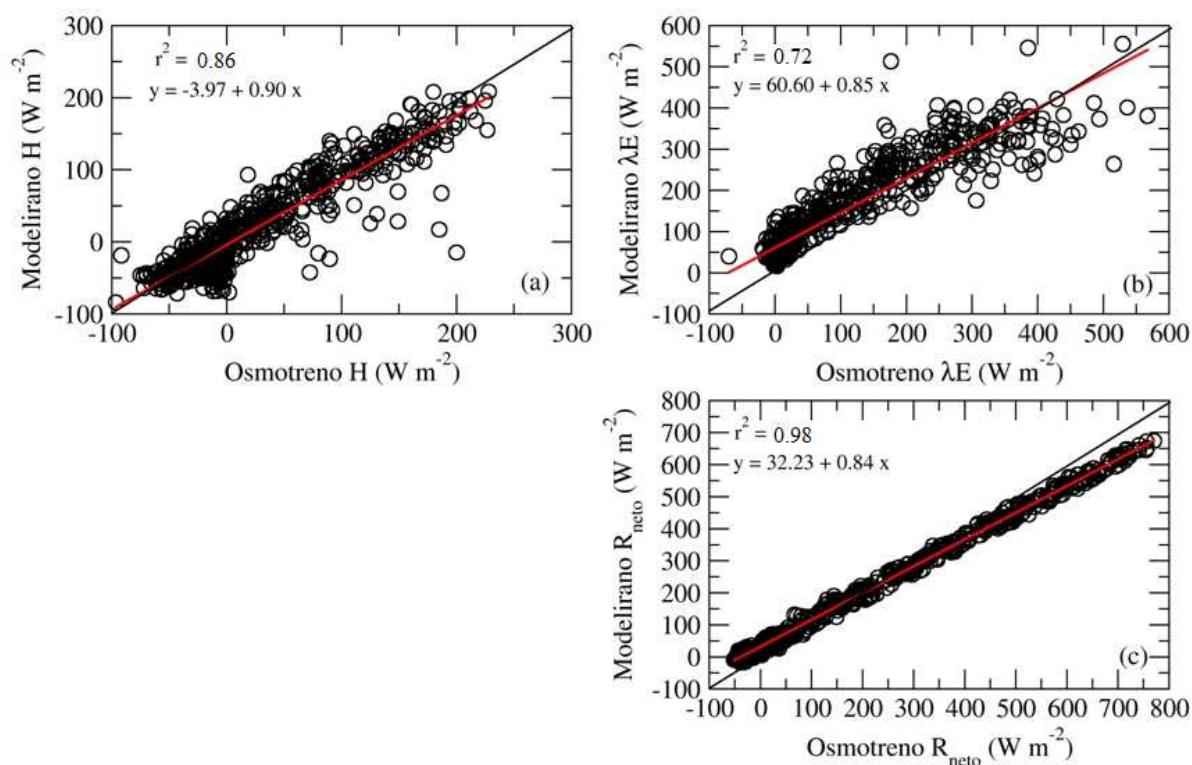
Najbolje slaganje između osmotrenih i modeliranih vrednosti zapažamo u poređenju R_{neto} (slika 6.9c–6.12c). Za sve lokalitete karakterističan je visok koeficijent determinacije od 0,98 i odlično slaganje sa srednjom linijom bez rasipanja podataka (tabela 6.4).



Slika 6.10 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) na SSA-OA.

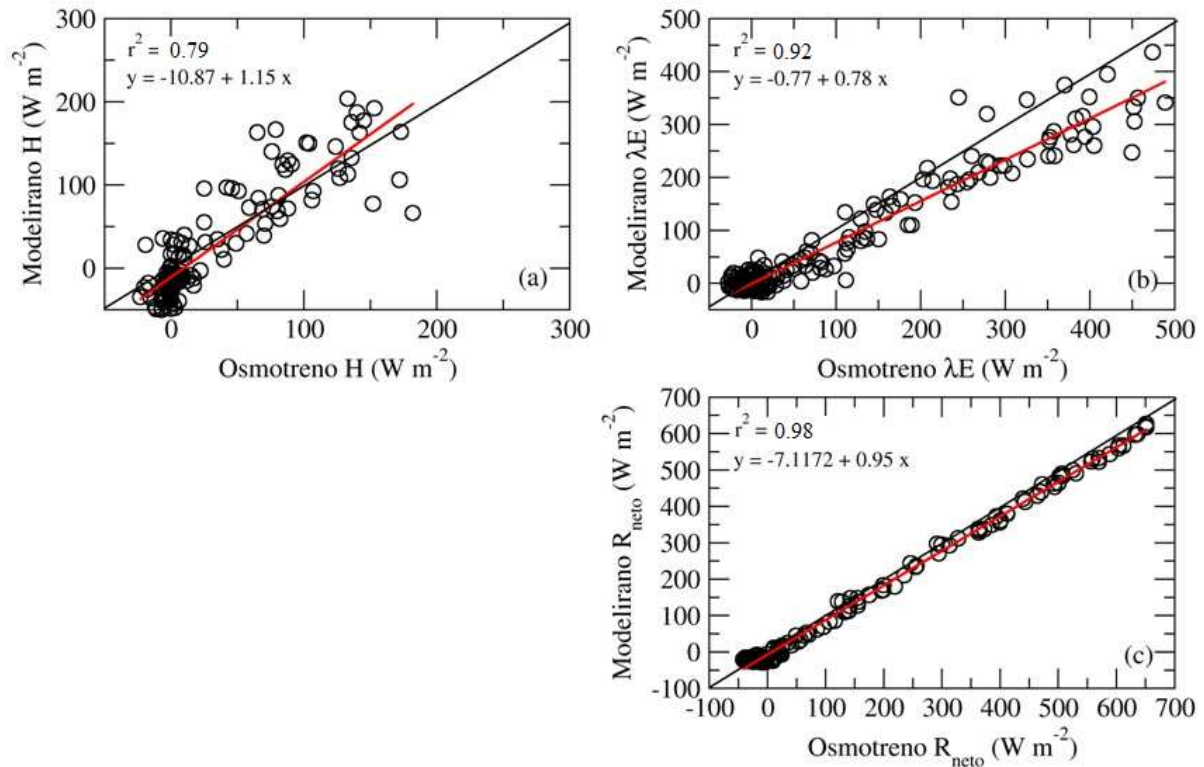
Tabela 6.4 Vrednosti koeficijenta korelacije i determinacije izračunatih vrednosti H , λE i R_{net} LAPS shemom.

	H		λE		R_{neto}	
	r	r^2	r	r^2	r	r^2
NSA-OBS	0,86	0,74	0,96	0,92	0,99	0,98
SSA-OA	0,89	0,79	0,87	0,76	0,99	0,98
HF-EMS	0,93	0,86	0,85	0,72	0,99	0,98
ABR-RJ	0,89	0,79	0,96	0,92	0,99	0,98



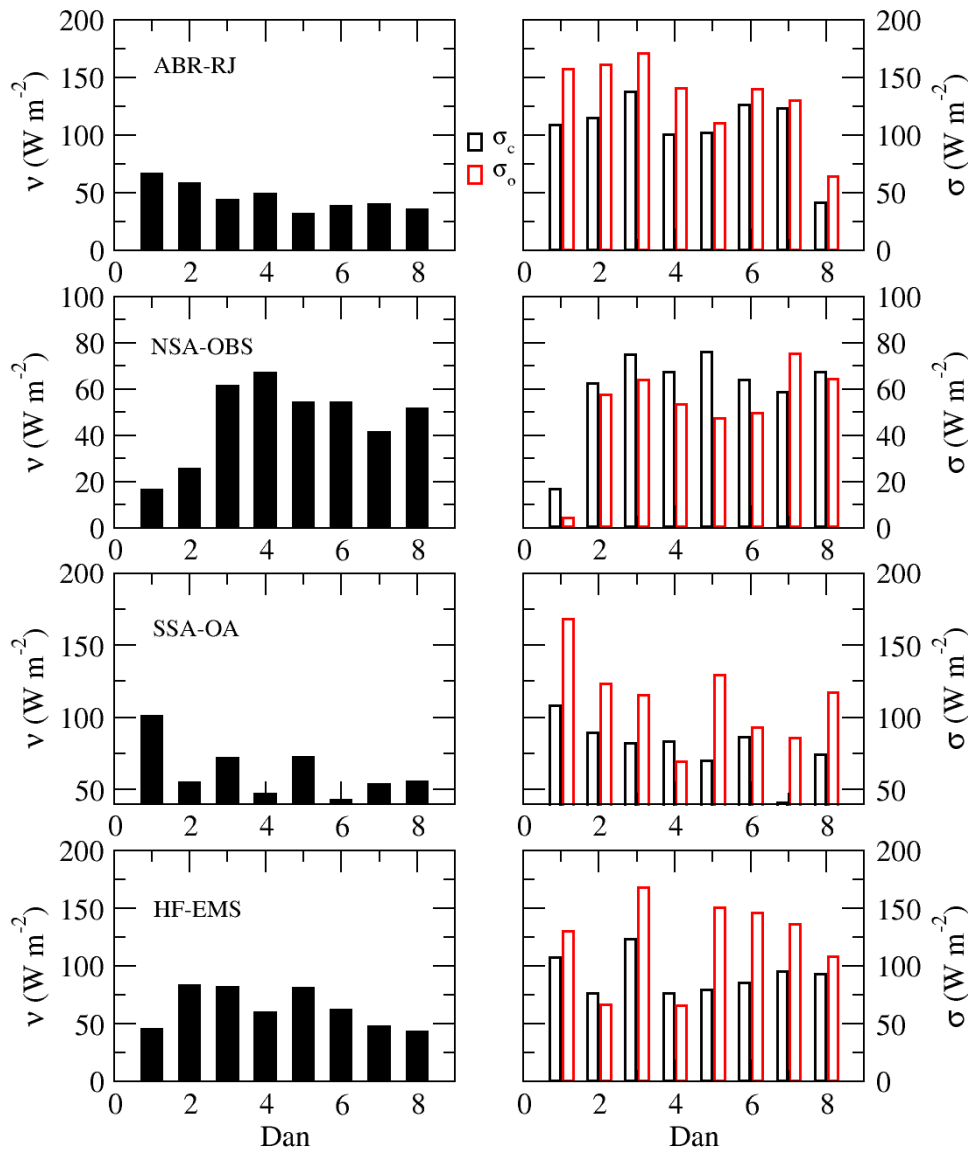
Slika 6.11 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) na HF-EMS.

S obzirom na ograničen broj merenja iskorišćenih za analizu kvaliteta modeliranja turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} izdvaja se lokalitet ABR-RJ. Prilikom poređenja osmotrenih i modeliranih vrednosti H i λE uočava se grupisanje situacija sa niskom vrednošću turbulentnih flukseva, koji odgovaraju noćnim uslovima i skokovi u dnevnim vrednostima. Vrednosti r^2 za sve tri veličine su veoma visoke, uz odlično slaganje sa srednjom linijom. Posebno se ističe r^2 dobijen za λE od 0,92 (slika 6.12b). Modelirane vrednosti R_{neto} u odličnoj su saglasnosti sa osmotrenim vrednostima, što se pokazalo i na prethodna tri lokaliteta (slika 6.12c).



Slika 6.12 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) na ABR-RJ.

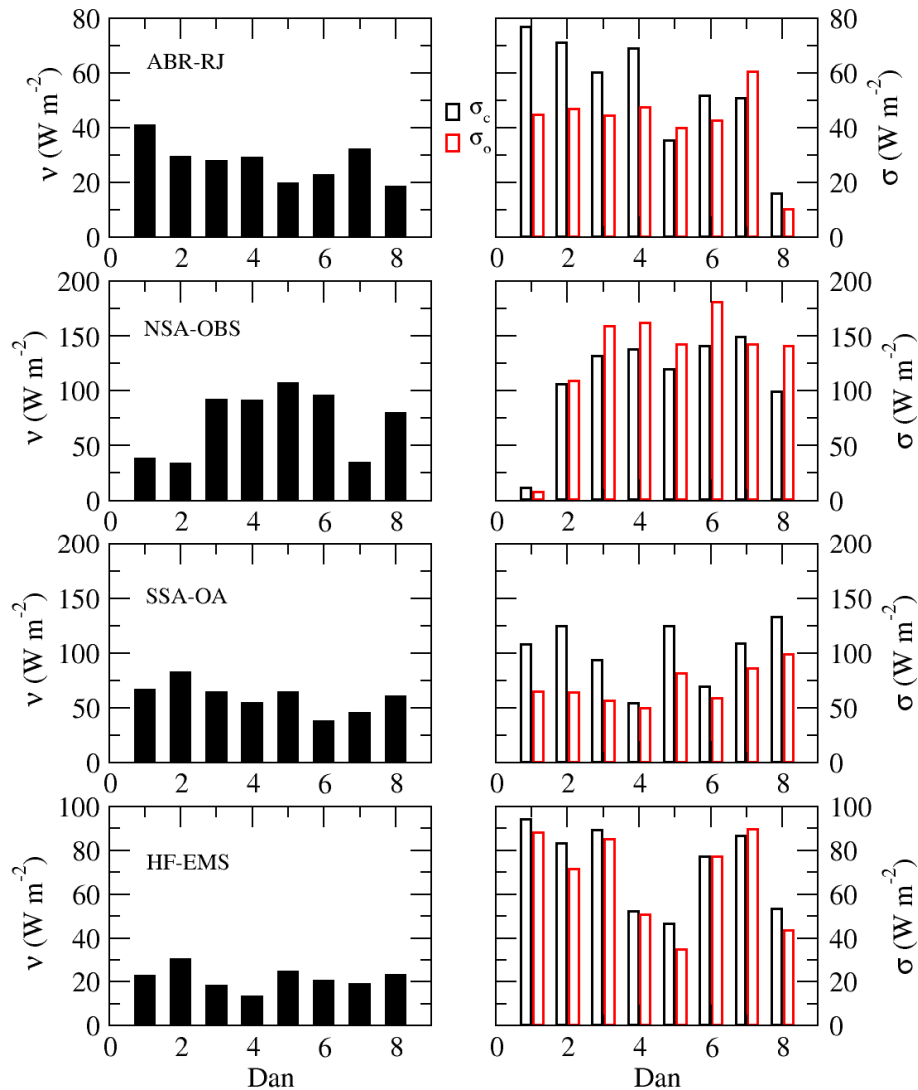
Kvantitativna analiza simuliranih vrednosti H prikazana na slici 6.13 pokazuje da su greške simulacija na nivou dana za sve lokalitete u granicama do 80 W m^{-2} , sa maksimalnom vrednošću zabeleženom na SSA-OA lokalitetu u prvom danu koja iznosi 101 W m^{-2} . Greške na ABR-RJ lokalitetu kreću se u opsegu od 30 do 67 W m^{-2} , uz vrednosti σ_c koje su veoma blizu σ_o sa maksimalnom razlikom od $\pm 40 \text{ W m}^{-2}$ (tabela B.2 u dodatku B). NSA-OBS lokalitet karakterišu greške u modeliranju H u opsegu od 20 do 90 W m^{-2} , dok se razlika u σ_c i σ_o kreće u granicama od maksimalno $\pm 30 \text{ W m}^{-2}$ (tabela B.3 u dodatku B). Za SSA-OA lokalitet izračunate ν su u granicama od 30 do 101 W m^{-2} uz razliku σ_c i σ_o od maksimalno $\pm 50 \text{ W m}^{-2}$ (tabela B.4 u dodatku B). Na lokalitetu HF-EMS ν su u granicama od 50 do 100 W m^{-2} uz razliku σ_c i σ_o od maksimalno $\pm 65 \text{ W m}^{-2}$ (tabela B.5 u dodatku B). Prema kriterijumu o kvalitetu simulacije, koji se opisuje odnosom ν i σ_o (kvalitet je veći ukoliko je ν manje od σ_o), može se zaključiti da je u slučaju simulacije H : 1) ν manje od σ_o na ABR-RJ i SSA-OA lokalitetima za sve dane za koje je rađena simulacija, 2) na NSA-OBS javilo se odstupanje u 11 od 23 dana simulacija, i 3) na HF-EMS javilo se odstupanje u 4 dana od 30 dana simulacija. Vrednosti σ_c našle su se blizu σ_o , sa najmanjom razlikom na NSA-OBS lokalitetu. Razlog greške na NSA-OBS je specifična struktura smreke kod koje površina stabla i grana ima značajnu ulogu, jer je donja baza krošnje vrlo visoka ($0,75h$, približno). To dovodi do značajnog uticaja drvenastog dela biljke na fluks osetne toplote što LAPS nije u mogućnosti da simulira.



Slika 6.13 Vrednosti v , σ_c i σ_o turbulentnog fluksa osetne toplote (H).

Kvantitativna analiza modeliranih i osmotrenih vrednosti λE prikazana je na slici 6.14. Greške u modeliranju λE , kao i kod modeliranja H , ostale su ispod 80 W m^{-2} , dok se maksimalna greška zabeležena na NSA-OBS lokalitetu (166 W m^{-2}), značajno veća od srednje greške, javila samo u jednom danu. Ispitivanjem osmotrenih meteoroloških elemenata za dan sa najvećom zabeleženom greškom ustanovilo se da je u pitanju greška u merenju, jer se ne pojavljuje značajno odstupanje od vrednosti osmotrenih u ostalim danima. Greške u modeliranju λE na ABR-RJ lokalitetu kreću se u opsegu od 19 do 41 W m^{-2} , uz vrednosti σ_c koje su veoma su blizu σ_o sa maksimalnom razlikom od $\pm 46 \text{ W m}^{-2}$ (tabela B2). NSA-OBS lokalitet karakterišu vrednosti v u opsegu od 30 do 115 W m^{-2} , dok se razlika u σ_c i σ_o kreće u granicama od maksimalno $\pm 70 \text{ W m}^{-2}$ (tabela B3). Za SSA-OA lokalitet izračunate vrednosti v su u granicama od 36 do 84 W m^{-2} uz razliku σ_c i σ_o od maksimalno $\pm 55 \text{ W m}^{-2}$ (tabela B4). Na lokalitetu HF-EMS, vrednosti v za λE su u granicama od 10 do 60 W m^{-2} uz razliku σ_c i σ_o od maksimalno $\pm 25 \text{ W m}^{-2}$ (tabela B5). Poređenjem v i σ_o može se zaključiti da je: 1) na ABR-RJ

vrednost ν bila je manja od σ_o u 7 od 8 dana simulacija, 2) na NSA-OBS manja vrednost se javlja u 19 od 23 dana, 3) na SSA-OA manja vrednosti ν od σ_o javile su se u 21 od 31 dan merenja koji su korišćeni u simulacijama, dok je na 4) HF-EMS ν bila niža od σ_o u 29 od 30 dana simulacija. Standardna devijacija izračunatih λE najbliža je σ_o na HF-EMS lokalitetu.

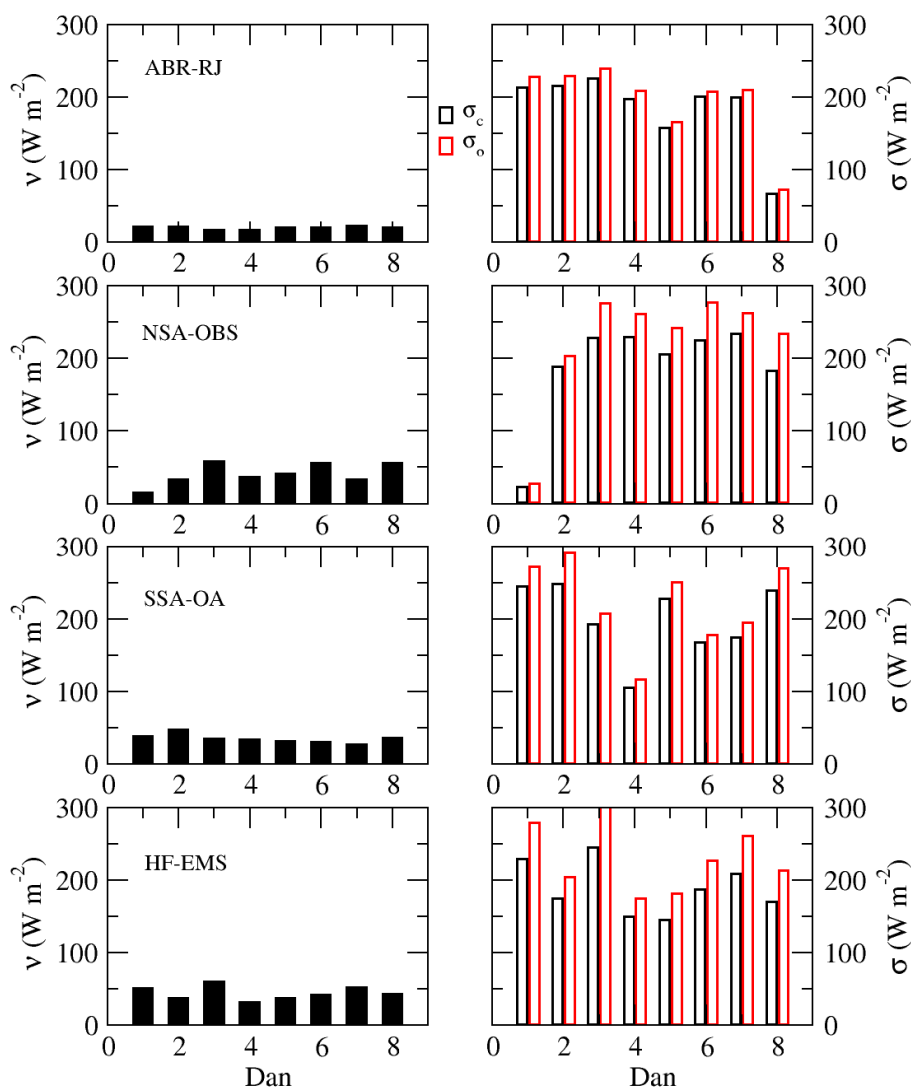


Slika 6.14 Vrednosti ν , σ_c i σ_o turbulentnog fluksa latentne toplote (λE).

Kao što je prikazano na dijagramima rasipanja (6.9–6.12) najmanje odstupanja od srednje linija dobija se prilikom poređenja osmotrenih i modeliranih vrednosti R_{neto} . Na slici 6.15 prikazana je kvantitativna analiza simulacije R_{neto} na osnovu ν , σ_c i σ_o . Maksimalna greška na svim lokalitetima nije prešla 60 W m^{-2} . Vrednosti σ_c i σ_o beleže male razlike na svim lokalitetima ($\pm 50 \text{ W m}^{-2}$), dok su vrednosti ν u svakom danu korišćenom u simulacijama za sva četiri lokaliteta manje od σ_o (tabele B.2–B.5 u dodatku B).

Prema prethodno predstavljenoj analizi slaganja osmotrenih i modeliranih vrednosti T_c , R_{hc} , H , λE i R_{neto} zaključujemo da je sposobnost LAPS sheme da simulira mikrometeorološke karakteristike različitih šumskih sklopova veoma visoka. Na svim lokalitetima vrednosti koeficijenta

determinacije za sve veličine iskorišćene u poređenju kreću se između 0,72 i 0,98, što ukazuje na dobro slaganje između osmotrenih i modeliranih veličina. Kvantitativna analiza rezultata pokazala je da je turbulentni fluks H po pravilu dobro parametrisan za listopadne šume (SSA-OA, HF-EMS) i tropske šume (ABR-RJ), sa izuzetkom i manjom sistematskom greškom koje se javlja u četinarskim šumama (NSA-OBS) koje su zbog specifične raspodele energije i visoke vrednosti osetne toplote manje od očekivanih. Najveće greške javile su se pri parametrizaciji turbulentnog fluksa λE , veoma kompleksne veličine koja zavisi od različitih biofizičkih parametara. Ipak, prema dobijenim rezultatima možemo zaključiti da je transport energije u LAPS shemi dobro rešen. Posebno se izdvaja slaganje između osmotrene i modelirane vrednosti R_{neto} . Slaganje između modeliranih i osmotrenih vrednosti R_{neto} , za čije računanje su neophodne vrednosti temperature i vlažnosti vazduha unutar biljnog sklopa, pokazuje da su greške prilikom računanja tih vrednosti veoma male. Tu pretpostavku potvrđujemo sa malim greškama u modeliranju T_c i R_{hc} na HF-EMS lokalitetu. Manje sistematske greške koje se javljaju pri simulaciji turbulentnih flukseva H i λE pokazuju da postoji prostor za usavršavanje LAPS sheme.



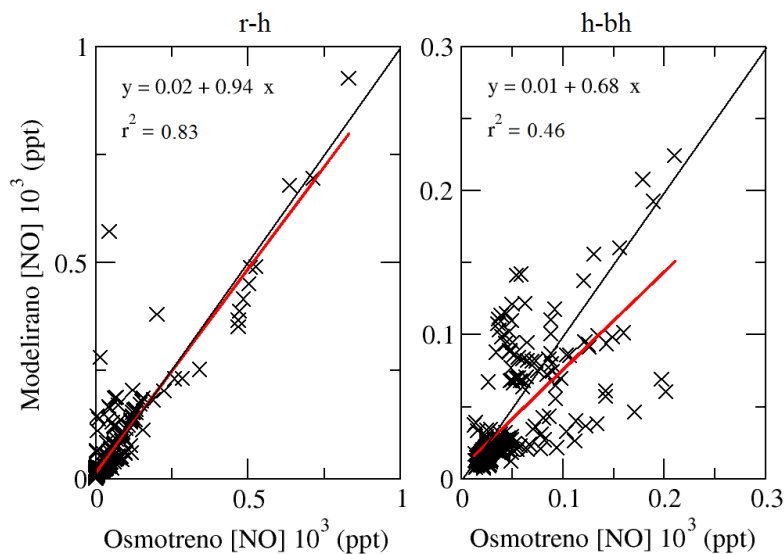
Slika 6.15 Vrednosti v , σ_c i σ_o neto zračenja (R_{net}).

6.4 Verifikacija MLC-Chem sheme

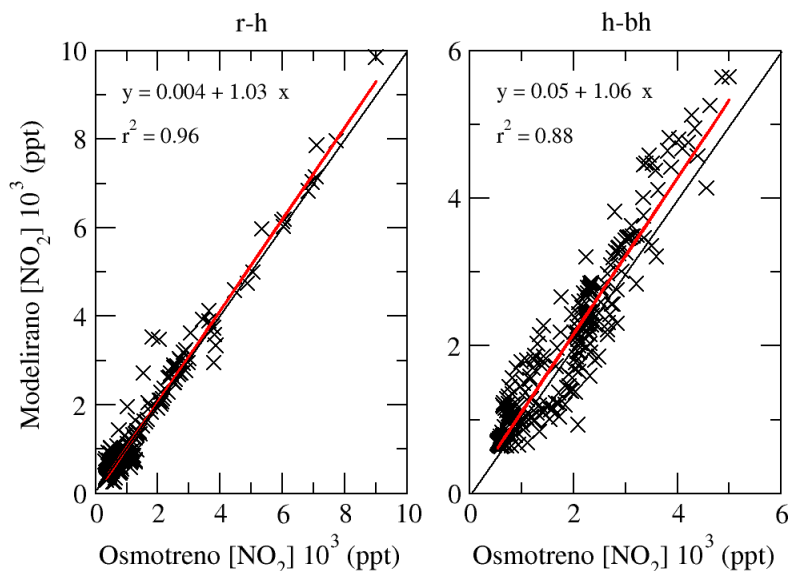
Ulazni podaci za kalibraciju MLC-Chem sheme formirani su u obliku seta polusatnih merenja na lokalitetu HF-EMS izvršenih u toku pet letnjih dana u periodu od 14. do 19. jula 2002. godine. Za razliku od LAPS sheme, čija verifikacija za šumske lokalitete do sada nije izvedena, verifikaciju MLC-Chem za šumske lokalitete objavili su Ganzveld i sar. (Ganzeveld et al., 2002a). Verifikacija sheme izvedena je prema osmatranjima dobijenim sa tri karakteristična šumska sklopa Severne i Južne Amerike, tajge (borealne šume), listopadne šume i tropske šume. Po uzoru na objavljene rezultate ponovili smo izvedene simulacije i uporedili ih sa izmerenim vrednostima. Iskustvo sa hemijskim shemama pokazalo je da trenutni problem više nije modeliranje, nego izmereni podaci sa kojima bi shema mogla da se kalibriše i verifikuje. Prema uzoru na literaturu, simulacije MLC-Chem shemom izvedene su inicijalizacijom vrednosti meteoroloških elemenata za posmatrani period (temperatura, vlažnost vazduha, PAR, brzina vetra na referentnom nivou i količina padavina) i srednjih satnih osmotrenih koncentracija NO, NO₂, O₃ i CO na referentnom nivou. Vremenski korak modela je 30 minuta, sa podkorakom, u kom se računaju hemijske transformacije, turbulentni transport i suva depozicija za koji se najčešće uzima da je 10 % od dužine najmanjeg vremenskog koraka, u našem slučaju 3 minute. Parametri korišćeni prilikom simulacije prikazani su u tabeli 6.5, dok su početne vrednosti koncentracija osnovnih hemijskih trasera CBM4 modula prikazane u tabeli 6.6 na kraju poglavlja.

Modelirane vrednosti koncentracije NO i NO₂ poređene su sa profilnim merenjima, pa se vrednost u donjem sloju biljnog sklopa, koji zauzima prostor između tla i visine donje baze krošnje (bh-s), dobija osrednjavanjem koncentracija izmerenih na 0,3, 0,8, 4,5 i 7,5 m da bi se obuhvatila emisija iz zemljišta i transportne karakteristike u najnižem sloju biljnog sklopa. Osmotrene koncentracije NO i NO₂ gornjeg sloja biljnog sklopa okupiranog zelenom biljnom masom krošnje drveta koji se proteže od donje baze krošnje do srednje visine biljnog sklopa (h-bh) dobijene su osrednjavanjem vrednosti izmerenih na 12,7, 18,3, i 24,1 m. Vrednost koncentracija iznad biljnog sklopa odgovara vrednosti izmerenoj na visini od 29 m (r-h).

Kvalitet simulacija proveren je prema kriterijumima opisanim u poglavlju 6.2 za NO (slika 6.16, slika 6.18) i NO₂ (slika 6.17, slika 6.19) u sloju vazduha r-h i h-bh. Upoređivanjem osmotrenih i modeliranih koncentracija NO i NO₂ iznad biljnog sklopa dobijen je visok r^2 od 0,83 i 0,96, redom. Nešto niži r^2 javlja se prilikom poređenja koncentracija osmotrenih i modeliranih u sloju h-bh. Posebno se izdvaja r^2 koji se dobija poređenjem osmotrenih i modeliranih vrednosti NO u sloju h-bh čija vrednost iznosi 0,46.



Slika 6.16 Osmotrene i modelirane vrednosti koncentracije NO u slojevima r-h i h-bh.

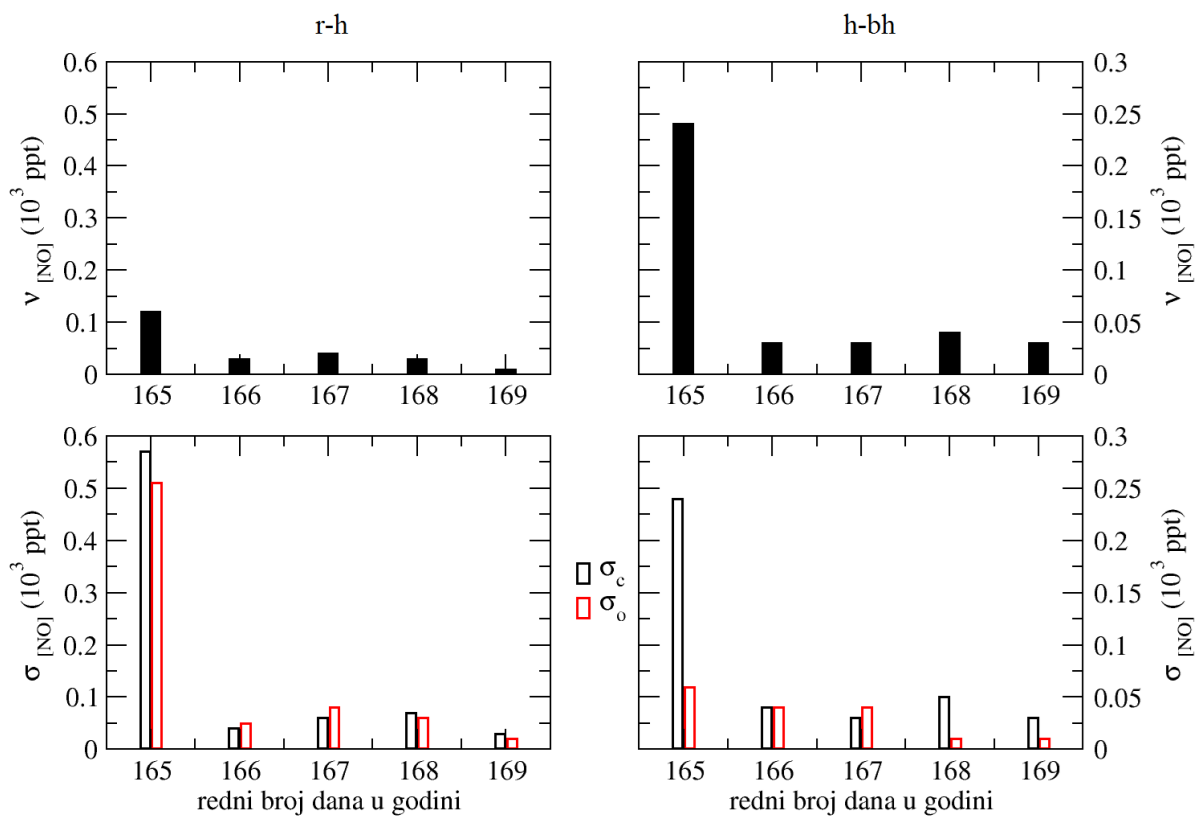


Slika 6.17 Osmotrene i modelirane vrednosti koncentracije NO₂ u slojevima r-h i h-bh.

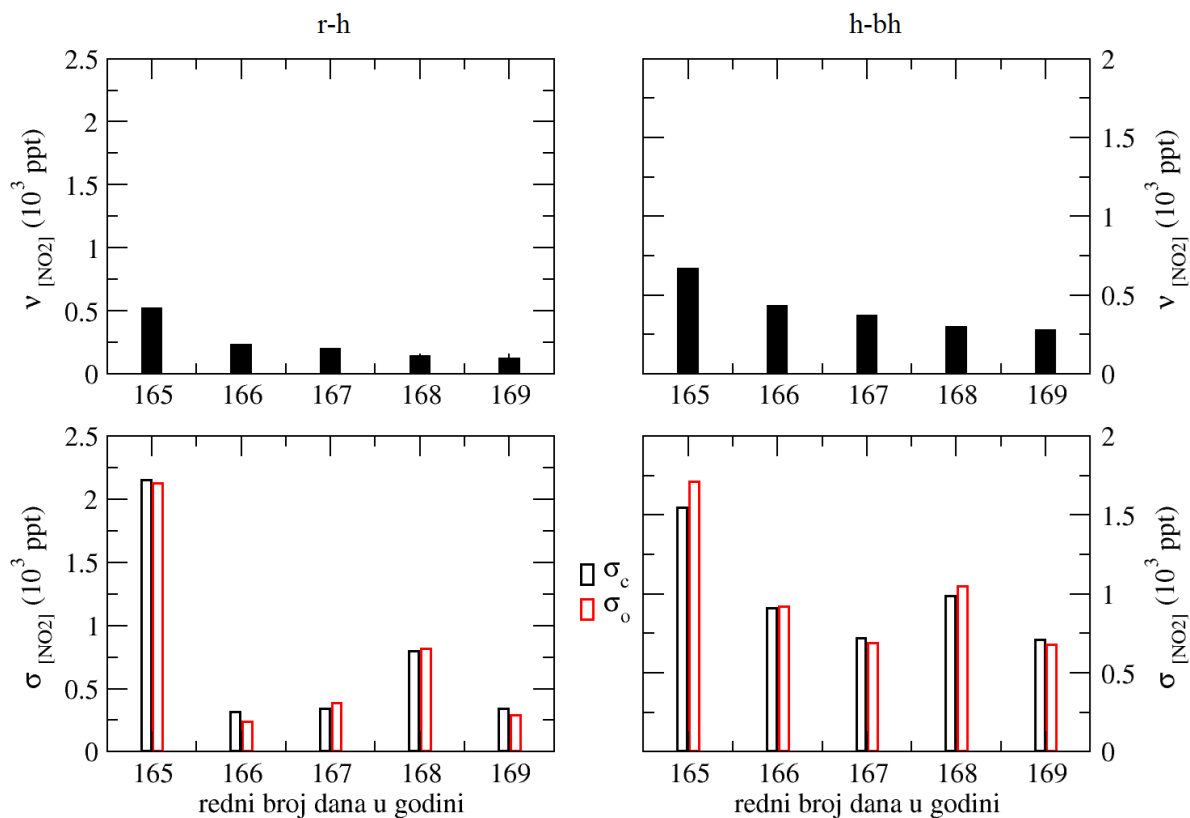
Kvantitativna analiza rezultata preko ν , σ_c i σ_o prikazana je na slikama 6.18 i 6.19. Uočavaju se niže vrednosti ν u sloju vazduha r-h u odnosu na sloj vazduha h-bh za oba jedinjenja. Srednja kvadratna greška u modeliranju koncentracije NO u sloju r-h kreće se u opsegu od $0,01 \cdot 10^3$ ppt do $0,04 \cdot 10^3$ ppt sa maksimumom u 165. danu koji je izazvan značajnim povećanjem koncentracije oba jedinjenja koje je uzrokovano antropogenim zagađenjem. U sloju h-bh vrednost ν se kreće u opsegu od $0,03 \cdot 10^3$ ppt do $0,04 \cdot 10^3$ ppt. Maksimalna vrednost σ_o za koncentraciju NO u sloju r-h je $\pm 0,08 \cdot 10^3$ ppt, dok za sloj h-bh iznosi $\pm 0,06 \cdot 10^3$ ppt. Vrednosti σ_c se kreću u opsegu od $\pm 0,07 \cdot 10^3$ ppt u sloju r-h i $\pm 0,05 \cdot 10^3$ ppt u sloju h-bh. Poređenjem ν i σ_o za NO zaključujemo: 1) vrednost ν niža je od σ_o za osmotrene i izračunate koncentracije u sloju vazduha r-h, 2) za sloj vazduha unutar biljnog sklopa h-bh vrednost ν je manja od σ_o u 2 od 5 dana simulacija. Isto tako uočava se razlika između σ_c i σ_o koja je za sloj

vazduha r-h veoma mala ($0,01 \cdot 10^3$ ppt), dok se u sloju vazduha h-bh uočavaju značajnije odstupanje ($0,03 \cdot 10^3$ ppt).

Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti NO_2 dalo je v u opsegu od $0,12 \cdot 10^3$ ppt do $0,23 \cdot 10^3$ ppt u sloju vazduha r-h i od $0,28 \cdot 10^3$ ppt do $0,43 \cdot 10^3$ ppt u sloju vazduha h-bh. Maksimalne vrednosti javljaju se u 165. danu i posledica su antropogenog zagađenja kada su vrednosti koncentracije bile preko pet puta veće od uobičajenih. Maksimalna σ_o koncentracija u sloju r-h je $\pm 0,82 \cdot 10^3$ ppt, dok za sloj h-bh iznosi $\pm 1,05 \cdot 10^3$ ppt. Vrednosti σ_c se kreću u opsegu od $\pm 0,34 \cdot 10^3$ ppt u sloju r-h i do $\pm 0,99 \cdot 10^3$ ppt u sloju h-bh. Dakle, za oba sloja (r-h i h-bh) vrednost v je bila niža od σ_o u svim danima iskorišćenim za validaciju sheme, dok je poređenje σ_c i σ_o pokazalo veoma male razlike između dve vrednosti, što je lako uočljivo na slici 6.19.



Slika 6.18 Vrednosti v , σ_c i σ_o koncentracije NO u sloju vazduha r-h i h-bh.

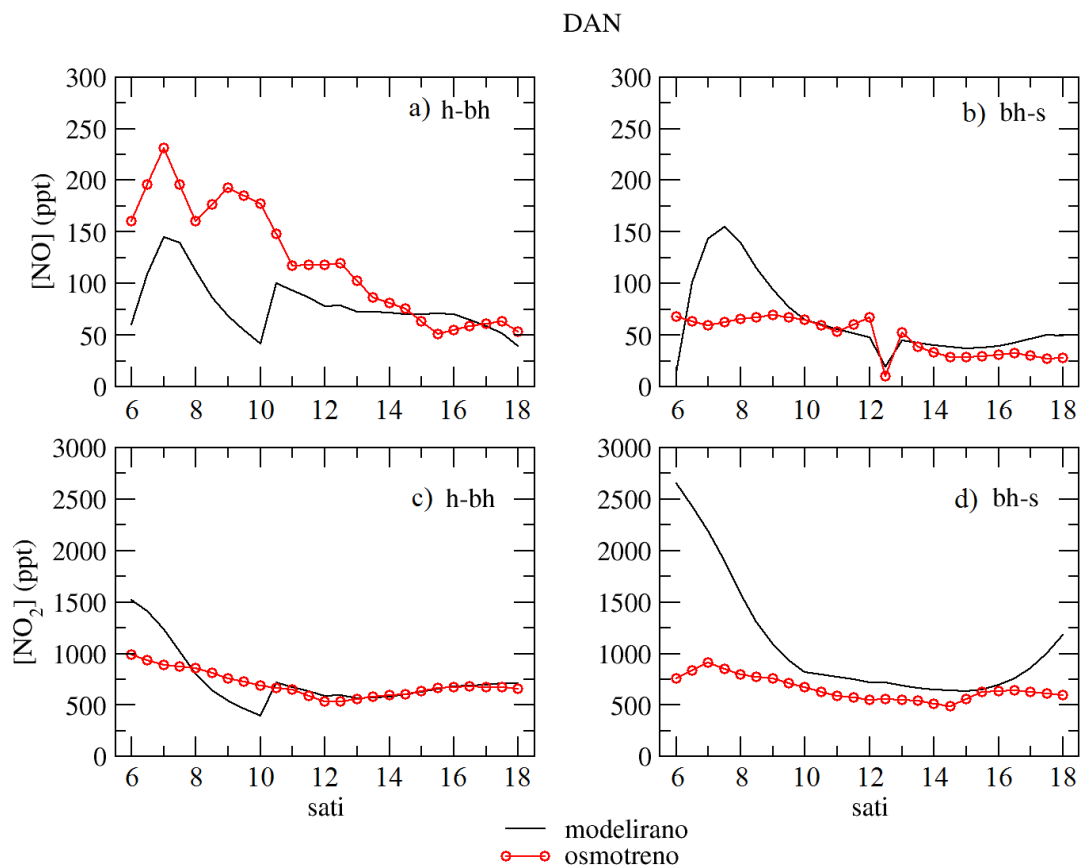


Slika 6.19 Vrednosti v , σ_c i σ_o koncentracije NO_2 u sloju vazduha r-h i h-bh.

Iz prikazanog možemo zaključiti da shema daje odlične rezultate za simuliranje koncentracija u sloju vazduha od referentnog nivoa do visine biljnog sklopa i zadovoljavajuće vrednosti unutar biljnog sklopa. Greške koje su se javile prilikom poređenja srednjih dnevnih osmotrenih i modeliranih koncentracija NO_2 manje su nego greške dobijene u simulaciji NO . Odstupanje od osmotrenih vrednosti NO najverovatnije potiče od nedovoljno kompleksne parametrizaciji emisije NO , s obzirom da se razlike javljaju u sloju vazduha koji je bliži tlu. Kvalitet simulacije koncentracija NO_2 je visok što pokazuju vrednost r^2 i mala vrednost v , iako postoji odstupanje u modeliranju koncentracije u sloju h-bh. Manje modelirane vrednosti, pored ostalog, mogu biti rezultat neadekvatnog opisa oksidacije NO do NO_2 do koje dovode neadekvatna parametrizacija intenziteta fotolize NO_2 koja produkuje O_3 , odnosno oksidant koji prevodi NO u NO_2 . Shema po pravilu greši prilikom računanja koncentracija u sloju vazduha koji ispunjava biljni sklop, te se može pretpostaviti da bi unapređenje modeliranja mikrometeoroloških veličina, posebno profila zračenja i brzine depozicije, koje zavise od kvaliteta opisa strukture biljnog sklopa, značajno promenilo kvalitet simulacije.

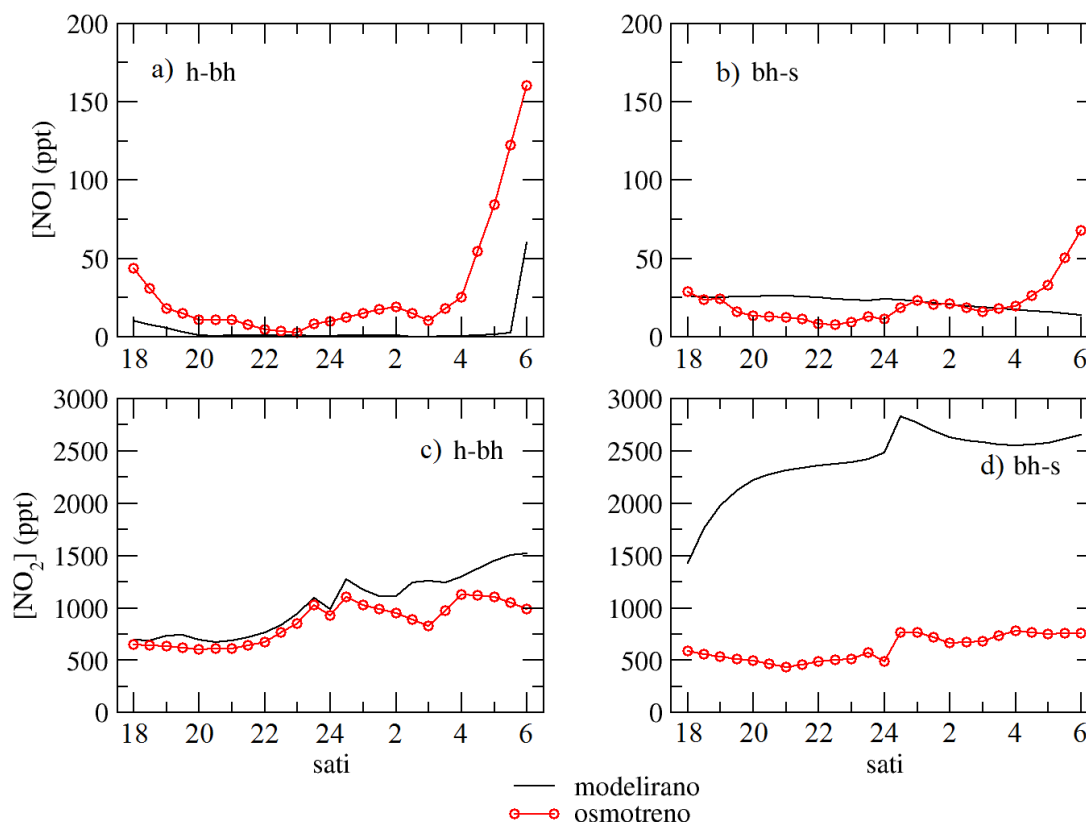
Dodatna analiza sheme izvedena je poređenjem srednjih satnih vrednosti koncentracija NO i NO_2 osmotrenih i modeliranih u period od 5 dana u toku dana (slika 6.20) i u toku noći (slika 6.21) u slojevima vazduha h-bh i bh-s. Podela na dnevne i noćne koncentracije treba da opiše uticaj stabilnosti atmosfere i intenziteta zračenja na turbulentni transport, suhu depoziciju i fotolizu gasova. Rezultati simulacija pokazuju slaganje između vrednosti koncentracija NO i NO_2 u toku dana, posebno kada je reč o koncentraciji NO u bh-s sloju (slika 6.20b) i NO_2 u h-bh sloju (slika 6.20c). Tačnost simulacije u predstavljenim slojevima značajna je, jer možemo pretpostaviti da su procesi

odgovorni za slaganje zapravo turbulentni transport NO iz oblasti produkcije u više slojeve vazduha, kao i suva depozicije NO₂ kroz biljni sklop. Najveće odstupanje od osmotrenih vrednosti uočava se prilikom simulacije NO₂ u sloju u bh-s, kako u toku dana (6.20d), tako i u toku noći (6.21d). Modeliranje koncentracija NO₂ u različitim slojevima osetljivo je na stratifikaciju atmosfere, koja je u toku noći unutar šumskog sklopa izrazito stabilna. Prema tome, vazduh unutar šumskog sklopa miruje i smanjuje verovatnoću da će se koncentracija polutanta promeniti zbog veoma male brzine depozicije i hemijskih reakcija iz kojih su isključene sve fotohemijske reakcije. Međutim model očigledno ima teškoće u parametrizaciji predstavljenog stanja sredine pa gomila velike količine NO₂, koje se polako troše u toku jutarnjih sati (slika 6.20d), da bi se zalaskom sunca situacija ponovila (slika 6.21d). Koncentracije u toku dana naglo narastu i bivaju skoro konstantne kada se ustale svi prirodni procesi koji utiču na produkciju i razlaganje gasova. U toku noći stabilna atmosfera skladišti emitovani NO iz zemljišta koji se veoma brzo oksiduje u NO₂ i koncentracija NO ostaje konstantna u toku noći. Oksidacija NO u NO₂ može biti još jedan od razloga prenaplašene koncentracije NO₂ u toku noći.



Slika 6.20 Osmotrene i modelirane srednje vrednosti koncentracije NO i NO₂ za 12 sati (dan).

NOĆ



Slika 6.21 Osmotrene i modelirane srednje vrednosti koncentracije NO i NO₂ za 12 sati (noć).

Razlike u koncentracijama u dva sprata biljnog sklopa h-bh i bh-s ukazuju na prisustvo turbulentnih flukseva svih jedinjenja obuhvaćenih hemijskim CBM4 modulom.

Složena hemijska shema MLC-Chem sheme poslužila je za simulaciju koncentracije i turbulentnih flukseva različitih jedinjenja čija koncentracija nije poznata, a koji su rezultat hemijske konverzije primarnih reaktanata. Na slici 6.22 prikazane su koncentracije NO i NO₂ (primarni reaktanti), u dva sloja biljnog sklopa h-bh i bh-s, uz koncentracije jedinjenja koja su karakteristična za šumske lokalitete, a to je isparljivo organsko jedinjenje izopren (C₅H₈) i njegovi produkti oksidacije metil vinil keton (MKV) i metakrolein (MACR) uz koncentraciju OH[•]. Sve koncentracije izražene su u ppt. Kompleksna hemijska struktura PS prirodnih šuma može da dovede do različitih scenarija kada je reč o produkciji i degradaciji NO_x, o čemu je bilo reči u podpoglavljima 2.3.4 i 2.4.5. Nedostatak merenja onemogućio je poređenje izračunatih turbulentnih flukseva sa osmotrenim vrednostima. Iz tog razloga teško je izvršiti interpretaciju rezultata. Koncentracije jedinjenja kao i odgovarajući turbulentni fluksevi NO, NO₂, O₃, C₅H₈, MKV i MACR (10¹⁵ molekula m⁻² s⁻¹) prikazani na slici 6.23, pokazuju uticaj meteoroloških elemenata na procese razmene iznad i unutar biljnog sklopa. Indikator je nagli pad vrednosti turbulentnih flukseva jedinjenja koja se uklanjaju suvom depozicijom (f_{O_3}), odnosno skok vrednosti turbulentnog fluksa jedinjenja koja se uklanjaju hemijskim reakcijama ($f_{C_5H_8}$). Razlike se javljaju kod jedinjenja kod kojih je dominantan proces uklanjanja suva depozicija i povezan je sa parametrizacijom stabilnosti atmosfere izračunate preko Ričardsonovog broja. Do skoka, odnosno pada vrednosti dolazi u momentu inverzije, kada nestabilna stratifikacija zamenjuje

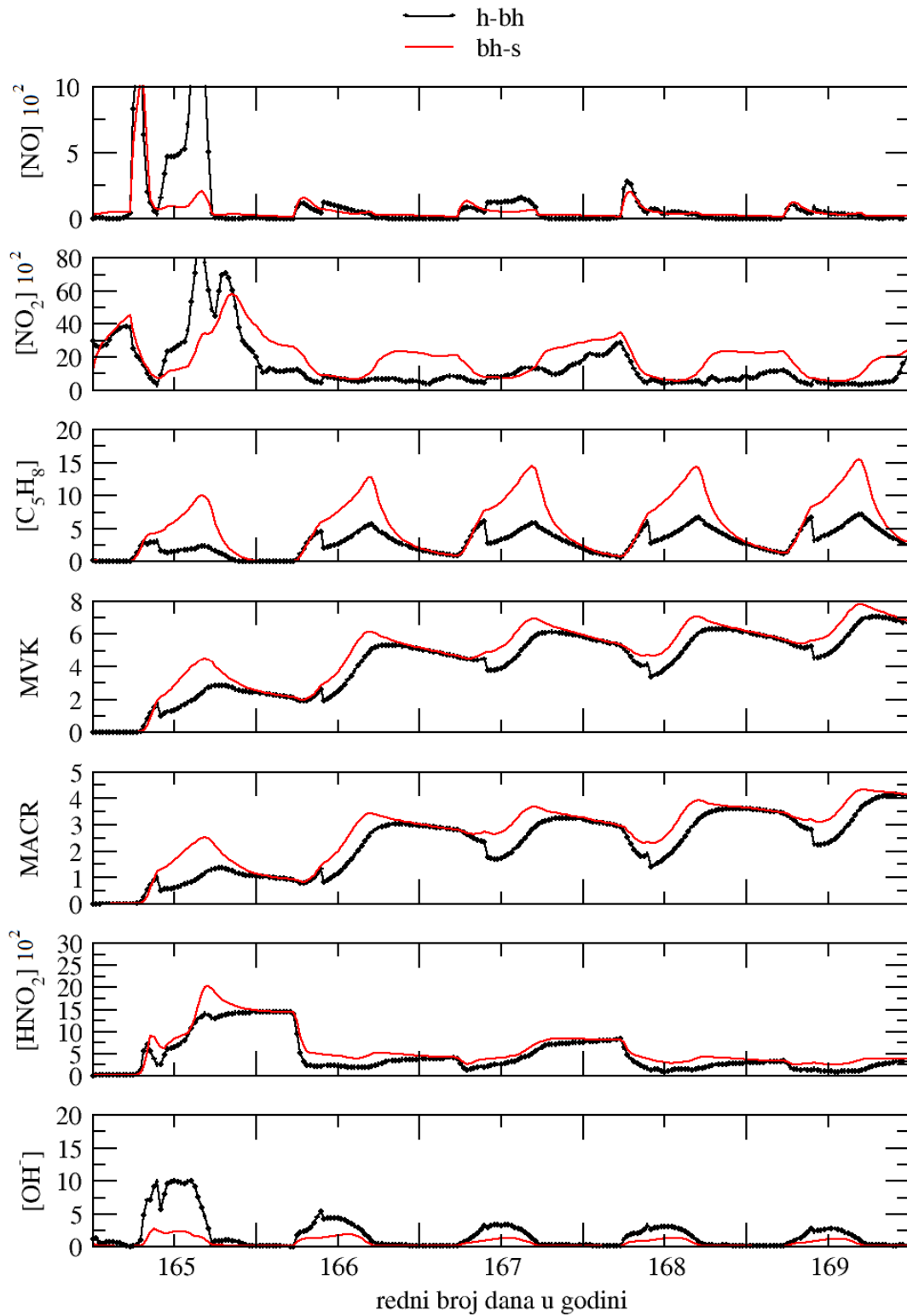
stabilnu noćnu stratifikaciju. S obzirom na to što ne postoje merenja sa kojima bi izvršili poređenje dobijenih rezultata teško je zaključiti da li je u pitanju greška modela ili zaista prirodni fenomen.

Tabela 6.5 Parametri korišćeni prilikom verifikacije MLC-Chem sheme.

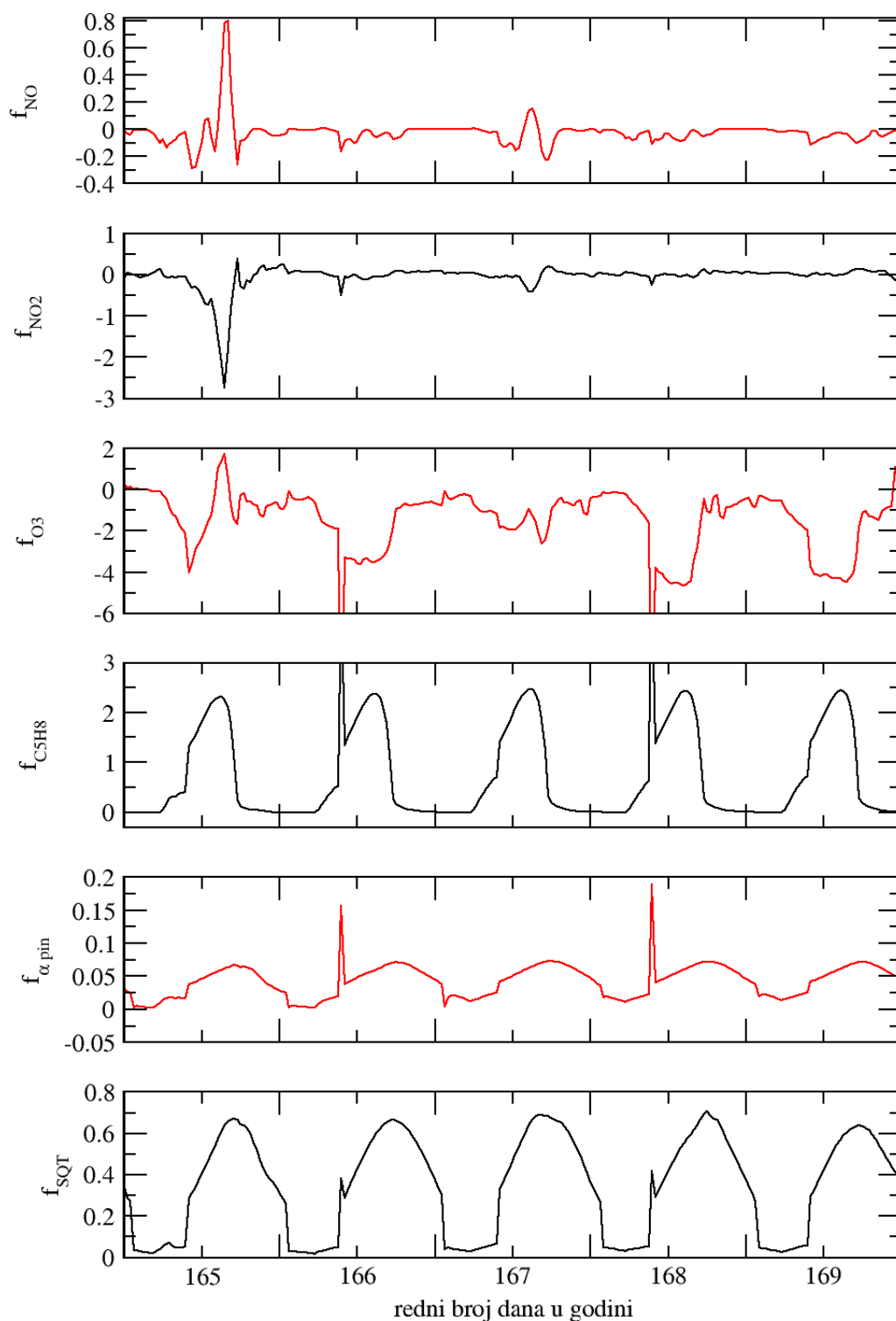
Parametri za inicijalizaciju MLC-Chem	Vrednosti parametara	Literatura
Pokrivenost vegetacijom (0-1)	0,90	Urbanski et al. (2007)
LAI ($m^2 m^{-2}$)	4	Urbanski et al. (2007)
Visina vegetacije (m)	24	Hadley et al. (2009)
Visina hrapavosti (m)	2	Urbanski et al. (2007)
Vlažnost zemljišta	0,1	Hadley et al. (2009)
Poljski vodni kapacitet	0,2	Hadley et al. (2009)
Faktor emisije izoprena ($\mu g C g^{-1} hr^{-1}$)	8	MLC-Chem manual
Faktor emisije monoterpena ($\mu g C g^{-1} hr^{-1}$)	0,4	MLC-Chem manual
Ostale emisije VOC ($\mu g C g^{-1} hr^{-1}$)	0,2	MLC-Chem manual
Emisija radona (10^4 atoma $m^{-2} s^{-1}$)	0,3	MLC-Chem manual

Tabela 6.6 Vrednosti koncentracije trasera u MLC-Chem shemi.

Traseri	Inicijalne vrednosti koncentracije trasera (ppb)	Literatura
O ₃	30	
CO	70	
CH ₄	1700	
NO	0,2	MLC-Chem manual
NO ₂	0,2	
C ₅ H ₈	0,2	
NH ₃	0,5	



Slika 6.22 Koncentracije jedinjenja izračunata MLC-Chem shemom.



Slika 6.23 Turbulentni fluksevi jedinjenja izračunati MLC-Chem shemom.

6.5 Verifikacija modula za parametrizaciju fluksa CO₂

Verifikacija osnovnog modula za proračun ukupnog asimilovanog CO₂ (GPP) iznad biljnog sklopa izvršena je na četiri lokaliteta opisana u poglavlju 6.1. Vrednost GPP na nivou lista dobijena je upotrebom FvCB modela (podpoglavlje 3.2.1). Za izračunavanje ukupnog GPP na nivou biljnog sklopa, koji se može porediti sa osmotrenim vrednostima, koristili smo SS postupak skaliranja (podpoglavlje 3.3.2). Prednost SS postupka skaliranja je jednostavnost formulacije i broj objavljenih testova koji smanjuju problem velikog broja potrebnih parametara i omogućavaju upotrebu sheme u modelima većih prostornih razmera i manje rezolucije. Mane se ogledaju u pretpostavci da je biljni sklop homogen i opisan konstantnim $LAD(z)$ koji ne uzima u obzir heterogenu niti višeslojnu strukturu vegetacije čime se unosi greška u proračun profila intenziteta PAR unutar biljnog sklopa (Lalic et al. 2013). Greška u računanju profila PAR prenosi se na proces skaliranja i simulacije ukupnog GPP-a (Firanj et al., 2014).

Osmotrene vrednosti GPP u toku dana dobijene su kao razlika između osmotrenih vrednosti NEE i respiracije karakteristične za svaki lokalitet. Intenzitet fluksa CO₂ iz zemljišta u toku dana izračunat je na osnovu gustine fluksa u toku noći. Proces izdvajanja GPP iz ukupnog NEE bazira se na činjenici da biljke ne obavljaju fotosintezu u toku noći. Eliminisanjem jedne nepoznate dobijamo da je noćni NEE zapravo jednak respiraciji iz zemljišta. Pretpostavka da je funkcionalna zavisnost između temperature i intenziteta respiracije u toku noći i u toku dana ista omogućava da se jednostavnim oduzimanjem izračunate visine respiracije u toku dana od NEE dođe do GPP. Međutim, pretpostavka važi samo ukoliko temperatura gornjih slojeva zemljišta ne varira značajno, što je zbog prisustva stelja na površini tla, česta situacija u šumama. Greške u osmotrenim GPP i NEE javljaju se prvenstveno zbog razlike u turbulentnim karakteristikama vazduha u toku noći i dana. Često je turbulentni transport u toku noći suviše mali da bi ga senzor, koji se nalazi iznad biljnog sklopa, detektovao. Iz tog razloga za dobijanje funkcionalne zavisnosti između noćne temperature zemljišta i intenziteta respiracije koriste se samo vrednosti turbulentnog fluksa CO₂ zabeležene kada je osmotrena vrednost u_* bila veća od 0,25 m s⁻¹ (Baldocchi, 2003).

Zavisnost gustine fluksa CO₂ iz zemljišta (respiracije) od temperature zemljišta dobijena je podešavanjem (fitovanjem, od engleske reči *fit*) Lojd&Tejlor empirijske formule (Lloyd and Taylor, 1994) eksperimentalnim podacima. Zavisnost noćnog turbulentnog fluksa CO₂ od temperature zemljišta omogućila je izračunavanje koeficijenata nelinearnog fitovanja empirijske formule (jednačina 3.27). U tabeli 6.7 date su vrednosti koeficijenata Lojd&Tejlor empirijske formule za sve lokalitete.

Tabela 6.7 Vrednosti parametara R_{ref} i E_0 dobijenih fitovanjem Lojd&Tejlor empirijske formule.

	NSA-OBS	SSA-OA	HF-EMS	ABR-RJ
R_{ref} (μmol m ⁻² s ⁻¹)	2,248	2,978	4,202	1,550
E_0 (°C)	273,41	153,08	77,85	329,09

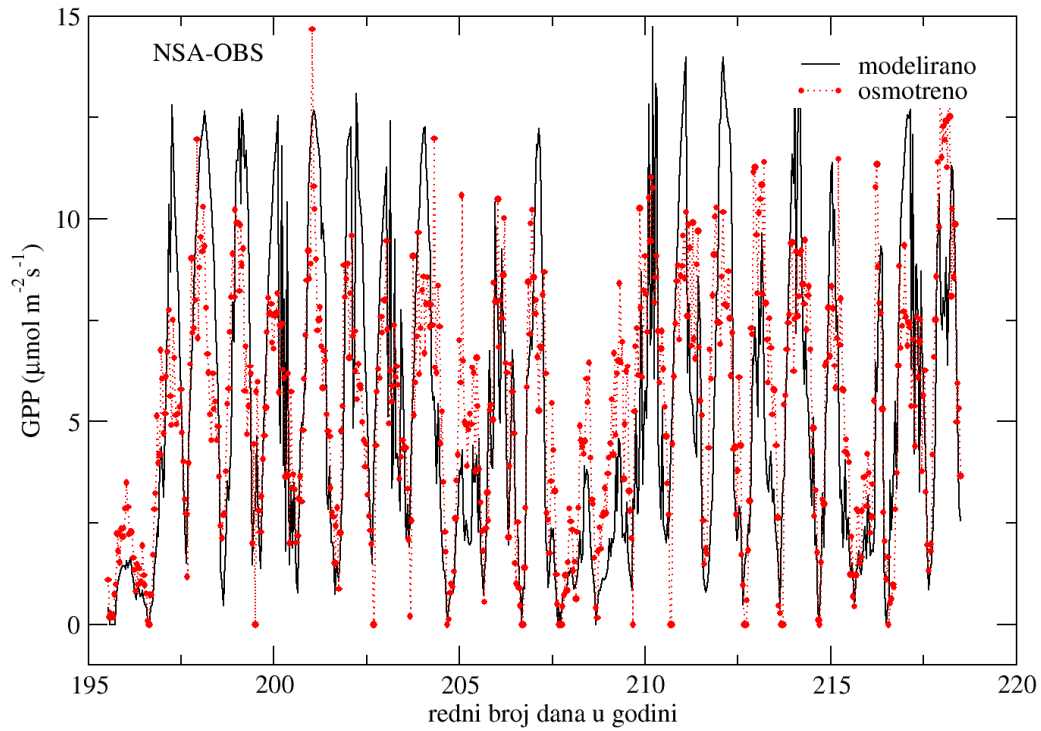
Modelirane i osmotrene vrednosti GPP predstavljene su sa pozitivnim predznakom da bi se pokazao intenzitet asimilacije. Asimilacija CO₂ od strane biljnog sklopa u toku dana predstavlja ponor gasa, pa bi pravi smer fluksa bio ka biljnom sklopu, odnosno negativan. Vrednosti fizioloških parametara upotrebljenih u procesu modeliranja preuzeti su iz literature prema PFT kojoj pripada šumska vegetacija određenog lokaliteta (tabela 6.8).

Kvantitativna analiza rezultata obavljena je, kao i prilikom analize prethodnih simulacija, analizom i poređenjem vrednosti v , σ_c , i σ_o kao i poređenjem osmotrenih i modeliranih vrednosti preko dijagrama rasipanja uz izračunavanje r^2 za sve lokalitete. Treba naglasiti da su u ovim izračunavanjima korišćene srednje dnevne vrednosti posmatranih veličina, i to samo za period dana u kome je intenzitet fotosintetski aktivnog zračenja bio veći od 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. U nastavku će prvo biti izložene izračunate vrednosti gore navedenih parametara da bi na kraju poglavlja bila urađena analiza za sve lokalitete.

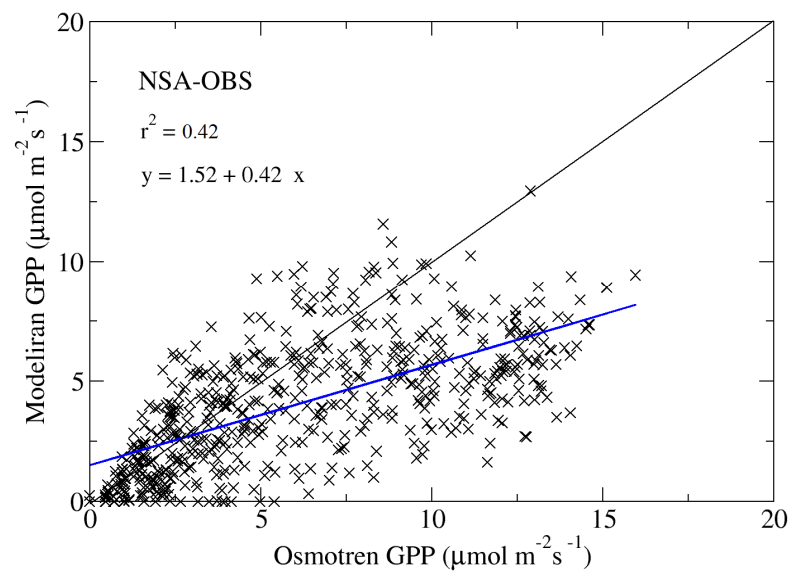
Tabela 6.8 Vrednosti biohemijski parametara prema PFT.

Parametri	Listopadne šume	Zimzelene šume	Tropske šume	Literatura
opseg $V_{c\text{max}}$ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ za 25°C)	57,7±21,2	62,5±24,7	41,0 ±15.1	Wullschleger 1993; Medlyn et al., 1999; Niu et al., 2005; Kattge et al., 2009
korišćeni $V_{c\text{max}}$	60	70	60	
N_0 (g m^{-2})	1,74±0,71	3,10±1,35	2,17±0,80	Kattge et al., 2009
korišćeni N_0	1,74	3,10	2,17	
χ_n ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	0,59	0,33	0,46	Kattge et al., 2009

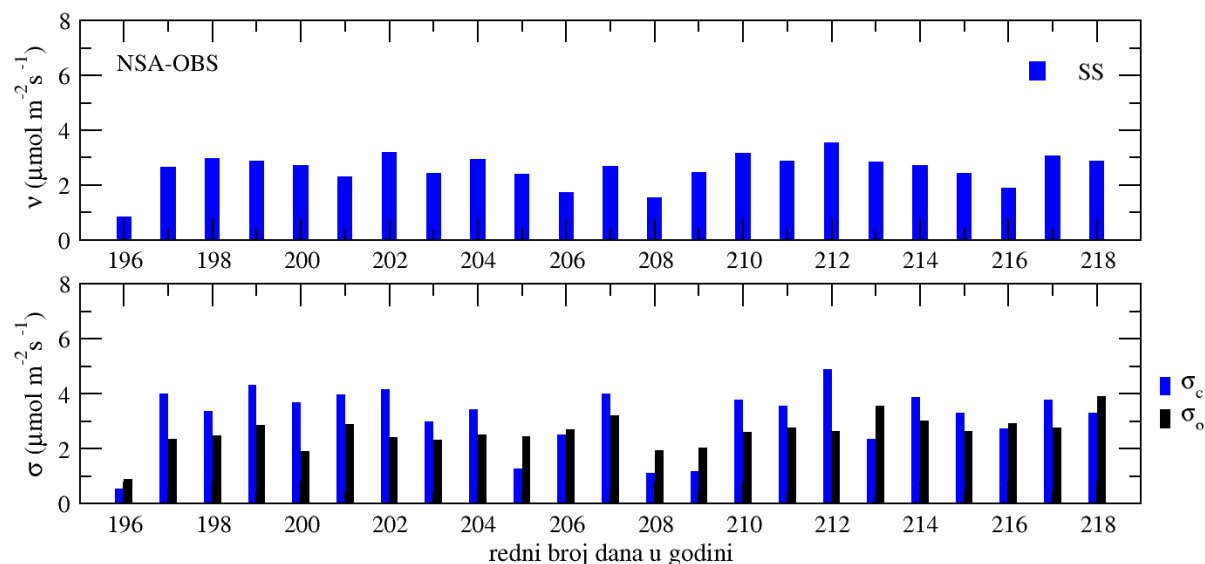
Na slici 6.24 prikazan je GPP izračunat i izmeren na lokalitetu NSA-OBS koji se u letnjim mesecima ogleda nižim intenzitetom GPP. Zapaža se da model daje više vrednosti GPP pri veoma niskim vrednostima zračenja u pojedinim danima. Dijagram rasipanja (slika 6.25) pokazuje odstupanje od srednje linije i r^2 od 0,46 (tabela 6.9). Greška dobijena iz odnosa modeliranog i osmotrenog GPP izražena u obliku v kreće se u granicama od 0,8 do 3,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.26, tabela 6.10). Standardna devijacija izračunatih vrednosti kreće se u opsegu od 0,5 do 4,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Vrednost σ_o kreće se od 0,95 do 3,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (tabela 6.10).



Slika 6.24 Modelirane i osmotrene vrednosti GPP na lokalitetu NSA-OBS.

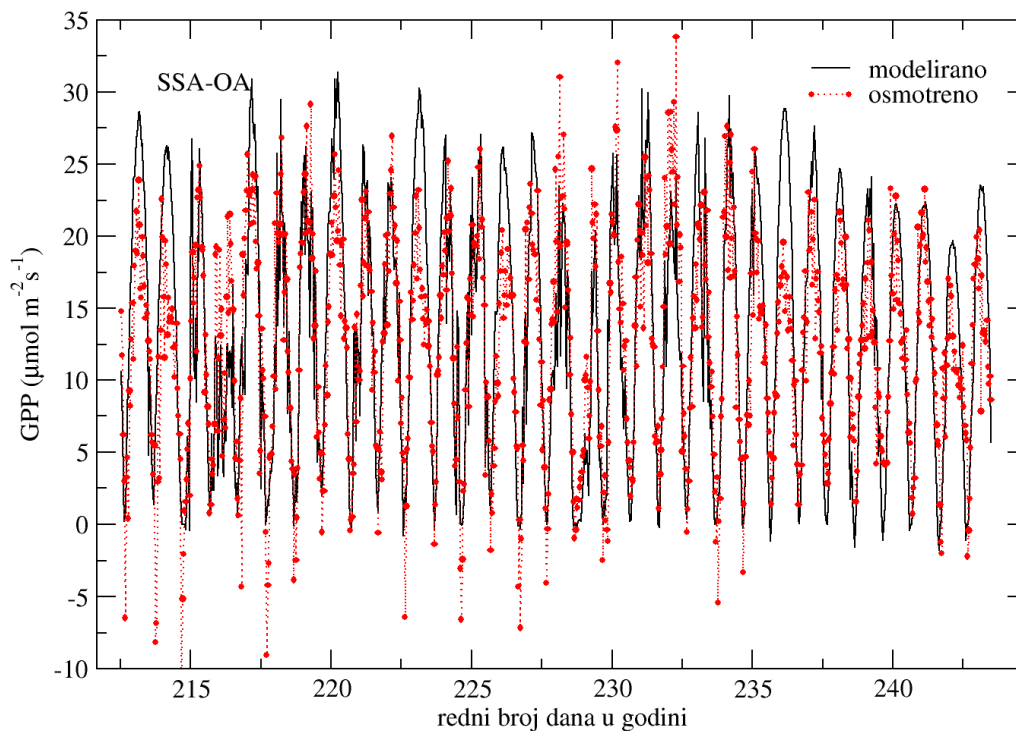


Slika 6.25 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na lokalitetu NSA-OBS.

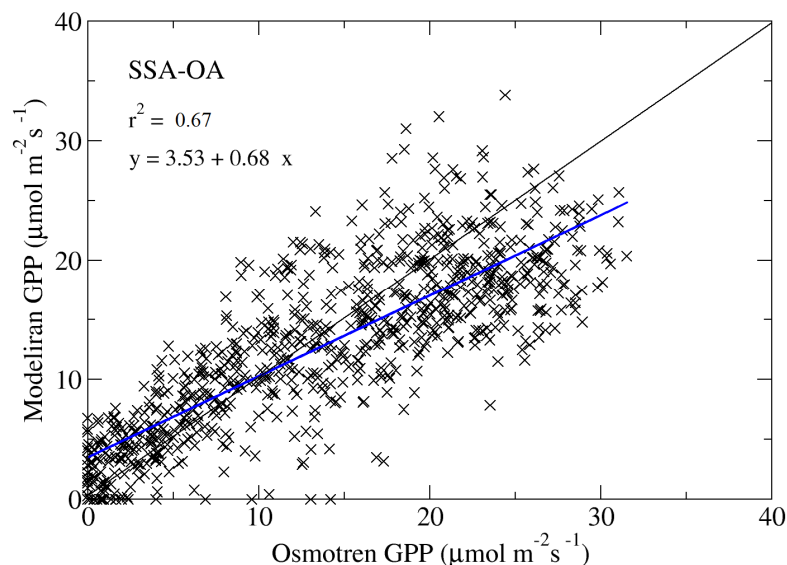


Slika 6.26 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP dobijenih SS postupkom skaliranja na NSA-OBS.

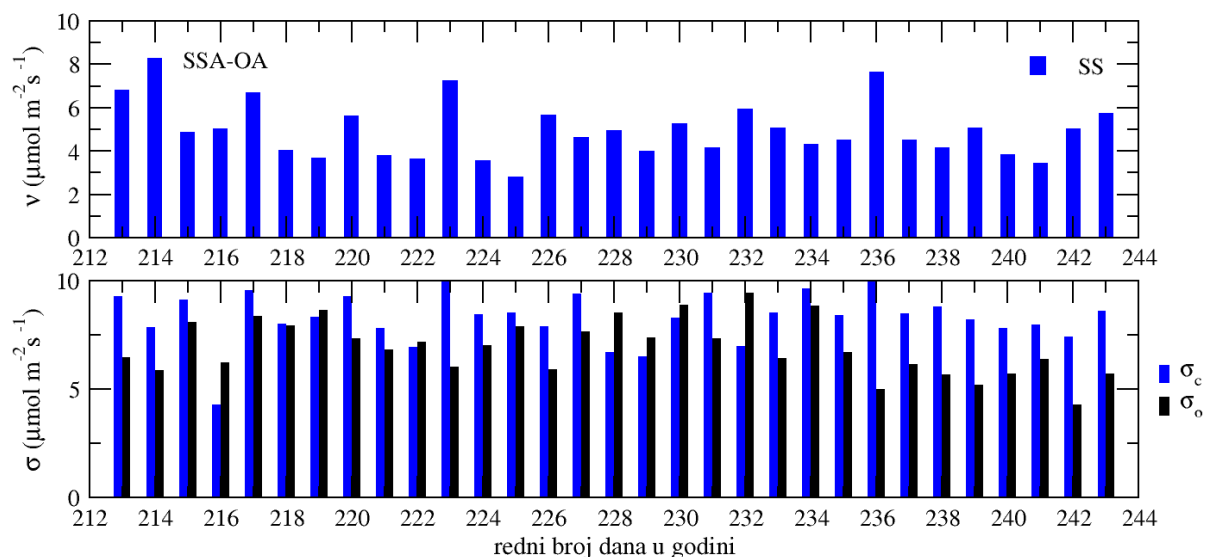
Rezultati poređenja osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na SSA-OA lokalitetu prikazane su na slici 6.27. Karakterističan je visok intenzitet respiracije zemljišta koja se javlja u ranim jutarnjim satima (negativne vrednosti fluksa na slici 6.27), dok biljni sklop ne preuzme ulogu ponora CO_2 . Dijagram rasipanja rezultata pokazuje slaganje sa srednjom linijom i r^2 od 0,67 (slika 6.28, tabela 6.9). Izračunate vrednosti v kreću se u granicama od 2,8 do 8,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.29, tabela 6.10), dok se izračunate vrednosti σ_c kreću se u opsegu od 4,3 do 9,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



Slika 6.27 Modelirane i osmotrene vrednosti GPP na lokalitetu SSA-OA.

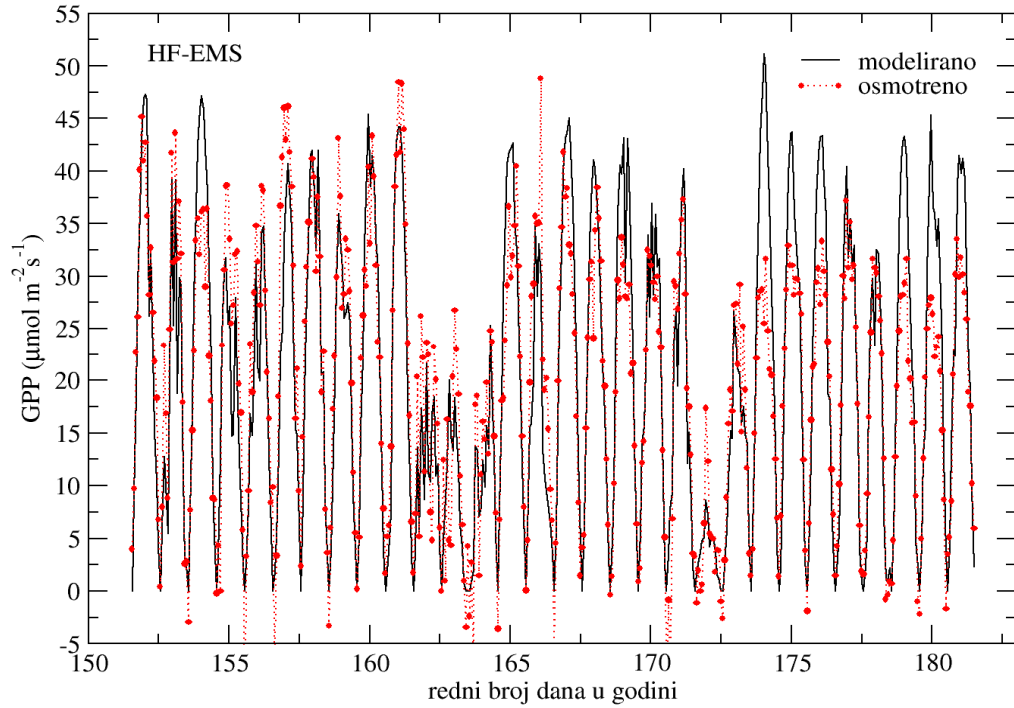


Slika 6.28 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na lokalitetu SSA-OA.

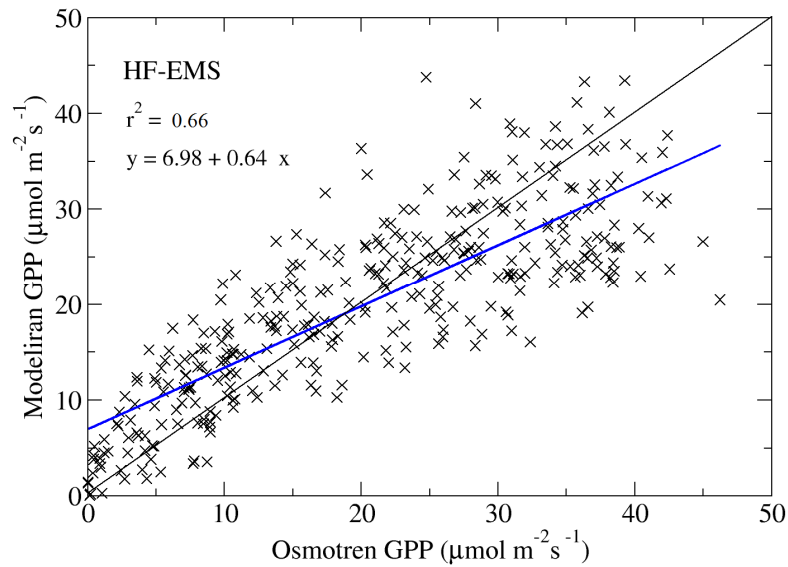


Slika 6.29 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP dobijenih SS postupkom skaliranja na SSA-OBS.

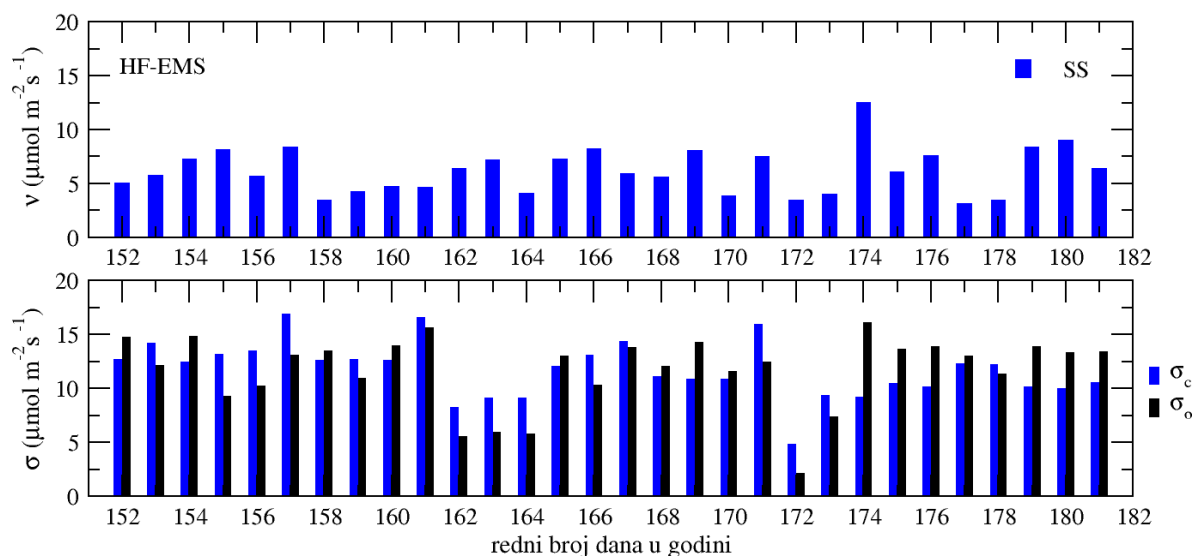
Osmotrene i modelirane vrednosti GPP na lokalitetu HF-EMS prikazane su na slici 6.30. Listopadne šume umerenih širina, kao što je šuma na HF-EMS lokalitetu, poznate su po izrazito visokom nivou intenziteta fotosinteze. Merenja u toku vegetacionog perioda sa najvišom vrednošću LAI i u idealnim meteorološkim uslovima, pokazala su da GPP može dostići vrednost i do blizu $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP prema dijagramu rasipanja slaganje sa srednjom linijom i vrednost r^2 iznosi 0,66 (slika 6.31, tabela 6.9). Srednje kvadratno odstupanje modeliranog GPP kreće se u granicama od $3,1$ do $9,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, uz maksimalnu vrednost od $12,5$ u $174.$ danu u godini (slika 6.32, tabela 6.10). Vrednosti σ_c kreću se u opsegu od $4,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ do $16,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.



Slika 6.30 Modelirane i osmotrene vrednosti GPP na lokalitetu HF-EMS.

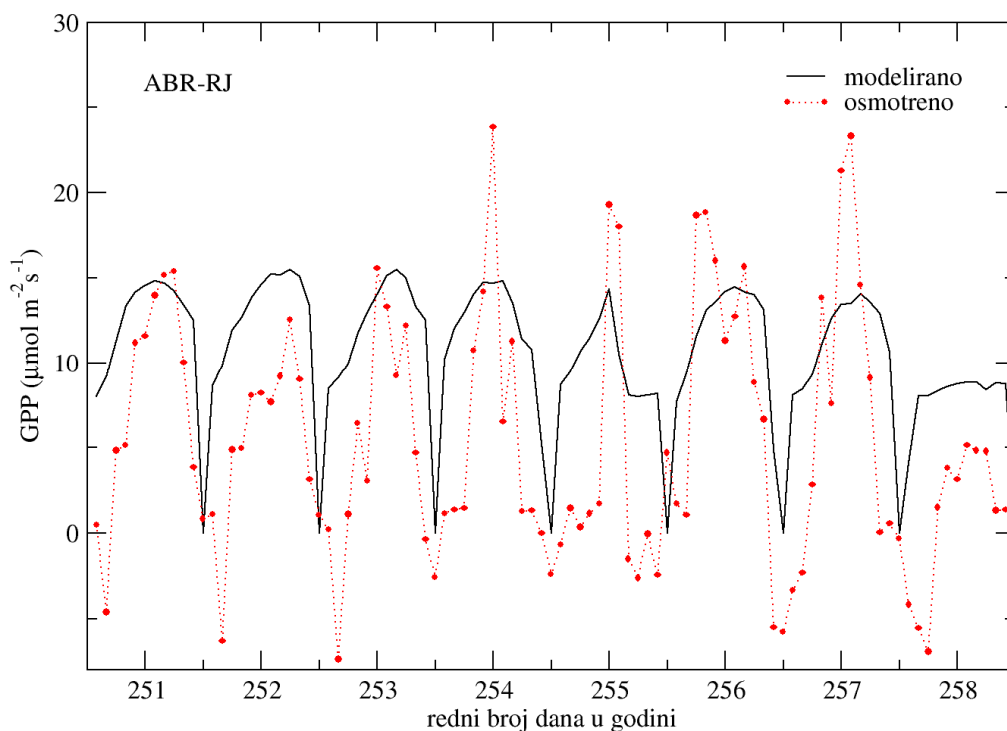


Slika 6.31 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na lokalitetu HF-EMS.

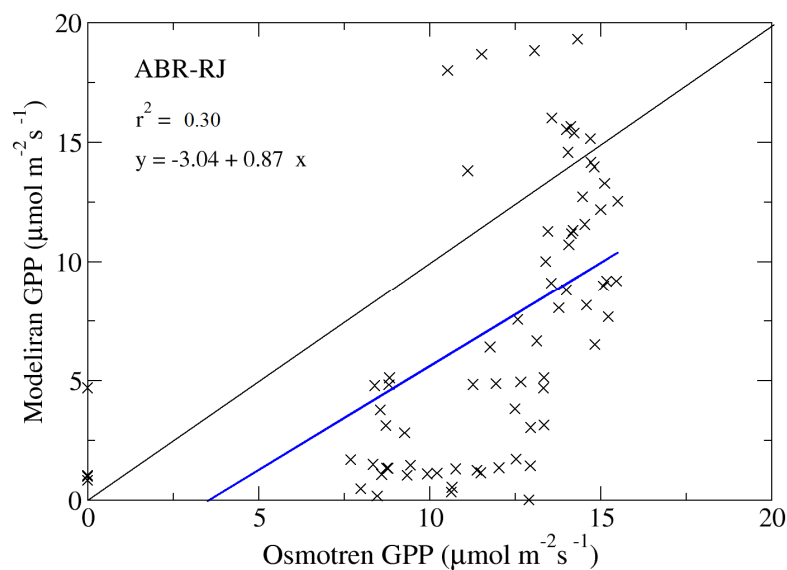


Slika 6.32 Vrednosti ν , σ_c i σ_o GPP dobijenih SS postupkom skaliranja na HF-EMS.

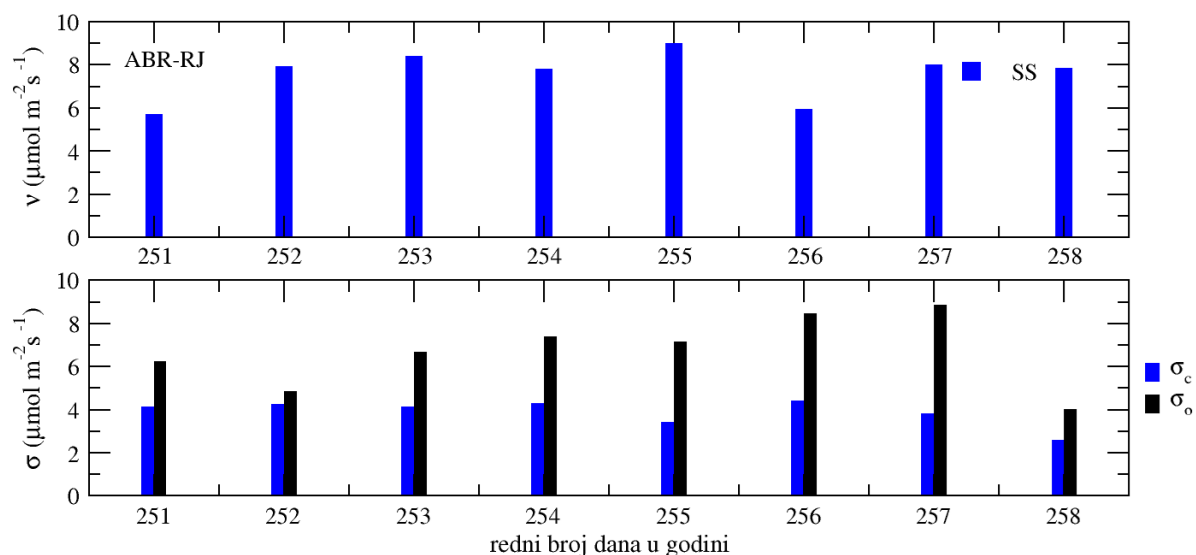
Tropske šume, lokalitet ABR-RJ, karakteriše brza promena između noćne respiracije i dnevnog procesa asimilacije CO_2 (slika 6.26) koja se ne javlja u ranim jutarnjim satima, kao što je slučaj na ostalim lokalitetima, nego kasnije. Dijagram rasipanja ukazao je na grešku modeliranja preko vrednosti r^2 koja iznosi 0,30 (slika 6.34, tabela 6.10). Takođe, izračunate vrednosti ν kreću se u granicama od 5,9 do 9,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.35, tabela 6.10). Opseg σ_c je od 2,6 do 4,4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Maksimalna σ_o iznosila je 8,4 i javila se 257. danu u godini koji je karakterističan po velikoj razlici između vrednosti fluksa u jutarnjim satima i u toku dana.



Slika 6.33 Modelirane i osmotrene vrednosti GPP na lokalitetu ABR-RJ.



Slika 6.34 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP na lokalitetu ABR-RJ.



Slika 6.35 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP dobijenih SS postupkom skaliranja na ABR-RJ.

Kvantitativna analiza slaganja modeliranih i osmotrenih vrednosti GPP na četiri lokaliteta izvedena preko dijagrama rasipanja i r^2 pokazuje: 1) na NSA-OBS r^2 iznosi 0,42, što ukazuje na značajno povezane osmotrene i modelirane vrednosti; 2) na SSA-OA r^2 iznosi 0,67, a na HF-EMS 0,66 što ukazuje na jaku korelaciju između simulacija i osmatranja na oba lokaliteta; 3) na ABR-RJ javlja se najniža vrednost r^2 od 0,30.

Prema kriterijumu koji vrednuje kvalitet simulacije na osnovu odnosa v , σ_c i σ_o može da se zaključiti: 1) na NSA-OBS kvalitet simulacije je zadovoljavajući jer je vrednost v bila niža od vrednosti σ_o u 12 dana od ukupnih 23 korišćenih prilikom simulacije, dok su se razlike između σ_c i σ_o javile u maksimalnom opsegu $\pm 2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.26); 2) na SSA-OA lokalitetu kvalitet simulacije je visok, jer je v bila niža od vrednosti σ_o u 27 dana od ukupnih 31, a razlika između σ_c i σ_o kretala se u opsegu

od $\pm 3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.29); 3) vrednosti v na HF-EMS lokalitetu bile su niže od σ_o u 27 od 30 dana, dok je razlika između σ_c i σ_o bila u granicama od $\pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.32) što ukazuje na veoma visok kvalitet simulacije; 4) na ABR-RJ kvalitet simulacije je mali jer je vrednost v bila niža od vrednosti σ_o u 3 dana od ukupnih 8 dana u setu podataka, dok su vrednosti σ_c bile manje od σ_o u svakom danu sa razlikom do $\pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.35).

Iz analize podataka iznesenih u kvantitativnoj analizi zaključujemo da SS postupak skaliranja unosi greške u proračun razmene CO_2 između biljnog sklopa i atmosfere na dva lokaliteta sa karakterističnom heterogenošću biljnog sklopa (NSA-OBS i ABR-RJ). Na lokalitetu sa približno homogenom vertikalnom strukturom biljnog sklopa (HF-EMS) vrednosti grešaka su značajno manje i uočava se povećanje r^2 . Veća odstupanja javila su se u poslednjoj nedelji osmatranja na HF-EMS lokalitetu, kada su osmotrene vrednosti bile manje od modeliranih. Međutim, meteorološki elementi nisu ukazali na značajne promene u stanju atmosfere. Najveće slaganje između osmotrenih i modeliranih vrednosti javlja se na SSA-OA lokalitetu ocenjeno prema r^2 i prema odnosu v i σ_o , iako smo prethodno naglasili da je vegetacija na ovom lokalitetu heterogena sa gustim drugim spratom vegetacije. Zaključujemo da su se greške smanjile iz razloga što, sa jedne strane, CO_2 modul sa SS skaliranjem po pravilu daje više vrednosti od osmotrenih, dok sa druge strane, na lokalitetu SSA-OA doprinos ukupnom GPP daje donji sloj vegetacije. Najčešća manifestacija greške skaliranja je upravo veća modelirana vrednosti GPP od osmotrene, koja je posledica neadekvatnog računanja profila PAR koji ograničava intenzitet fotosinteze. Prelaz, koji nije u saglasnosti samo sa povećanim intenzitetom zračenja, predstavlja problem za sve procese skaliranja fluksa CO_2 sa lista na biljni sklop. U slučaju predstavljenog načina parametrizacije turbulentnog transporta CO_2 unutar i iznad biljnog sklopa, transport je sveden na jednostavni proces difuzije gasa iz vazduha u unutrašnjost lista i obrnuto. Gustina biljnog sklopa i stabilna stratifikacija, koja se razvija u šumama u toku jutra, onemogućava razvijanje turbulentnih transporta. Međutim, uprkos tom saznanju u tropskim šumama (ABR-RJ) se javljaju brzi vertikalni turbulentni transporti koji ventiliraju biljni sklop i iznose gasove nakupljene u toku noći. Prema tome, u jutarnjim satima biljni sklop i dalje predstavlja izvor CO_2 . Promena između izvora i ponora odigrava se naglo u samo jednom satu (slika 6.26). Nešto veće vrednosti GPP u toku dana smanjuju grešku na dnevnom nivou na ABR-RJ lokalitetu.

Male greške u modeliranju pokazale su da je CO_2 modul kreiran da radi u okviru MLC-LAPS sheme pogodan za izračunavanje razmene CO_2 između atmosfere i različitih šumskih sklopova, ali da bi kvalitetan opis strukture biljnog sklopa u procesu skaliranja GPP poboljšao tačnost simulacija.

Tabela 6.9 Vrednosti koeficijenta korelacije i determinacije osmotrenog i modeliranog GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

	r	r^2
NSA-OBS	0,65	0,42
SSA-OA	0,82	0,67
HF-EMS	0,81	0,66
ABR-RJ	0,55	0,30

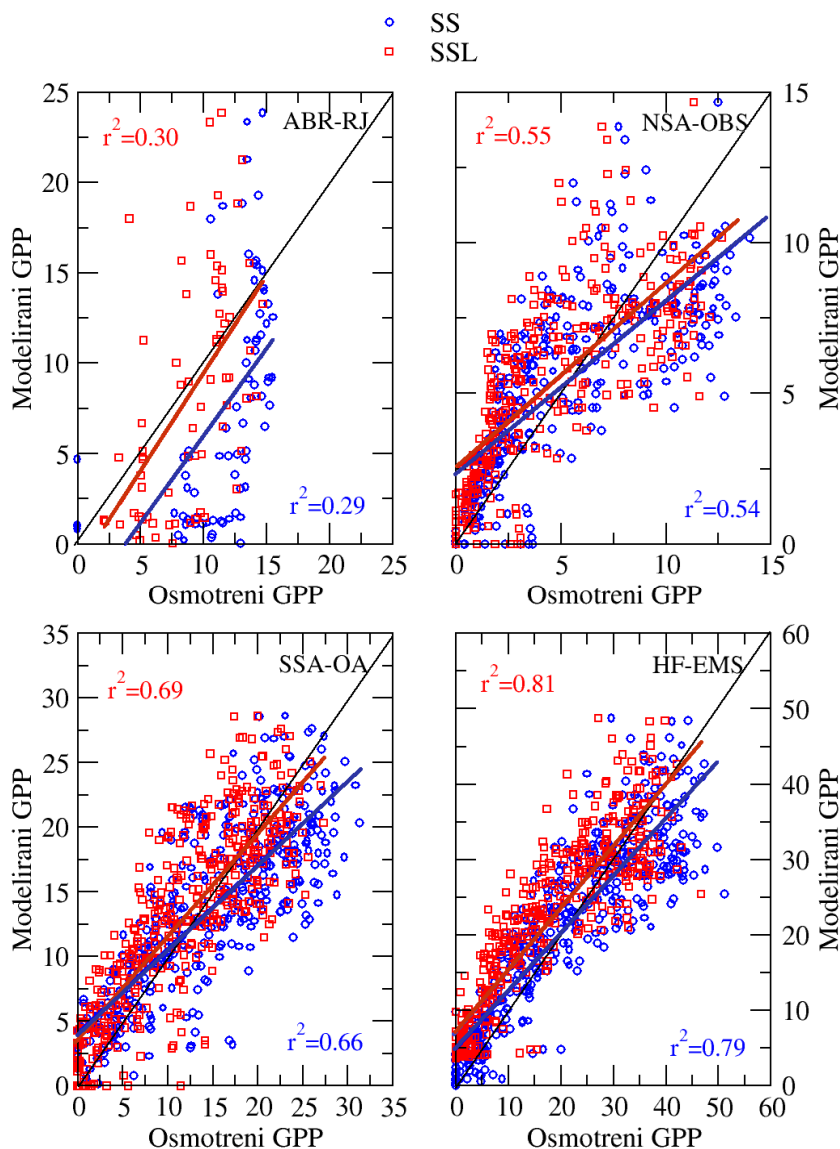
Tabela 6.10 Opseg vrednosti v , σ_c i σ_o GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) izračunatog u CO₂ modulu.

	NSA-OBS	SSA-OA	HF-EMS	ABR-RJ
opseg v	0,8–3,5	2,8–8,3	3,1–12,5	5,9–9,0
dan u godini v_{max}	212	214	174	255
opseg σ_c	0,5–4,9	4,3–10,2	4,8–16,9	2,6–4,4
dan u godini σ_{max}	212	236	157	257
opseg σ_o	0,9–3,9	4,6–9,5	2,4–16,8	4,0–8,9
dan u godini $\sigma_{o,max}$	218	215	161	257

6.6 Verifikacija SSL postupka skaliranja

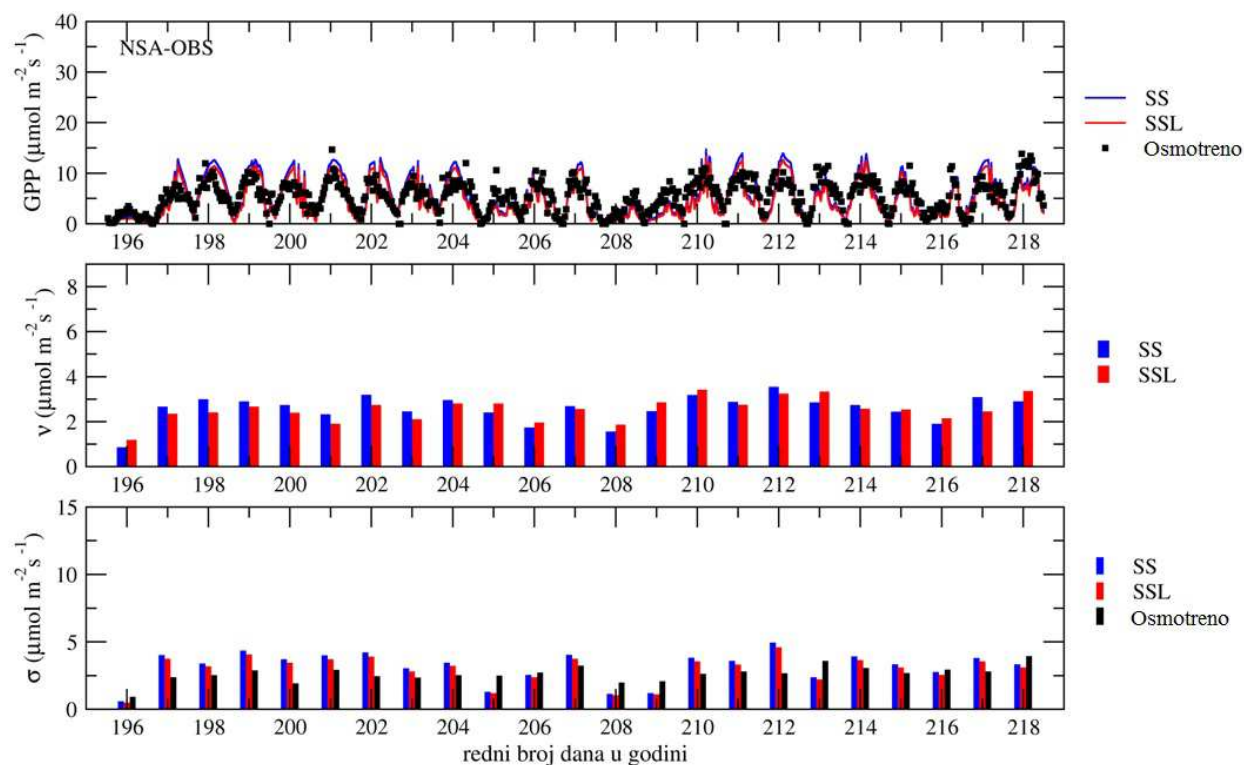
U podpoglavlju 5.2.2 opisan je predloženi SSL postupak skaliranja baziran na $LAD(z)$ konceptu koji uzima u obzir vertikalnu heterogenost biljnog sklopa. U ovom poglavlju verifikacija novog SSL postupka skaliranja obavljena je korišćenjem novog CO₂ modula. Prednosti SSL postupka skaliranja u modeliranju NO_x i ostalih reaktivnih jedinjenja biće prikazane u podpoglavljima 6.7.1 i 6.7.2 u okviru testiranja uticaja strukture biljnog sklopa na koncentraciju i turbulentne flukseva jedinjenja. Uvedene pretpostavke testirane su poređenjem simuliranih vrednosti GPP dobijenih SS (GPP_{SS}) i SSL (GPP_{SSL}) postupkom skaliranja. Podaci korišćeni u procesu verifikacije su izmerene vrednosti koncentracije CO₂ i NEE, odnosno GPP na četiri lokaliteta opisana u poglavlju 6.1. Parametri potrebni za računanje $LAD(z)$ dobijeni su iz literature (LAI) i vizuelno preko opisa strukture krošnje izvedene prema PFT, odnosno prema vrednosti ravni nultog pomeranja koja približno odgovara z_m . Kvantitativna analiza rezultata izvedena je preko procedura opisanih u poglavlju 6.2.

Na lokalitetu NSA-OBS parametar upotrebljen u SSL skaliranju z_m , koji opisuje strukturu biljnog sklopa, podešen je na $0,8h$, gde je sa h obeležena visina biljnog sklopa. Iako je pojava L_m na visini od $0,8h$ pomalo nekarakteristična za zimzeleno drveće, biljnim sklopom na NSA-OBS dominira crna smreka čija krošnja je koncentrisana u gornjem delu stabla, dok su niži delovi goli bez zelene mase. Rezultati poređenja osmotrenih vrednosti GPP i modeliranih GPP_{SS} i GPP_{SSL} prikazani su na dijagramu rasipanja (slika 6.36, tabela 6.11). Vrednost r^2 povećava se prilikom upotrebe SSL postupka skaliranja za 2 %, što odgovara promeni koeficijenta korelacije od +0,15. Opseg v , σ i dani u kojima su se javile maksimalne vrednosti dati su u tabeli 6.12 za sve lokalitete na kojima se izvršila validacija SSL postupka skaliranja vrednosti GPP. Kriterijum kvaliteta simulacije preko v i σ pokazao je: 1) srednje kvadratno odstupanje GPP_{SSL} od osmotrenih vrednosti (v_{SSL}) manje je od srednjeg kvadratnog odstupanja GPP_{SS} od osmotrenih vrednosti (v_{SS}) u 16 od ukupno 23 dana korišćena u procesu verifikacije; 2) razlika standardne devijacije podataka izračunatih SSL postupkom skaliranja (σ_{SSL}) i standardne devijacije izmerenih podataka (σ_o) manja je od razlike standardne devijacije podataka izračunatih SS postupkom skaliranja (σ_{SS}) i σ_o u 70 % slučajeva; 3) u 18 od 23 dana v_{SSL} ima manju vrednost od σ_o , dok vrednost v_{SS} manja od σ_o u 10 od 23 dana merenja (slika 6.37).

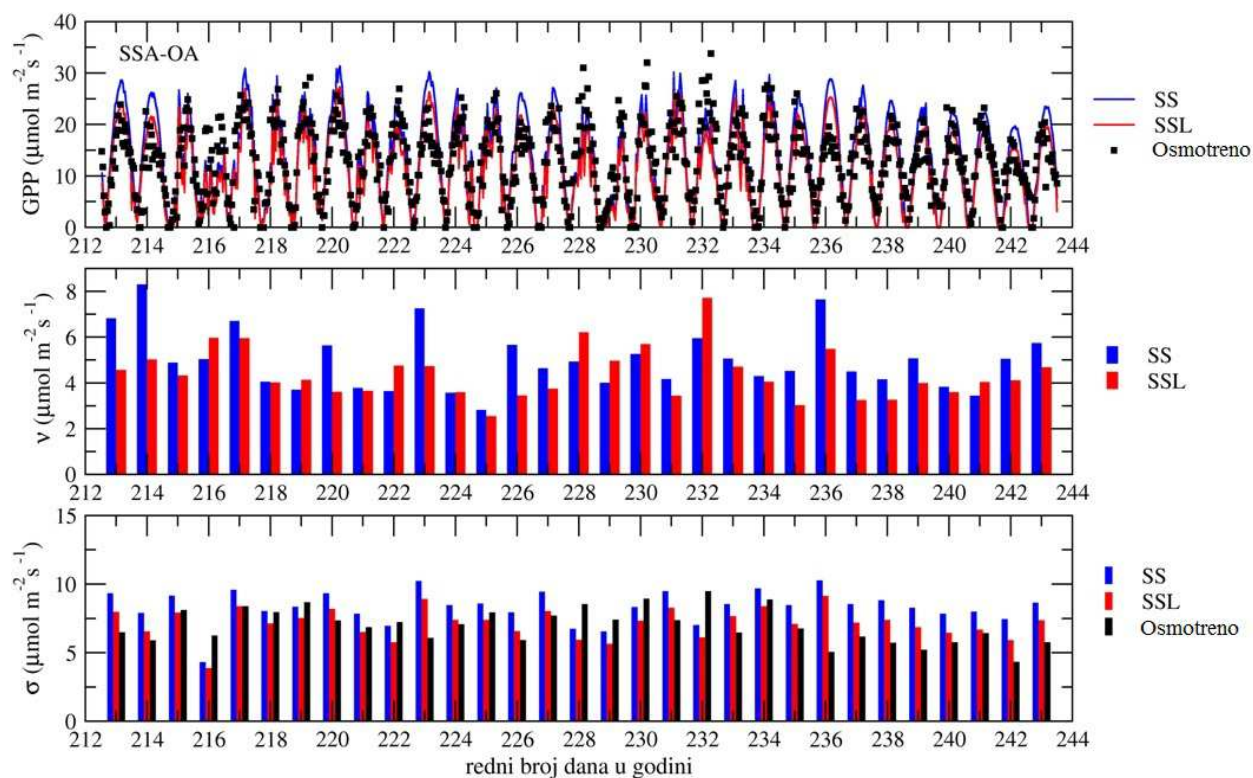


Slika 6.36 Poređenje osmotrenih i modeliranih vrednosti GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) preko SS i SSL principa skaliranja na četiri lokaliteta.

Na lokalitetu SSA-OA parametar z_m podešen je na vrednost od $0,85h$ prvenstveno zbog gustog donjeg sprata vegetacije koji ne dozvoljava sunčevom zračenju da dospe do površine. Dijagram rasipanja osmotrenih GPP i modeliranih vrednosti GPP_{SSL} i GPP_{SS} pokazuje promenu r^2 prilikom upotrebe SSL postupka skaliranja od 3% koji odgovara promeni koeficijenta korelacije od +0,17. (slika 6.36, tabela 6.11). Opseg v i σ , kao i dani u kojima su se javile maksimalne vrednosti dati su u tabeli 6.12. Kriterijum kvaliteta simulacije preko v i σ pokazuje: 1) v_{SSL} je manje od v_{SS} u 24 od 31 dan simulacija; 2) vrednost σ_{SSL} je bliža vrednosti σ_o od σ_{SS} u 75% slučajeva; 3) v_{SSL} je manje od σ_o u 30, dok vrednost v_{SS} manja od σ_o u 10 od 31 dana merenja (slika 6.38).

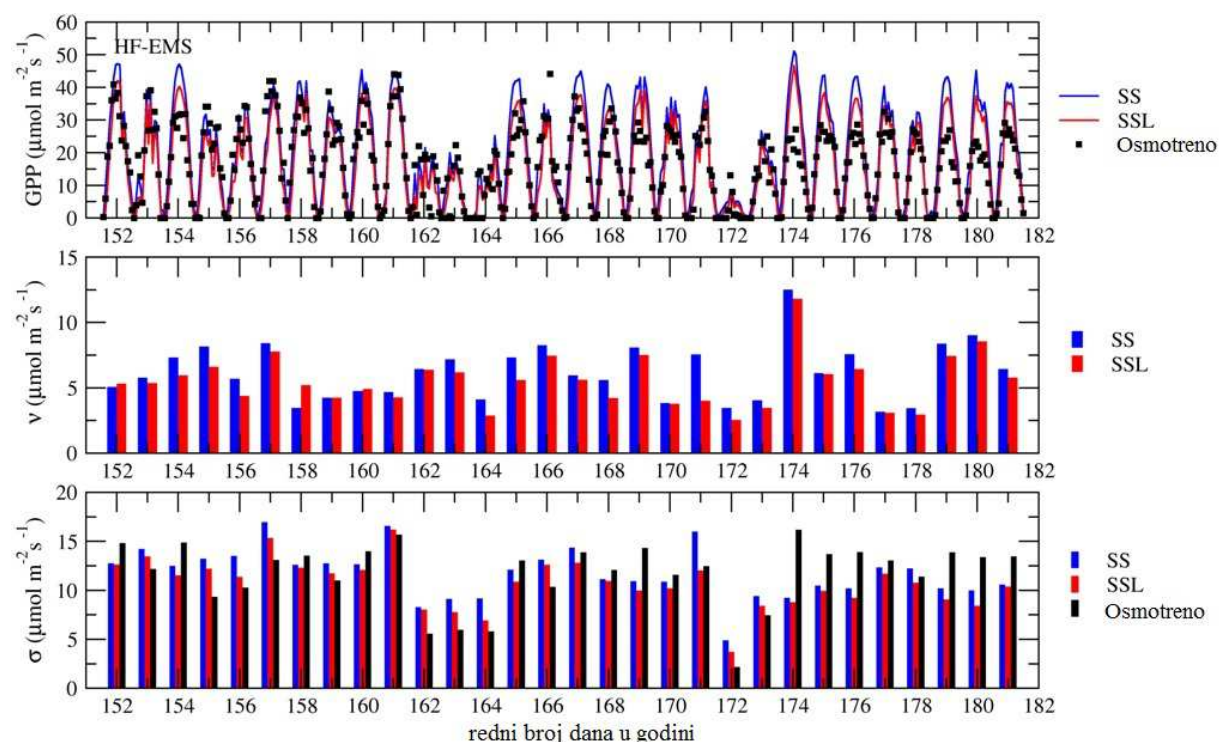


Slika 6.37 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP izračunatih sa SS i SSL procesom skaliranja na NSA-OBS.



Slika 6.38 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP izračunatih sa SS i SSL procesom skaliranja na SSA-OA.

Lokalitet HF-EMS, za razliku od prethodna dva lokaliteta, karakterističan je po homogenosti biljnog sklopa i iz tog razloga često je korišćen za verifikaciju SS postupka skaliranja u drugim SVAT shemama. Parametar z_m na lokalitetu HF-EMS postavljen je na $0,7h$. Dijagram rasipanja pokazuje promenu r^2 prilikom promene postupka skaliranja od 2% koji odgovara povećanju koeficijenta korelacije za 0,15. (slika 6.36, tabela 6.11). Opseg v i σ i dani u kojima su se javile maksimalne vrednosti dati su u tabeli 6.12. Rezultati na slici 6.39 pokazuju da je: 1) v_{SSL} manje od v_{SS} u samo 27 od 30 dana; 2) σ_{SSL} se nalazi bliže vrednosti σ_o od σ_{SS} u 50% situacija; 3) v_{SSL} je manje od σ_o u 27 dana, dok je vrednost v_{SS} manja od σ_o u 23 od 30 dana merenja.

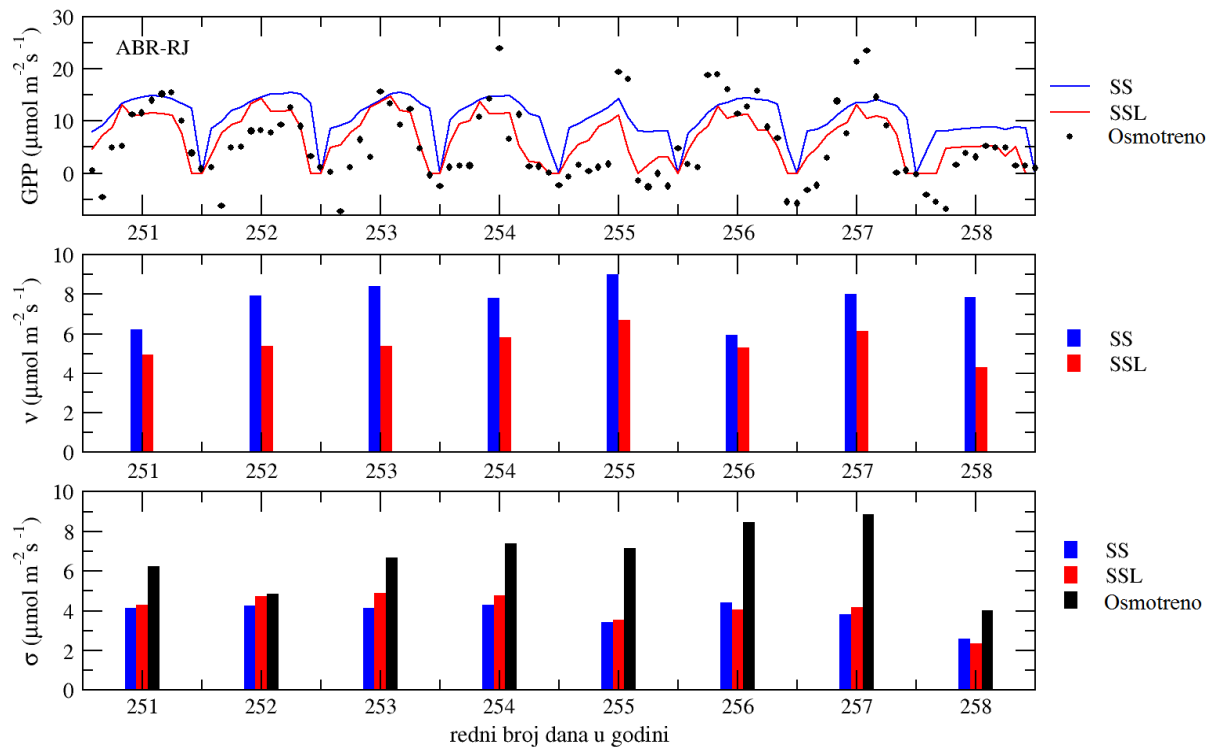


Slika 6.39 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP izračunatih sa SS i SSL procesom skaliranja na HF-EMS.

Karakteristika tropskih šuma je velika gustina vegetacije koja često propušta samo 1% ukupnog dolaznog kratkotalasnog zračenja u unutrašnjost biljnog sklopa, pri čemu se stvara karakteristična mikroklima. Parametar z_m u ovom slučaju postavljen je na $0,89h$. Dijagram rasipanja pokazuje slaganje sa srednjom linijom za GPP_{SSL} uz promenu r^2 od 1% prilikom promene postupka skaliranja koji odgovara promeni koeficijenta korelacije od +0,1 (slika 6.36, tabela 6.11). Opseg v , σ i dani u kojima su se javile maksimalne vrednosti dati su u tabeli 6.12. Kriterijum o kvalitetu simulacija izveden iz odnosa v i σ pokazuje: 1) vrednosti v_{SSL} manje su od v_{SS} u svakom danu; 2) σ_{SSL} se u svakom danu nalazi bliže σ_o od vrednosti σ_{SS} ; 2) v_{SSL} je u svakom danu manja od vrednosti σ_o , dok vrednost v_{SS} manja od σ_o u 5 od 8 dana merenja (slika 6.40).

Kvantitativna analiza rezultata modeliranja GPP preko dva postupka skaliranja, predloženog SSL i starog SS, izvršena na četiri lokaliteta pokazuje značaj uvrštavanja heterogenosti biljnog sklopa u proračun ukupnog GPP. Razlika prilikom promene postupka skaliranja vidljiva je na svakom

lokalitetu. S obzirom na to što su parametri potrebni za proračun intenziteta fotosinteze i propustljivosti biljnog sklopa za direktno, difuzno i rasejano zračenja ostali isti u oba postupka skaliranja, možemo da smatramo da su promene u računanju GPP posledica promene opisa strukture biljnog sklopa. Najveća promena r^2 od 3 %, koja odgovara promeni koeficijenta korelacije od +0.17, javila se na SSA-OA lokalitetu. Na svim ostalim lokalitetima unapređenje postupka skaliranja dovelo je do boljeg slaganja osmotrenih i modeliranih vrednosti sa srednjom linijom (slika 6.36). Srednje kvadratno odstupanje modeliranih GPP_{SSL} vrednosti od osmotrenih bilo je manje od srednjeg kvadratnog odstupanja modeliranih GPP_{SS}



Slika 6.40 Vrednosti v , σ_c i σ_o GPP izračunatih sa SS i SSL procesom skaliranja na ABR-RJ.

vrednosti od osmotrenih, na svim lokalitetima. Isto tako, vrednosti standardne devijacije GPP_{SSL} bile su bliže standardnoj devijaciji osmotrenih podataka, na svim lokalitetima, i vrednosti srednjeg kvadratnog odstupanja za GPP_{SSL} bile su niže od standardne devijacije osmotrenih podataka na svim lokalitetima. Posebno se izdvaja HF-EMS lokalitet sa približno homogenom vegetacijom, na kom je bez obzira na tu činjenicu SSL postupak skaliranja poboljšao simulacije GPP. Pored toga, jasno uočljiva razlika javlja se u tropskoj šumi ABR-RJ na kojoj su greške SS postupka skaliranja mnogo veće od grešaka koje pravi SSL skaliranje na dnevnom nivou. Izuzeci se javljaju samo u pojedinim danima kada su odstupanja osmotrenih od simuliranih vrednosti značajna, bez obzira na primenjeni postupak skaliranja. Razlog odstupanju najčešće je nedovoljno dobro modelirana vrednost stomatarnog otpora, koja u prvom redu zavisi od vlažnosti zemljišta, veličine koju je teško predvideti.

Prema navedenim rezultatima možemo da zaključimo da je SSL postupak skaliranja smanjio greške prilikom simulacije GPP biljnog sklopa. Glavni razlog za to leži u činjenici da se efikasnost biljnog sklopa u apsorpciji CO_2 menja ne samo prilikom promene parametara fotosinteze, nego i

prilikom promene gustine i visine maksimalne gustine biljnog sklopa. Ovaj fenomen razmatraćemo u nastavku.

Tabela 6.11 Vrednosti koeficijenta korelacije i determinacije osmotrenog i modeliranog GPP izračunatog preko SS i SSL postupka skaliranja.

	SS		SSL	
	r	r ²	R	r ²
NSA-OBS	0,73	0,54	0,74	0,55
SSA-OA	0,81	0,66	0,83	0,69
HF-EMS	0,89	0,79	0,91	0,81
ABR-RJ	0,54	0,29	0,55	0,30

Tabela 6.12 Opseg vrednosti ν , σ_c i σ_o GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) izračunatog preko SS i SSL postupka skaliranja.

	NSA-OBS		SSA-OA		HF-EMS		ABR-RJ	
	SS	SSL	SS	SSL	SS	SSL	SS	SSL
opseg ν^*	0,8– 3,5	1,2– 3,4	2,8– 8,3	2,5– 7,7	3,1– 12,5	4,2– 11,1	5,9– 9,0	4,3– 6,6
dan u godini ν_{max}	212	210	214	236	174	174	255	255
opseg σ_c	0,5– 4,9	0,4– 4,5	4,3– 10,2	3,8– 9,0	4,8– 16,9	3,6– 16,3	2,6– 4,4	2,4– 4,9
dan u godini σ_{max}	212	212	236	236	157	161	257	253
opseg σ_o	0,9–3,9		4,6–9,5		2,4–16,8		4,0–8,8	
dan u godini $\sigma_{o,max}$	218		215		161		257	

*sve vrednosti izražene su u $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

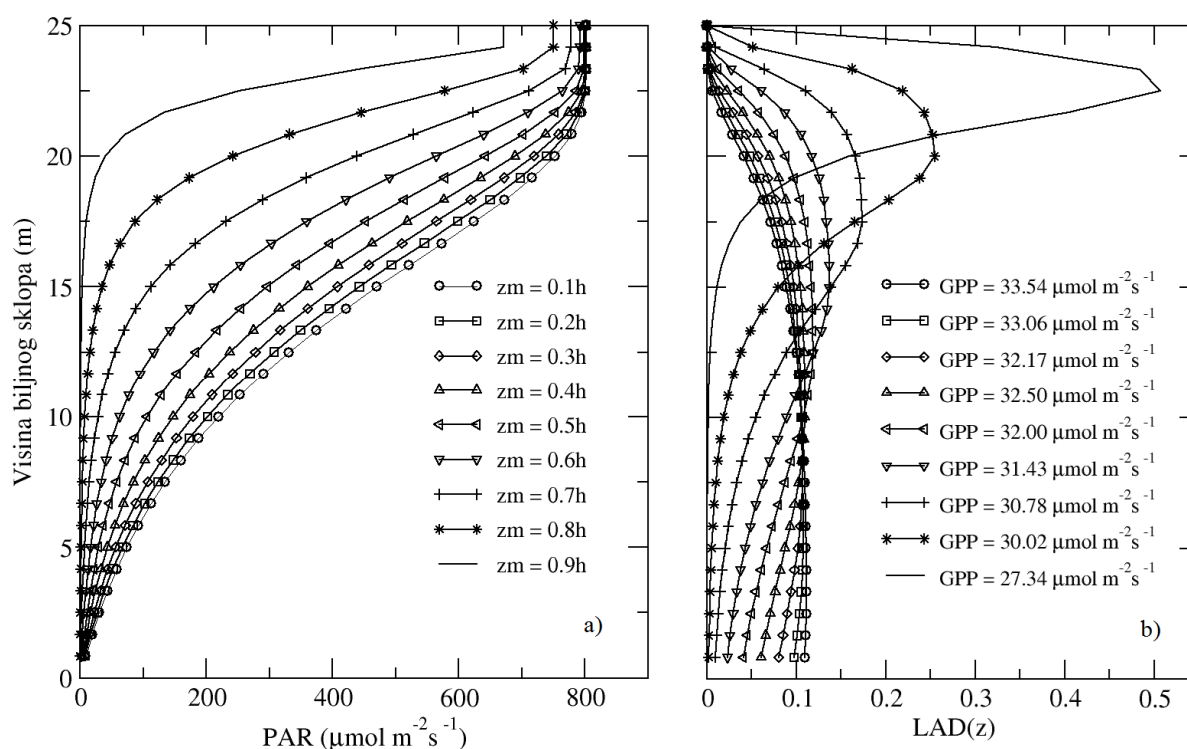
6.6.1 Uticaj strukture biljnog sklopa na GPP

Testiranje uticaja strukture biljnog sklopa na vrednost GPP modeliranog preko SSL procesa skaliranja izvedeno je preko kreiranog testa osetljivosti. Test je baziran na različitim vrednostima funkcije $LAD(z)$, koja čini osnovni deo SSL procesa skaliranja. Za ulazne meteorološke podatke izabrane su vrednosti koje odgovaraju sredini bezoblačnog letnjeg dana na HF-EMS lokalitetu (tabela 6.13), dok su parametri vegetacije i fotosinteze isti kao parametri korišćeni za simulacije na HF-EMS (tabele 6.1, 6.3 i 6.8)

Razlika u strukturi vegetacije napravljena je promenom veličine z_m u rasponu od 0,1 do 0,9h i u koracima od 0,1. Na slici 6.41 prikazani su rezultati testa osetljivosti i to profili direktnog PAR (slika 6.41a) i odgovarajući oblici $LAD(z)$ (slika 6.41b) uz izračunate odgovarajuće vrednosti GPP_{SSL} , na grafiku obeležene samo sa GPP. Može se uočiti da promene u strukturi biljnog sklopa izražene promenom z_m od 0,1h do 0,9h menjaju ukupnu vrednosti GPP za približno $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Promena simulirane vrednosti GPP dobijene SSL procesom skaliranja za različite strukture biljnih sklopova pokazuju da najmanje varijacije u strukturi vegetacije mogu značajno da utiču na ukupni GPP.

Tabela 6.13 Parametri korišćeni u testu osetljivosti.

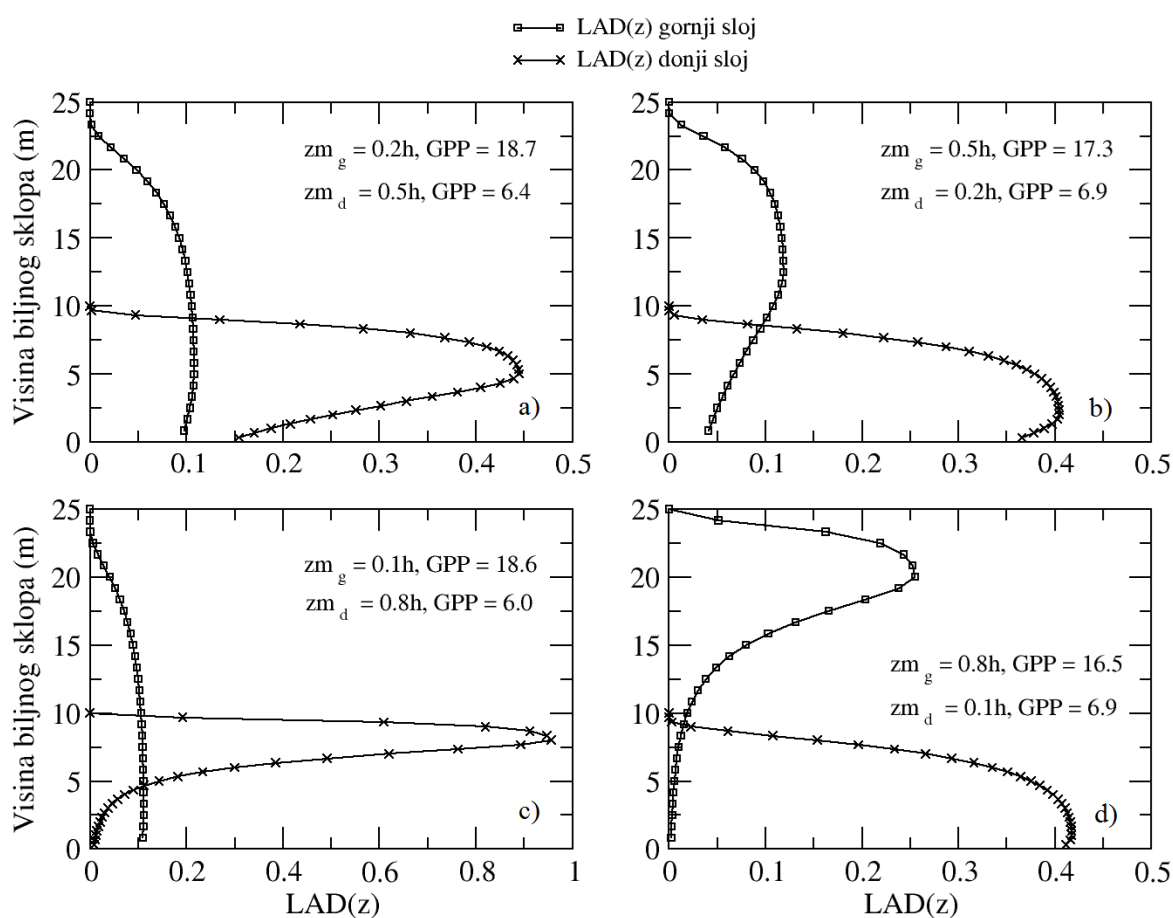
Ulazni parametri	
PAR	$1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Ta	20°C
pCO ₂	38 Pa
R _h	65%
pa	10^5 Pa
LAI	$3.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$
h	25 m


Slika 6.41 Profili direktnog PAR-a (a), odgovarajućeg $LAD(z)$ profila (b) i izračunatog GPP za različite vrednosti z_m .

Prema tome, ispravno je pretpostaviti da bi SVAT sheme sa inkorporiranim SSL procesom skaliranja razmene gasova na nivou lista omogućili smanjivanje sistematske greške u dugoročnim simulacijama. U slučaju kratkoročnih *in situ* simulacija SSL proces skaliranja omogućio bi tačniji proračun mikrometeoroloških veličina kao i efekta različitih agro-tehničkih mera (proređivanje šumskog sklopa, uklanjanje pojedinih spratova unutar šumskog sklopa) na vrednost GPP. Recimo, promena spratnosti unutar šumskog sklopa ili njegovo proređivanje uzrokuje smanjenje, tj. promenu $LAD(z)$, čime se povećava količina energije prenesena putem sunčevog zračenja u niže slojeve vegetacije i ukupni GPP. Opisana situacija može efikasno da se simulira ukoliko se za proračun GPP koristi SSL proces skaliranja u kome se preko vrednosti z_m i LAI izražava efekat promene spratnosti ili proređivanja što predstavlja odličan primer, jednog oblika, „parametrizacije“ agrotehničkih mera.

6.6.2 Uticaj strukture biljnog sklopa na razdvajanje GPP

Vertikalna distribucija LAI predstavljena funkcijom $LAD(z)$ omogućava simulaciju uticaja vertikalne heterogenosti na ukupni GPP. Heterogenost biljnog sklopa najčešće se, u realnim uslovima, ne ogleda samo u razlici u gustini krošnje nego i u različitim vrstama vegetacije koje okupiraju različite slojeve, takozvane spratove. Procena uticaja spratnosti vegetacije na ukupni GPP i doprinosi različitih spratova biljnog sklopa predstavljeni su na slici 6.42. Test simulacija kreirana je za četiri različita biljna sklopa koje karakterišu različite vrednosti LAI . Simulacija je inicirana sa podacima navedenim u tabeli 6.13. Vrednost LAI za gornji sprat biljnog sklopa iznosi 2,0, dok je LAI donjeg sprata 3,0 uz konstantne vrednosti temperature i koncentracija CO_2 unutar biljnog sklopa.



Slika 6.42 $LAD(z)$ profili gornjeg i donjeg sprata biljnog sklopa uz odgovarajuće vrednosti GPP ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) modelirane SSL postupkom skaliranja.

Na slici 6.42a prikazane su vrednosti GPP, uz pretpostavku da se gornji sprat biljnog sklopa zajedno sa donjim odlikuje nešto redom, uniformnije raspoređenom lisnom površinom, što je definisano sa z_m gornjeg sklopa od 0,2h i donjeg sklopa 0,5h. Ukupni GPP iznosi $25,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sa doprinosima gornjeg sklopa od 18,7 i donjeg od $6,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Sledeći panel 6.42b kreiran je obrnuto od 6.42a. Za gornji sprat uzeta je vrednost z_m 0,5h, a za donji 0,2h. Ukupan GPP iznosio je $24,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a doprinosi gornjeg i donjeg sprata iznose 17,3 i $6,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ redom. U slučaju neravnomerno i

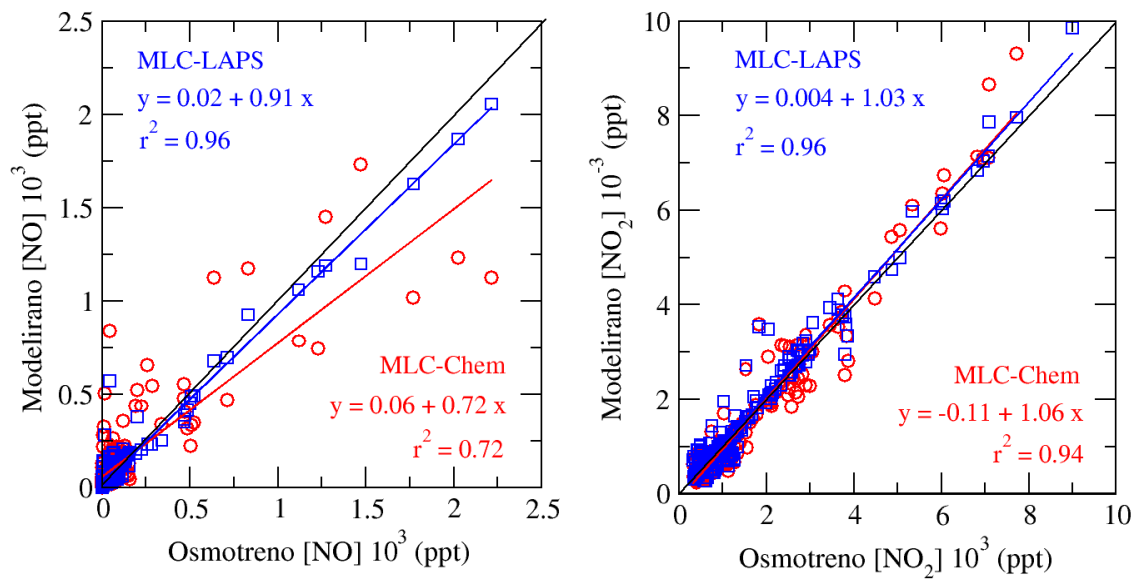
ravnomerno raspoređene lisne površine prikazanom na slikama 6.42c i 6.42d vrednost ukupnog GPP smanjila se u slučaju kada je gornji sprat gušći, sa $18,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.42c) na $16,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (slika 6.42d). Pored povećanja doprinosa GPP donjeg sprata od $0,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, zbog ravnomerno raspoređene lisne površine, ipak se ukupni GPP sklopa sa gustom vegetacijom na vrhu smanjio sa $24,6$ na $23,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Zaključak, koji se nameće posle analize rezultata simulacije, je da uniformnost biljnog sklopa, bilo da se radi o gornjem ili donjem spratu, proizvodi veći GPP. Optimalna distribucija lisne površine koja bi doprinela maksimiziranju asimilacije CO_2 bila bi ravnomerna raspoređenost, bez obzira na gustinu vegetacije. Slika 6.42 pokazuje da GPP donjeg sloja vegetacije, koji se u *in situ* simulacijama kao i u SS skaliranju, izostavlja ili uzima kao mali deo ukupnog $LAD(z)$ zapravo predstavlja značajan deo ukupnog GPP biljnog sklopa, što su pokazala i merenja koja su izveli Misson et al. (2007). GPP donjeg sklopa može da predstavlja i do 40% od njegove ukupne vrednosti (Xue et al., 2011).

6.7 Verifikacija MLC-LAPS

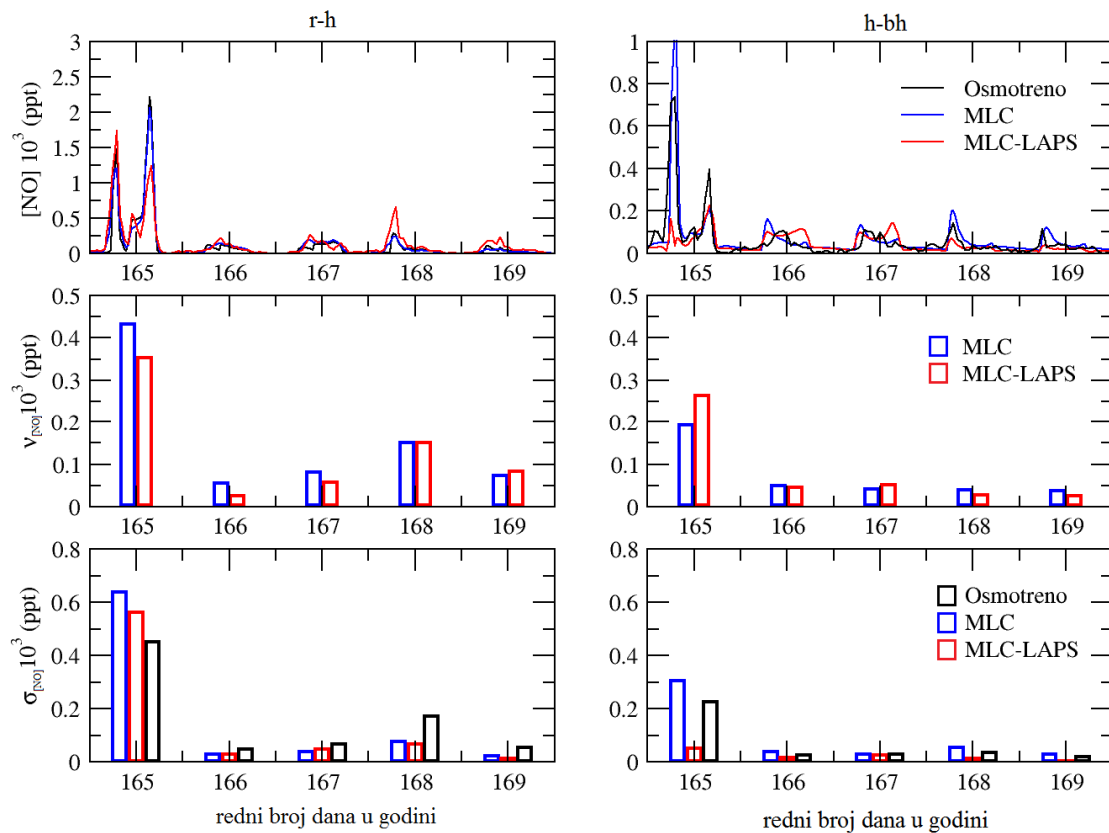
Za potrebe simulacija MLC-LAPS shemom iskorišćeni su podaci osmotreni u periodu od 14. do 19. juna 2002. godine na HF-EMS lokalitetu. Kaplovani model inicijalizovan je sa osmotrenim vrednostima meteoroloških elemenata iskorišćenih za modeliranje razmene energije, mase, količine kretanja, CO_2 i grupe azotnih oksida NO_x između atmosfere i biosfere. Koncentracije NO i NO_2 modelirane u okviru MLC-Chem sheme i kaplovane MLC-LAPS sheme upoređene su sa osmotrenim podacima u datom periodu. Kvantitativna analiza rezultata dve sheme prikazana je na slikama 6.43-6.45 na kojima je za opisivanje kvaliteta simulacija iskorišćen postupak prikazan u poglavlju 6.2. Pored kvantitativne analize tačnosti simulacija MLC-LAPS sheme, date u nastavku poglavlja prikazani su i rezultati koji usled nedostatka merenja nisu prošli kroz istu proceduru, ali govore o kvalitetu simulacija s obzirom da su pojedinačne sheme u okviru MLC-LAPS prethodno verifikovane.

Prema dijagramu rasipanja (slika 6.43) vrednost r^2 značajno se povećala za 24 %, što odgovara povećanju koeficijenta korelacije za 0,49, prilikom modeliranja NO izvedenog korišćenjem kaplovane MLC-LAPS sheme u sloju vazduha između referentnog nivoa i srednje visine biljnog sklopa. U slučaju NO_2 ovo poboljšanje je manje izraženo, i iznosi 2 %, odnosno koeficijent korelacije se povećao za 0,15. Kriterijum tačnosti modeliranja koncentracije NO izveden iz odnosa v , σ_c i σ_o u sloju vazduha iznad biljnog sklopa ($r-h$) pokazuje: 1) vrednost srednjeg kvadratnog odstupanja koncentracija NO modeliranih MLC-LAPS shemom (v_{ML}) bila je manja od srednjeg kvadratnog odstupanja koncentracija NO modeliranih MLC-Chem shemom (v_{MC}) u četiri od pet dana simulacija; 2) vrednost standardne devijacije modeliranih vrednosti MLC-LAPS shemom (σ_{ML}) bliži su standardnoj devijaciji osmotrenih vrednosti (σ_o) koncentracije NO u 60 % slučajeva; 3) vrednost v_{ML} niža je od σ_o u četiri od pet dana iskorišćenih u procesu verifikacije (slika 6.44a). U delu prostora unutar biljnog sklopa (sloj $h-bh$) uočava se da je: 1) v_{MC} veće je od v_{ML} u tri od pet dana simulacija; 2) razlika između σ_{ML} i σ_o manja je od razlike između σ_{MC} i σ_o u četiri od pet dana; 3) vrednost v_{ML}

niža je od σ_o u dva od pet dana iskorišćenih u procesu verifikacije (slika 6.44b). Opseg v , σ_c i σ_o za koncentracije NO modelirane preko MLC-Chem i MLC-LAPS dat je u tabeli 6.14.

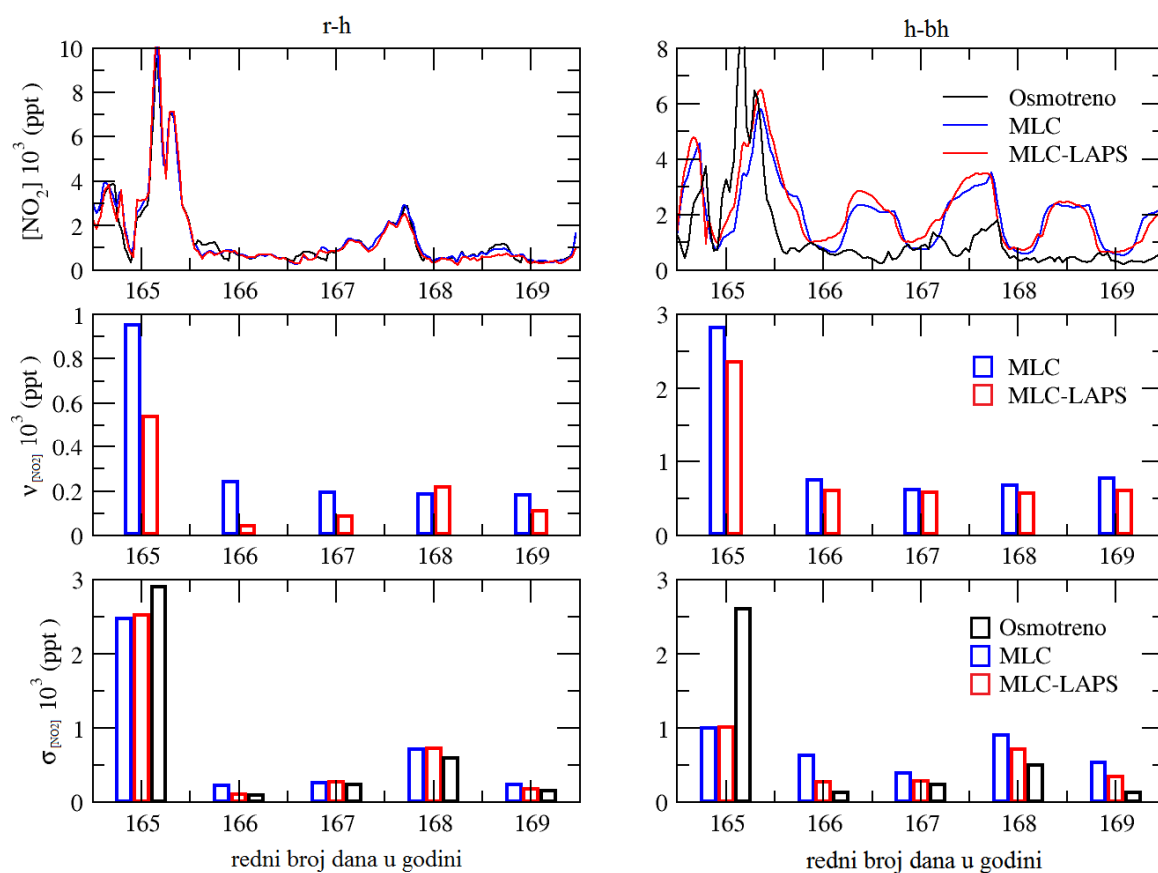


Slika 6.43 Poređenje osmotrenih koncentracija NO i NO₂ sa vrednostima modeliranim MLC-Chem i MLC-LAPS shemama u sloju vazduha r-h.



Slika 6.44 Vrednosti v , σ_c i σ_o koncentracije NO modelirane MLC-Chem i MLC-LAPS shemama u slojevima r-h i h-bh.

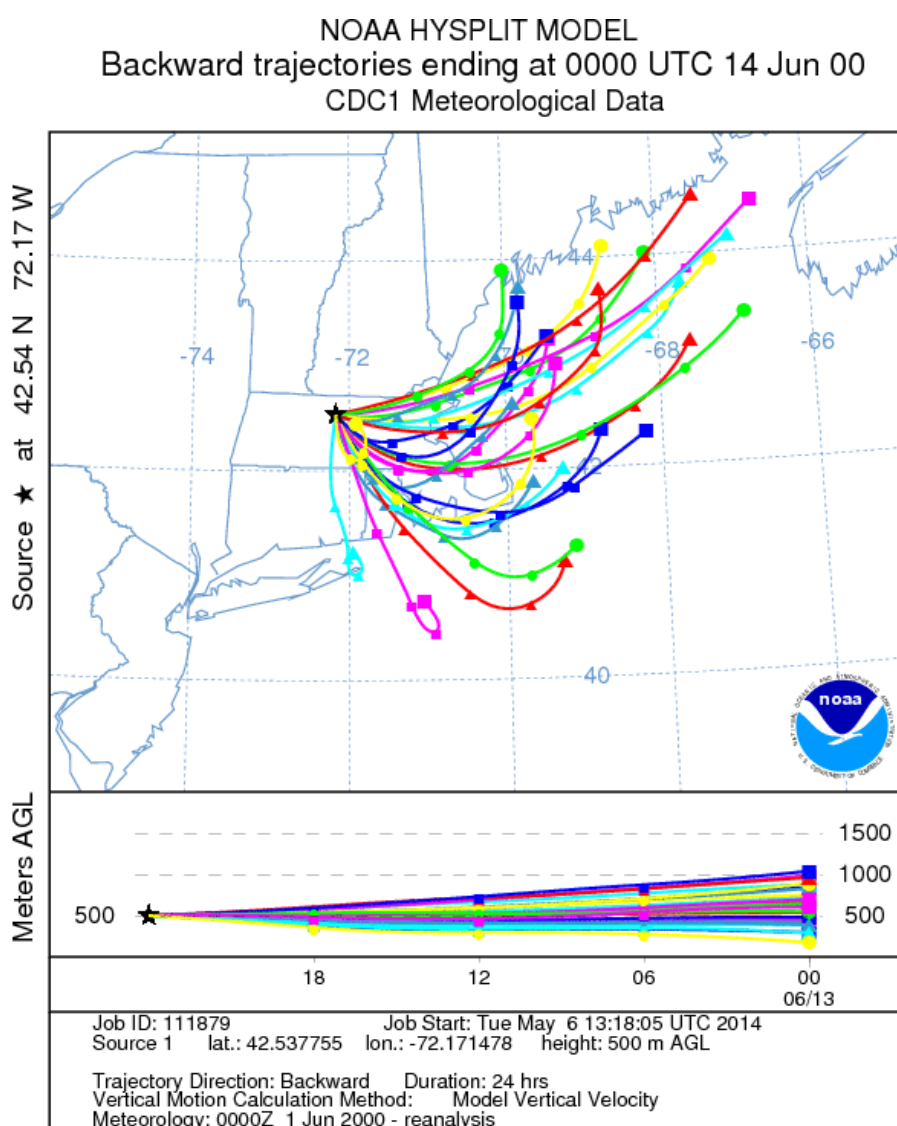
Kvantitativna analiza modeliranih koncentracija NO_2 , prema kriterijum tačnosti izvedenom iz odnosa v , σ_c i σ_o , u sloju vazduha iznad biljnog sklopa (r-h) pokazuje: 1) vrednost v_{MC} je veća od v_{ML} u četiri od pet dana simulacija; 2) vrednost σ_{ML} bliža je σ_o koncentracije NO_2 u četiri od pet dana; 3) vrednost v_{ML} niža je od σ_o u svih pet dana iskorišćenih u procesu verifikacije (slika 6.45 leva strana). Ista analiza primenjena na rezultate simulacija koje su dobijene za prostor unutar biljnog sklopa (h-bh) prikazuje: 1) v_{MC} veća je od v_{ML} u svih pet dana; 2) razlika između σ_{ML} i σ_o koncentracije NO_2 u svih pet dana manja je od razlike između σ_{MC} i σ_o ; 3) vrednost v_{ML} je niža od σ_o u četiri od pet dana iskorišćenih u procesu verifikacije (slika 6.45 desna strana). Opseg v , σ_c i σ_o za koncentracije NO_2 modelirane preko MLC-Chem i MLC-LAPS dat je u tabeli 6.15.



Slika 6.45 Vrednosti v , σ_c i σ_o koncentracije NO_2 modelirane MLC-Chem i MLC-LAPS shemama u slojevima r-h i h-bh.

Prikazana kvantitativna analiza rezultata dobijenih MLC-Chem i MLC-LAPS shemom ujedno pokazuje i uticaj vrednosti mikrometeoroloških elemenata unutar biljnog sklopa na izračunavanje koncentracija NO i NO_2 u ovim shemama. U okviru MLC-Chem sheme T_c i R_{hc} unutar biljnog sklopa računate su preko odgovarajuće sinusne funkcije koja opisuje dnevni hod veličina. Kaplovanjem MLC-Chem i LAPS sheme T_c i R_{hc} računate su fizički realistično preko raspodele energije unutar biljnog sklopa. Razlika se jasno vidi prilikom računanja koncentracija u sloju h-bh u oba slučaja (NO i NO_2) jer su greške koje generiše MLC-Chem shema veće od grešaka koje je generisala kaplovana MLC-LAPS

shema. Modeliranje NO_2 unutar sloja h-bh bilo je problematično sa obe sheme. Visoka odstupanja modeliranih od osmotrenih vrednosti mogu se objasniti nagomilavanjem NO_2 u toku noći, koji se tokom dana troši fotodisocijacijom (slika 6.45 desna strana). Isto tako, brzina depozicije je, u prisustvu stabilne stratifikacije koja se obrazuje u toku noći, veoma mala i ne može da ukloni višak NO_2 , što je pokazano i ranije na slici 6.21d. Visoke vrednosti koncentracija NO i NO_2 osmotrene 14. juna rezultat su antropogenog zagađenja. Upravo u ovom danu su se javile i najveće vrednosti v , σ_c i σ_o koje su rezultat značajno povećane koncentracije oba gasa. Karakteristični pikovi u koncentracijama javljaju se uz severoistočni ili jugozapadni pravac vetra, koji donosi vlažan vazduh zasićen polutantima iz urbanih zona. Da bismo utvrdili koja je vazдушna struja dominirala u toku 14. juna iskoristili smo HYSPLIT model trajektorije sa reanalizom meteoroloških polja prikazan na slici 6.46 (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).



Slika 6.46 Vrednosti simulacije HYSPLIT modelom trajektorija.

Trajektorije kretanja vazdušnih struja u toku 24 sata pre javljanja visokih koncentracija NO_x na HF-EMS pokazuju da je vazduh stigao sa severoistoka iz pravca Bostona, noseći visoku koncentraciju vodene pare sa okeana i polutante karakteristične za urbanu atmosferu. MLC-LAPS shema nije pokazala značajnije greške u danu sa maksimalnim vrednostima koncentracije. Osim u slučaju vrednosti koncentracija unutar biljnog sklopa kada su obe sheme podbacile. Iz prikazane analize zaključujemo da se promenom meteoroloških uslova unutar biljnog sklopa, prvenstveno temperature, vlažnosti vazduha, profila zračenja, može popraviti kvalitet simulacije hemijske sheme i da je kaplovanje dve sheme prema tome opravdano.

Tabela 6.14 Opseg ν , σ_c i σ_o koncentracije NO (10^3 ppt) izračunate MLC-Chem i MLC-LAPS shemama.

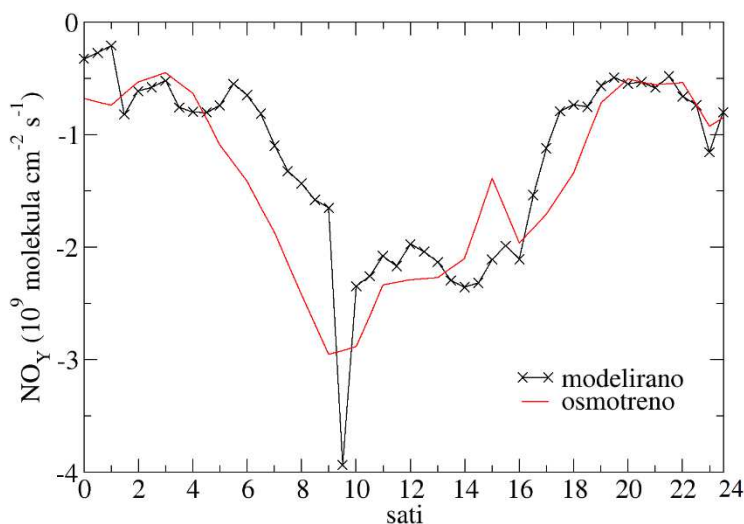
NO	r-h		h-bh	
	MLC	MLC-LAPS	MLC	MLC-LAPS
opseg ν	0,06 – 0,15	0,02 – 0,15	0,04 – 0,05	0,03 – 0,05
ν_{max}	0,44	0,35	0,19	0,26
dan u godini ν_{max}	165	165	165	165
opseg σ_c	0,02 – 0,09	0,01 – 0,08	0,03 – 0,06	0,01 – 0,03
σ_{max}	0,62	0,57	0,32	0,08
dan u godini σ_{max}	165	165	165	165
opseg σ_o	0,03 – 0,19		0,02 – 0,04	
$\sigma_{o,max}$	0,43		0,22	
dan u godini $\sigma_{o,max}$	165		165	

Tabela 6.15 Opseg ν , σ_c i σ_o koncentracije NO_2 (10^3 ppt) izračunate MLC-Chem i MLC-LAPS shemama.

NO_2	r-h		h-bh	
	MLC	MLC-LAPS	MLC	MLC-LAPS
opseg ν	0,2 – 0,23	0,04 – 0,21	0,65 – 0,8	0,55 – 0,6
ν_{max}	0,96	0,54	2,8	2,4
dan u godini ν_{max}	165	165	165	165
opseg σ_c	0,2 – 0,7	0,15 – 0,65	0,4 – 0,95	0,3 – 0,7
σ_{max}	2,4	2,5	1,1	1,0
dan u godini σ_{max}	165	165	165	165
opseg σ_o	0,11 – 0,6		0,2 – 0,5	
$\sigma_{o,max}$	2,9		2,2	
dan u godini $\sigma_{o,max}$	165		165	

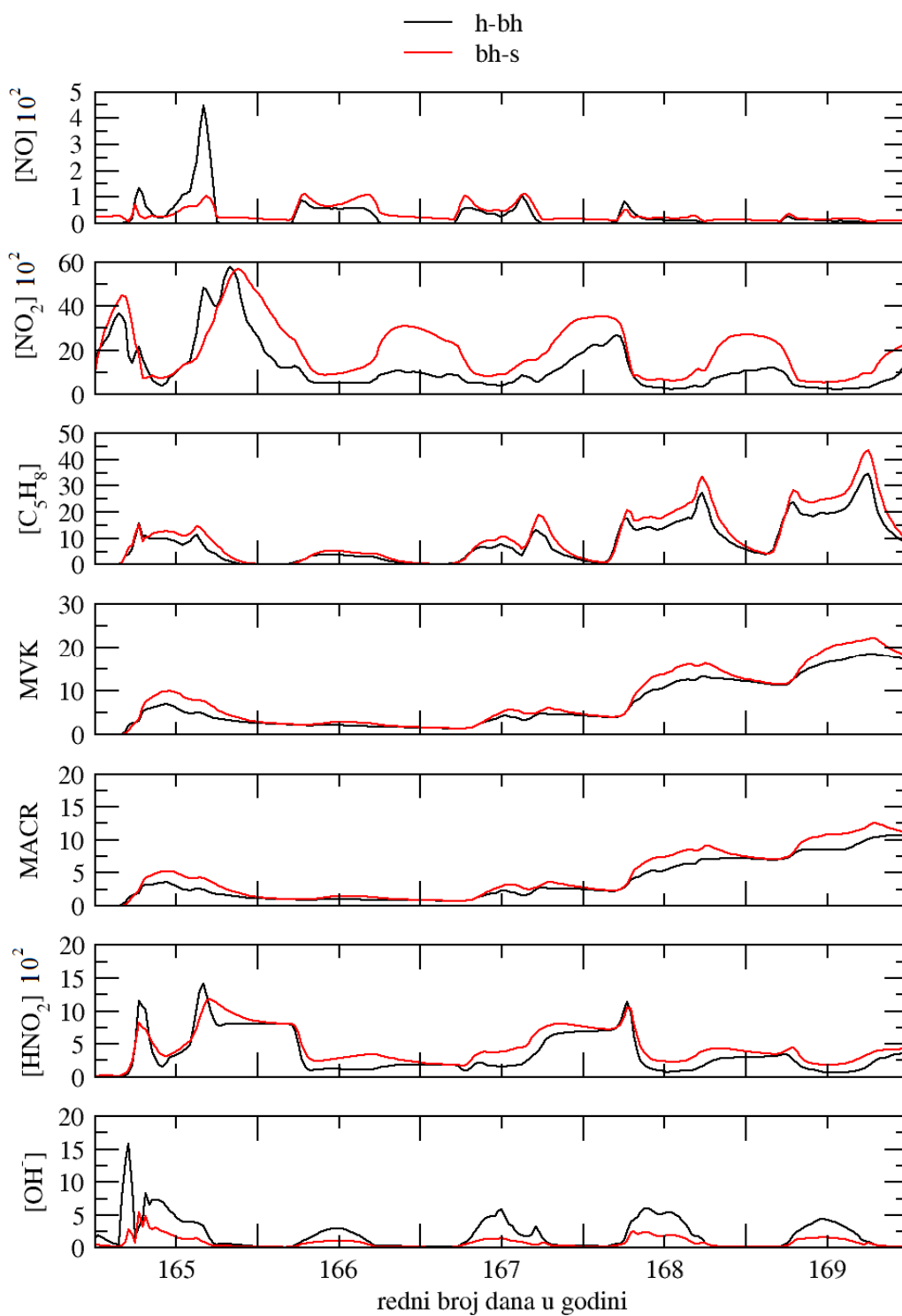
Turbulentni fluks familije NO_y (NO , NO_2 , HNO_4 , NO_3 , N_2O_5 , MPAN i HNO_3) jedinjenja iznad biljnog sklopa izmeren na HF-EMS u toku pet dana upoređen je sa modeliranim vrednostima NO_x (NO , NO_2) (slika 6.47). Verifikacija modela na osmotreni turbulentni fluks NO_y jedinjenja ne bi bila opravdana jer u ukupnoj sumi učestvuje veliki broj organskih i neorganskih azotnih jedinjenja, ne samo NO_x , koja menjaju masu koja se transportuje. Doprinos pojedinih jedinjenja ukupnoj koncentraciji NO_y prikazan je na slici 6.48. Prema tome, jedino je grafičko poređenje bilo moguće.

Razlike u osmotrenim i modeliranim vrednostima su veoma male i sa velikom sigurnošću možemo da pretpostavimo da su se javile zbog postojanja ostalih azotnih jedinjenja u familiji NO_y . Prema tome zaključujemo da MLC-LAPS shema veoma dobro simulira turbulentni fluks NO_x .

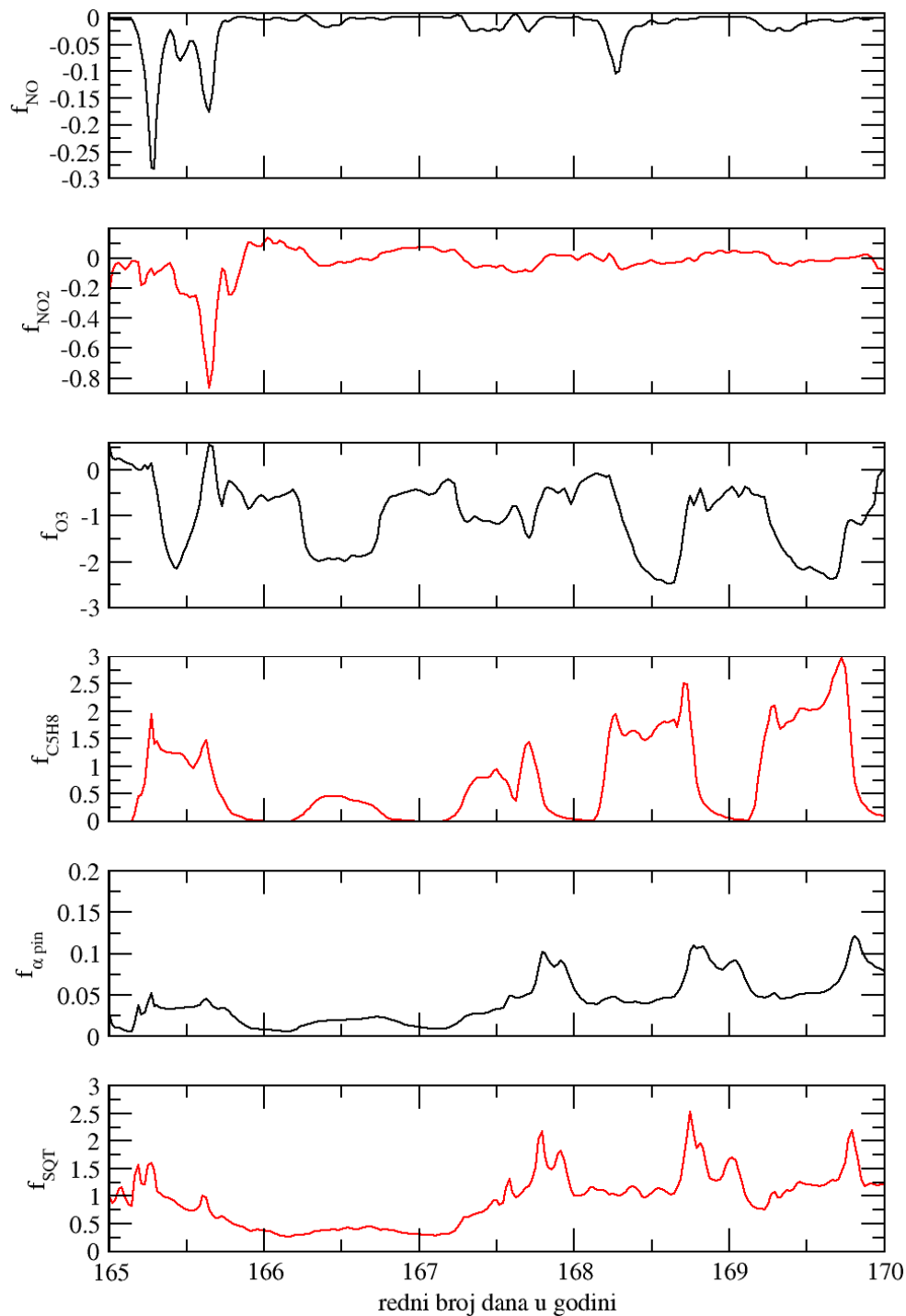


Slika 6.47 Poređenje srednjih satnih osmotrene vrednosti NO_y i modelirane vrednosti turbulentnog fluksa NO_x .

Promena izračunatih vrednosti meteoroloških elemenata u kaplovanj MLC-LAPS shemi odrazila se na proračun koncentracije i flukseva gasova. Numerička greška koja se javljala u MLC-Chem shemi prilikom računanja turbulentnih flukseva u MLC-LAPS shemi je izostala. Prema tome možemo zaključiti da su se greške u MLC-Chem shemi najčešće javljale zbog neadekvatnog opisa mikrometeoroloških veličina. Na slikama 6.48 i 6.49 prikazane su koncentracije i fluksevi gasova izabranih na osnovnu uticaja osnovne $\text{NO-NO}_2\text{-O}_3$ fotohemijske trijade. Isparljiva organska jedinjenja, kao što je izopren, karakteristična su za šume, posebno severne četinarske. Njihov značaj u atmosferskim hemijskim procesima je višestruk. Posebnu ulogu igraju u smanjivanju koncentracije O_3 . Izopren ispušten u atmosferu od strane biljaka oksiduje se preko O_3 , NO_3 ili CO do MACR ili MKV. Oksidacijom izoprena troši se molekul ozona koji bi mogao, umesto toga, da posluži u oksidaciji NO do NO_2 . Smanjena količina ozona izazvaće smanjenu količinu NO_2 koja će u procesu fotodisocijacije generisati manju količinu ozona. Opisan ciklus predstavlja jedan od osnovnih mehanizama koji su odgovorni za ponor O_3 u šumama. Poređenjem rezultata MLC-Chem sheme i MLC-LAPS sheme u modeliranju koncentracija i turbulentnih flukseva izabranih jedinjenja jasno se uočava izostanak skokova u vrednostima (slike 6.22–6.23). Prema tome, možemo pretpostaviti da je fizički realističnije modeliranje meteoroloških elemenata unutar biljnog sklopa unapredilo proračun uticaja promene stabilnosti atmosfere unutar i iznad biljnog sklopa na koncentracije i vrednosti turbulentnih flukseva izabranih jedinjenja.



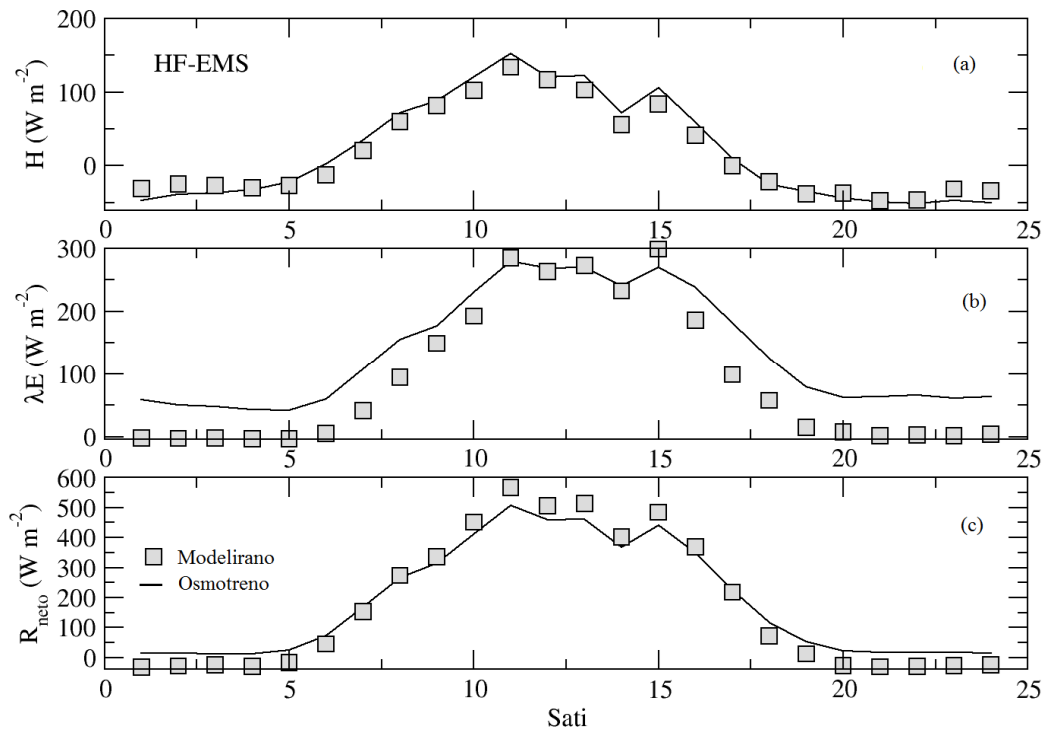
Slika 6.48 Koncentracije izabranih jedinjenja simuliranih MLC-LAPS shemom.



Slika 6.49 Turbulentni fluksevi izabranih jedinjenja simulirani MLC-LAPS shemom.

Da bismo predstavili sposobnost MLC-LAPS sheme da simulira mikrometeorološke elemente unutar biljnog sklopa uporedili smo osmotrene srednje satne vrednosti površinskih turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} , koji od njih zavise, sa modeliranim vrednostima (slika 6.50). Validacija rezultata na dnevnom nivou nije bila moguća zbog malog broja merenja turbulentnih flukseva izvršenih u periodu koji je korišćen. Međutim, osmotrene i modelirane vrednosti H i R_{neto} pokazale su odlično slaganje

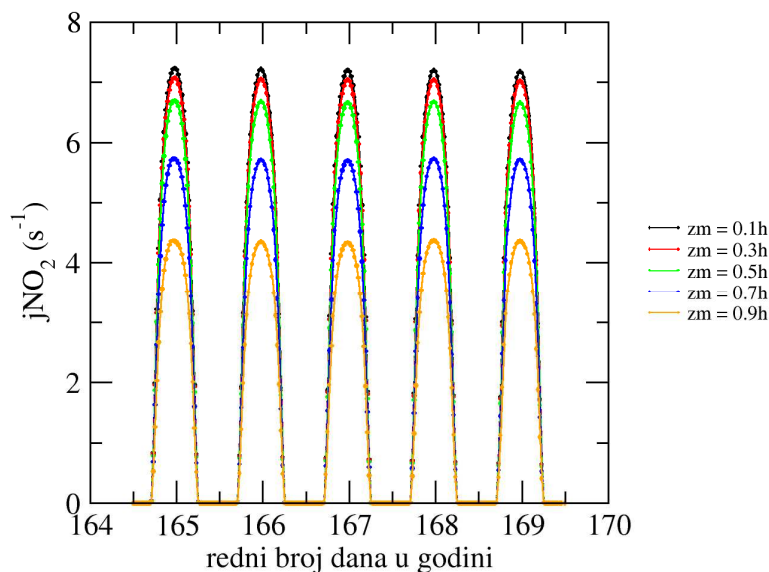
na satnom nivou. Manja greška javlja se u modeliranju λE koja bi detaljnom kalibracijom parametara vegetacije najverovatnije bila rešena.



Slika 6.50 Srednje satne vrednosti izračunatih i izmerenih turbulentnih flukseva: a) osetne toplote (H), b) latentne toplote (λE) i c) neto zračenja iznad biljnog sklopa (R_{net}) za 5 dana na HF-EMS.

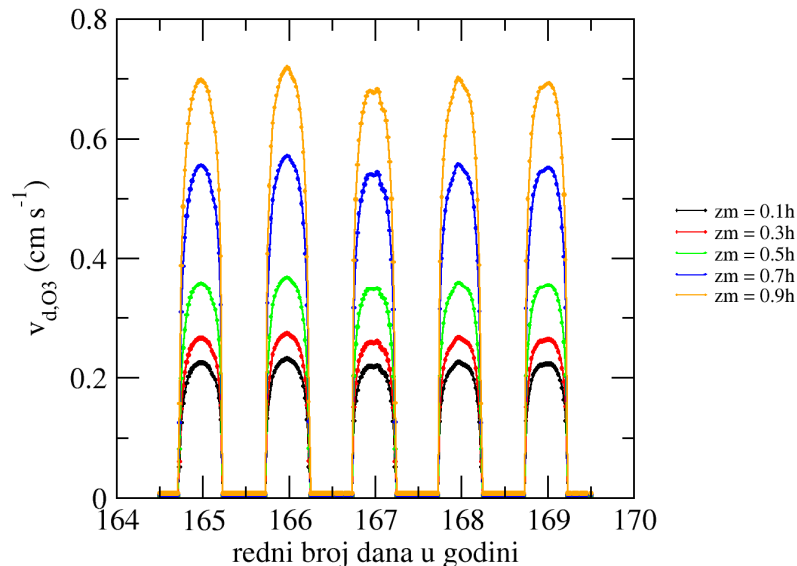
6.7.1 Uticaj strukture biljnog sklopa na koncentraciju NO_x

Uticaj strukture biljnog sklopa na koncentraciju NO_x i ostale značajne hemijske prekursora simulirali smo preko funkcije $LAD(z)$ koja je deo SSL skaliranja unutar MLC-LAPS sheme. Vrednosti funkcije na četiri visine iskorišćene su za izračunavanje koeficijenta fotodisocijacije, što je značajno uticalo na doprinos hemijskih procesa u ukupnoj promeni koncentracije NO i NO_2 (slika 6.43). Kod gasova čija reaktivnost je manja, i koji ne prolaze proces fotodisocijacije, uticaj se ogledao u promeni brzine depozicije. Slika 6.51 pokazuje da gustina biljnog sklopa može značajno smanjiti intenzitet fotodisocijacije, što se vidi i na slici 6.45, gde su prikazane koncentracije NO_2 unutar biljnog sklopa.



Slika 6.51 Promena intenziteta fotodisocijacije za različite vrednosti parametra z_m .

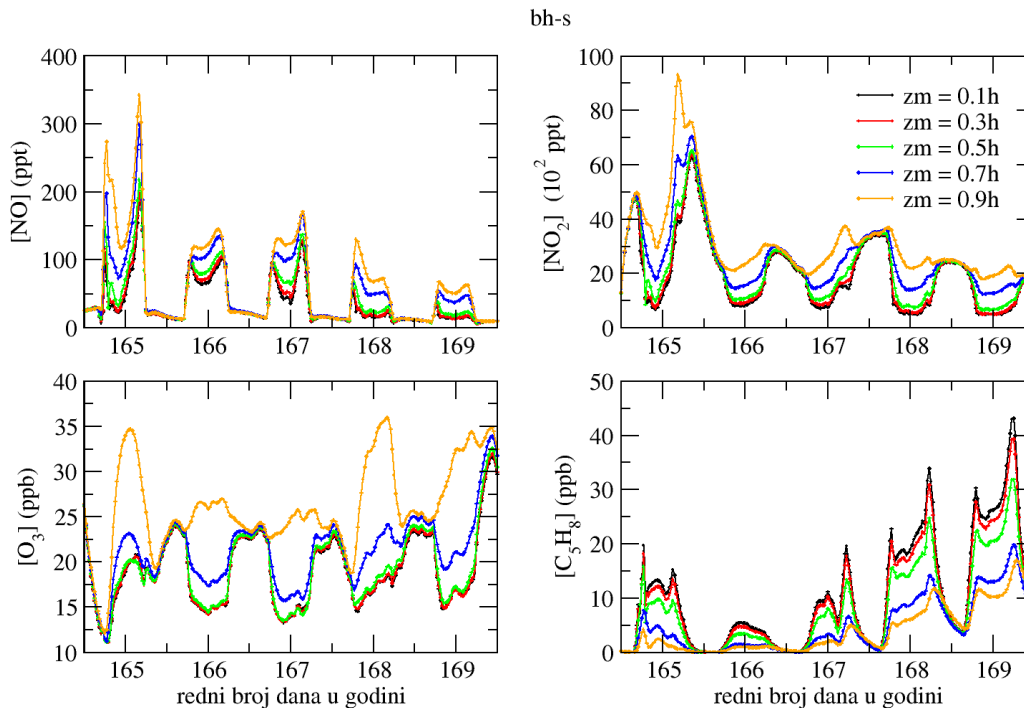
Promena brzine suve depozicije prikazana je preko brzine suve depozicije ozona na slici 6.52. Promena parametara vegetacije značajno je uticala na vrednost brzine suve depozicije. Prema tome, realističniji opis strukture biljnog sklopa preko $LAD(z)$ može smanjiti sistematske greške koje se u praksi javljaju i povećati fizičku realističnost modela suve depozicije.



Slika 6.52 Promena brzine depozicije za različite vrednosti parametra z_m .

Promena u intenzitetu fotodisocijacije i brzini suve depozicije značajno menja vrednosti koncentracija različitih hemijskih vrsta (slika 6.53). Najveća razlika u koncentracijama se primećuje u gušćem delu vegetacije ($z_m/h > 0,8$), gde se uočava povećana osetljivost modeliranih koncentracija NO_x na vrednost parametra z_m . Ovo je posebno uočljivo kod jedinjenja na čiji životni vek dominantno utiče brzina depozicije. U slučaju prikazanom na slici 6.53 najveća promena koncentracija uočava se

kod ozona. Promena gustine biljnog sklopa menja odlike lokaliteta, od slabog izvora ozona prema značajnom izvoru (slika 6.53). Izvori NO i NO₂ se intenziviraju povećanjem gustine biljnog sklopa, dok se izvor izoprena smanjuje (slika 6.53). Razlike u koncentracijama sve četiri prikazane hemijske vrste su značajne.

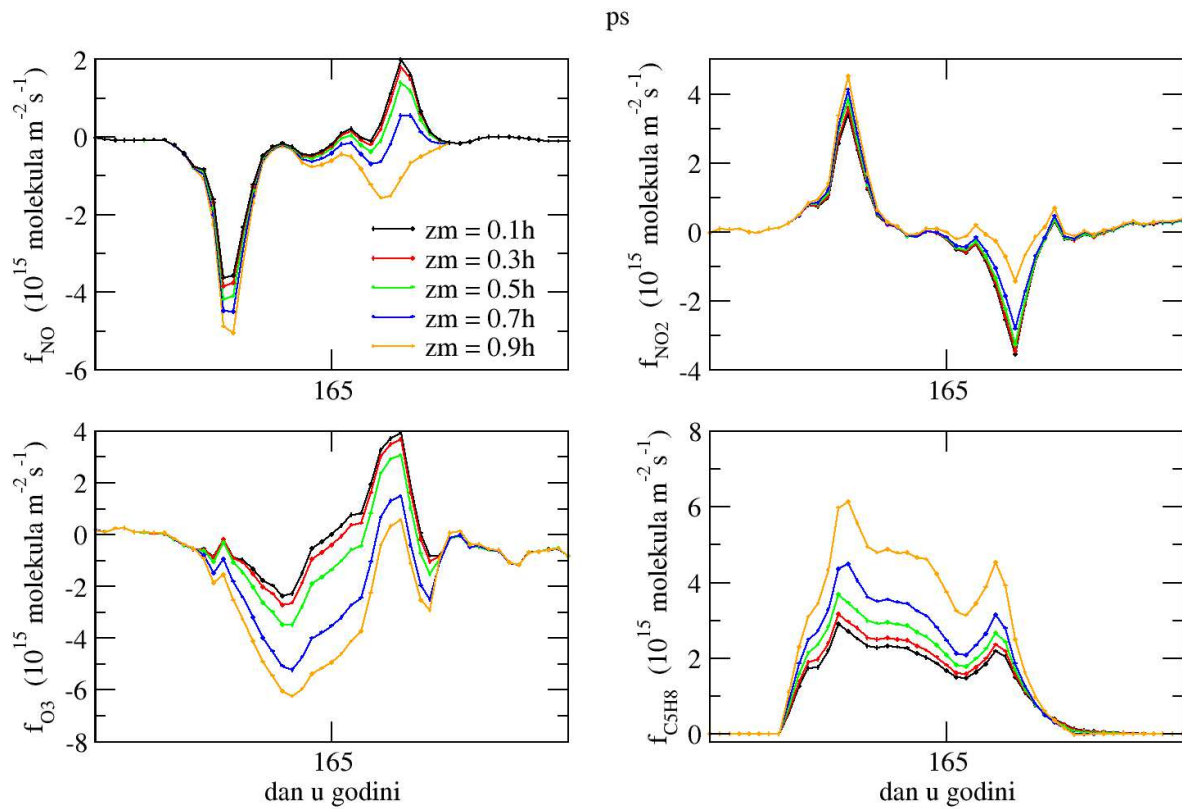


Slika 6.53 Koncentracija različitih polutanata izračunata za različite vrednosti z_m .

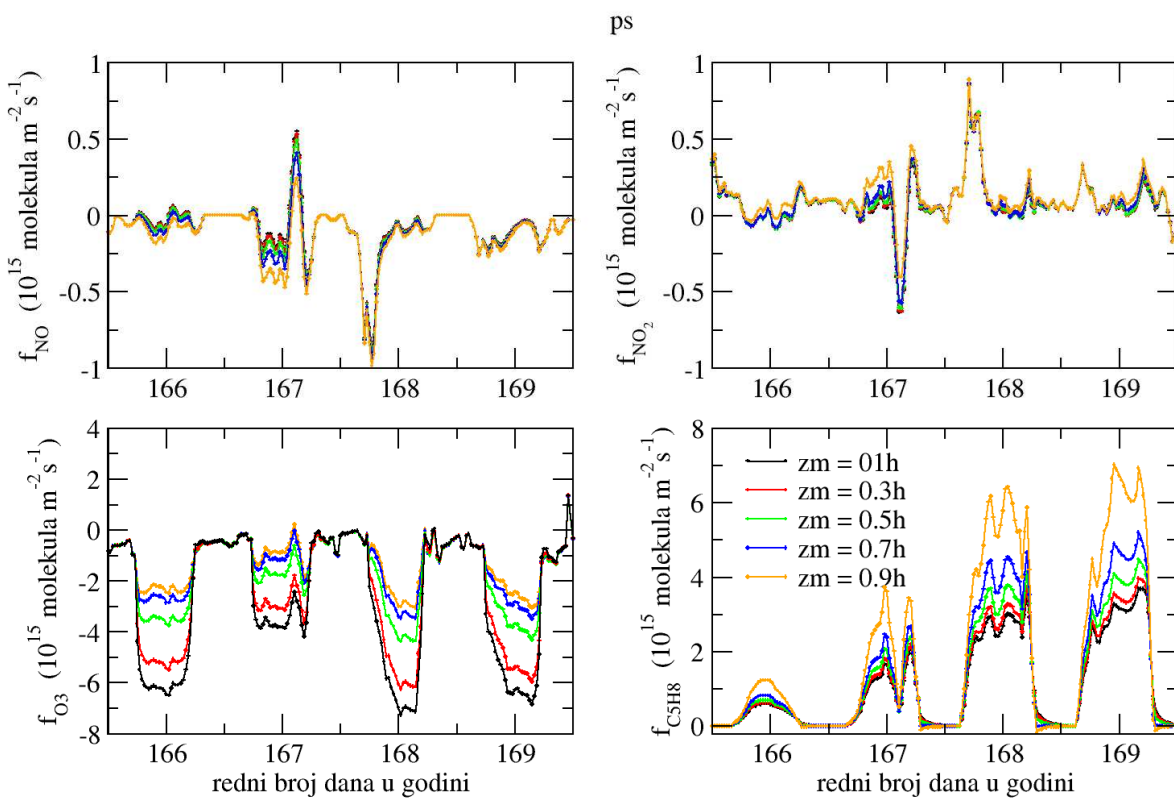
6.7.2 Uticaj strukture biljnog sklopa na turbulentni fluks NO_x

Uticaj gustine biljnog sklopa na turbulentne flukseve NO i NO₂ pokazao se značajnim samo u momentima naglog povećane koncentracije gasova. Najveća promena se uočava u danu u kom dominira antropogeno zagađenje (slika 6.54). S obzirom na to što hemijski procesi pri malim koncentracijama značajno menjaju koncentraciju NO_x, povećana koncentracija izazvala je nagomilavanje gasova, te je i proces suve depozicije dobio na značaju. Upravo je deo deponovanog NO₂ i uticaj biljnog sklopa na proces depozicije uzrokovao promene na vrednostima turbulentnog fluksa. Snažan uticaj strukture vegetacije na turbulentne karakteristike vazduha unutar biljnog sklopa uticao je i na brzinu depozicije. Isti mehanizam primetan je i na promeni vrednosti flukseva svih modeliranih slaboreaktivnih hemijskih vrsta (6.55).

Prikazani testovi osetljivosti su pokazali da ulazne veličine, kao što su: početne vrednosti koncentracije, vlažnost zemljišta i meteoroloških elemenata, manje utiču na koncentraciju unutar i iznad biljnog sklopa od same strukture biljnog sklopa. Ukoliko se turbulentni fluks posmatranih gasova izračuna preko razlike koncentracija uočava se ista zavisnost. Razlog tome je uticaj biljnog sklopa na procese uklanjanja jedinjenja, kao što su brzina depozicije ili efikasnost fotodisocijacije, a potom i uticaj na turbulentne karakteristike vazduha koji iznosi produkte hemijskih reakcija iz oblasti



Slika 6.54 Promena vrednosti fluksa u danu sa najvećom promenom koncentracije za različite vrednosti parametra z_m .



Slika 6.55 Promena vrednosti fluksa za različite vrednosti parametra z_m .

biljnog sklopa. U slučaju O_3 uočava se promena karakteristika lokaliteta iz ponora u izvor pri povećanju gustine vegetacije. Karakteristična činjenica značajna je iz perspektive planiranja novih zasada ili procene uticaja postojećih na neto razmenu O_3 između biljnog sklopa i atmosfere (slika 6.55). Turbulenti fluksevi NO i NO_2 ne menjaju znak, ali se intenziviraju pri porastu gustine biljnog sklopa (slika 6.55). Kod turbulentnog fluksa izoprena karakterističan je efekat prigušenja pri povećanju gustine biljnog sklopa (slika 6.55). Prema tome, kao što je pokazano na slikama 6.53, 6.54 i 6.55, ubacivanjem samo jedne dodatne jednačine, koja opisuje vertikalnu strukturu biljnog sklopa, može se smanjiti greška prilikom simulacije.

7. ZAKLJUČAK I BUDUĆI PLANovi

Cilj ovog rada bio je da se na temeljima postojećih saznanja o procesima koji opisuju neto razmenu GSB u sistemu tlo-vegetacija-atmosfera i rezultata mikrometeoroloških eksperimenata, koji su izvedeni u različitim šumama, unapredi modeliranje uticaja sredine na procese razmene. U tu svrhu obavljeno je kaplovanje jedne hemijske (MLC-Chem) i jedne fizičke (LAPS) površinske sheme, dizajniran je novi CO₂ modul za simulaciju neto razmene CO₂ i predložen je novi koncept skaliranja modeliranih veličina sa nivoa lista na nivo biljnog sklopa. Razmatrani su postojeći i novi, predloženi, koncepti u modeliranju turbulentnih flukseva CO₂ i NO_x u površinskom sloju atmosfere iznad ruralnih oblasti. Posebna pažnja je posvećena modeliranju transportnih procesa unutar i iznad šuma s obzirom na to što njihovo prisustvo snažno utiče na dinamiku razmene gasova, energije, i količine kretanja između tla i atmosfere.

Modeliranje mikrometeoroloških veličina koje pokreću razmenu CO₂ i NO_x između tla i atmosfere izvedeno je LAPS shemom. Kvalitet simulacija LAPS sheme testiran je na četiri karakteristična šumska sklopa na setovima podataka koji su obuhvatili satna i polusatna merenja u toku jednog letnjeg meseca. Kvantitativna analiza rezultata izvedena je poređenjem simuliranih i osmotrenih vrednosti 1) temperature i relativne vlažnosti vazduha unutar biljnog sklopa, 2) turbulentnih flukseva latentne i osetne toplote i 3) neto zračenja apsorbiranog od strane podloge. Dobijeni rezultati pokazali su da je raspodela energije u LAPS shemi veoma dobro rešena i da je kvalitet simulacija razmene energije između tla i atmosfere baziran na izračunatim veličinama na površini, posebno u prisustvu vegetacije, na veoma visokom nivou. Modeliranje turbulentnih flukseva reaktivnih azotnih jedinjenja NO_x izvedeno je upotrebom hemijske MLC-Chem sheme. Hemijska shema je iskorišćena u cilju opisivanja složenog hemizma površinskog sloja atmosfere, ponora, izvora i transporta polutanata. Uticaj različitih hemijskih jedinjenja na životni vek NO_x ne može se ignorisati, ukoliko je tačnost simulacija prioritet. Prema tome, za opis hemijskih reakcija u koje stupa NO_x i koje mogu da utiču na ukupnu promenu koncentracije ili promenu jednog od dva gasa, neophodno je pokrenuti složenu hemijsku shemu i izbegavati jednostavne hemijske trijade. MLC-Chem shema je verifikovana za period od pet dana na satnim merenjima koncentracije NO i NO₂ unutar i iznad biljnog sklopa. Rezultati verifikacije su pokazali da shema veoma dobro simulira koncentraciju NO_x iznad biljnog sklopa, ali da, zbog slabo opisanih fizičkih procesa unutar biljnog

sklopa koji su odgovorni za promene mikrometeoroloških veličina i koji direktno utiču na izvore i ponore NO_x , shema pravi greške u simulacijama unutar biljnog sklopa.

Parametrizacija turbulentnog fluksa CO_2 izvršena je kreiranjem CO_2 modula čiju osnovu čini FvCB model uz mogućnost izbora načina skaliranja intenziteta fotosinteze sa lista na biljni sklop prema zahtevima simulacija. Prvi postupak skaliranja oslanja se na podelu lisne površine na deo izložen direktnom sunčevom zračenju i deo do kojeg dolazi difuzno i rasejano sunčevo zračenje, u tekstu SS postupak, koji se najčešće koristi u globalnim simulacijama. Drugi postupak skaliranja, SSL postupak, razvijen je u okviru ovog rada u cilju unapređenja modeliranja razmene CO_2 između atmosfere i biosfere. Za razliku od prisutnih tehnika skaliranja, SSL postupkom uvodimo opis vertikalne heterogenosti biljnog sklopa u problematiku skaliranja intenziteta fotosinteze sa lista na veće razmere. Novi postupak skaliranja formulisan je na osnovu SS postupka uz uvođenje funkcije koja opisuje vertikalnu distribuciju gustine biljnog sklopa. Opravdanost usložnjavanja postupka skaliranja leži u činjenici da distribucija gustine biljnog sklopa u različitim šumama značajno varira. Poznato je da će vertikalna heterogenost uticati na turbulentne karakteristike vazduha koje će povećati ili smanjiti dostupnost CO_2 u slojevima najgušće vegetacije. Profil fotosintetski aktivnog zračenja i količina energije koja posredstvom direktnog i difuznog dolaznog zračenja dospe do najnižih slojeva biljnog sklopa i do tla, značajno zavisi od vertikalne distribucije gustine biljnog sklopa. S obzirom na to što je proces fotosinteze ograničen dostupnom energijom zračenja i koncentracijom CO_2 , pretpostavka da će vertikalna struktura značajno da menja intenzitet procesa, sama se nameće. Razvijeni SSL postupak skaliranja testiran je u procesu modeliranja intenziteta asimilacije CO_2 , odnosno ukupne primarne produkcije poređenjem osmotrenih vrednosti sa modeliranim vrednostima. Kvalitet postupka skaliranja proveren je i poređenjem SS i SSL postupka skaliranja na četiri karakteristična šumska lokaliteta. Rezultati kvantitativne analize istakli su dominaciju SSL postupka skaliranja i ukazali su na greške koje se javljaju ukoliko se vertikalna heterogenost biljnog sklopa ne uzima u obzir, kao što je slučaj u svim trenutno postojećim tehnikama skaliranja CO_2 .

U cilju unapređenja modeliranja turbulentnih flukseva CO_2 i NO_x kreirana je kaplovana MLC-LAPS shema. Po pravilu, hemijske sheme poseduju slabije razvijeno modeliranje fizičkih procesa koji neretko značajno utiču na ishod hemijskih reakcija. Iz tog razloga se kaplovanje LAPS i MLC-Chem sheme javilo kao rešenje za problem modeliranja fizičkih procesa. Kaplovana MLC-LAPS shema razmenjuje informacije vezane za vrednosti meteoroloških elemenata simuliranih unutar biljnog sklopa koji povećavaju realističnost opisa izvora i ponora, odnosno hemijskih i transportnih procesa. Mikrometeorološki deo kaplovane sheme odgovoran je za računanje: 1) razmene energije između tla, biljnog sklopa i atmosfere, 2) meteorološke elemente unutar biljnog sklopa, 3) turbulentnog transporta količine kretanja, 4) profila vetra, 5) profila zračenja, i 6) hidroloških osobina zemljišta; eko-fiziološki modul odgovoran je za računanje: 1) intenziteta fotosinteze lista i biljnog sklopa, 2) intenziteta respiracije zemljišta i 3) turbulentni fluks CO_2 ; a hemijski deo kaplovane sheme računa: 1) emisiju NO iz zemljišta, 2) brzinu depozicije različitih polutanata, 3) intenzitet fotodisocijacije, 4) hemijske transformacije i 5) turbulentne flukseve različitih polutanata. Karakterističan opis heterogenosti biljnog sklopa preko funkcije distribuciju gustine biljnog sklopa korišćen u SSL postupku skaliranja iskorišćen je i u MLC-LAPS shemi za unapređenje modeliranja biljnog sklopa. Kvalitet simulacija kaplovane sheme proveren je poređenjem i statističkom kvantitativnom analizom

osmotrenih i modeliranih vrednosti: 1) koncentracije NO iznad i unutar biljnog sklopa, 2) koncentracije NO₂ iznad i unutar biljnog sklopa, 3) turbulentni fluks NO_y, 4) turbulentni fluks latentne i osetne toplote i 5) neto zračenja apsorbovanog od strane vegetacije i tla. Nedostatak izmerenih vrednosti onemogućio je kompletnu statističku analizu turbulentnih flukseva različitih hemijskih jedinjenja. Za verifikaciju sheme iskorišćene su satne vrednosti koncentracija i turbulentnih flukseva osetne i latentne toplote, i neto zračenja osmotreno u periodu od pet dana. Rezultati su pokazali unapređenje simulacije koncentracije i turbulentnog fluksa NO_x korišćenjem MLC-LAPS sheme u odnosu na simulacije izvedene preko osnovne hemijske MLC-Chem sheme. Kvantitativna analiza je pokazala uticaj unapređenja modeliranja mikrometeoroloških veličina u okviru MLC-LAPS sheme na koncentracije svih jedinjenja obuhvaćenih hemijskim modulom.

Analiza rezultata nameće zaključak da je modeliranje biljnog sklopa centar svakog modela čiji cilj je kvalitetan opis procesa razmene između tla i atmosfere. Bilo da je u pitanju razmena CO₂, skladištenje ili depozicije NO_x, prisustvo vegetacije na podlozi, posebno šuma značajno menja intenzitet i prirodu procesa. Prema tome, svaki napredak u modeliranju površinskih procesa trebao bi da krene u pravcu ispravnog, fizički realističnog opisa vegetacije. Promena načina opisa biljnog sklopa u pojedinačnim shemama, kao i u MLC-LAPS shemi dala je jasan napredak u realističnosti modela. Za razliku od početnih modela MLC-LAPS poseduje mogućnost parametrizacije ekofizioloških i hemijskih procesa karakterističnih za guste ili retke šumske sklopove. Prema tome, može se odrediti optimalna struktura vegetacije koja bi dala najbolji rezultat u uklanjanju polutanata ili onemogućavanju njihovih vertikalnih transporta. Rezultati su pokazali da ugljen-dioksid najbolje apsorbuje vegetacija sa ravnomerno raspoređenom biljnom masom, ovalnog oblika, kroz koji zračenje lako prolazi. Postavlja se pitanje, da li bi se ista struktura vegetacije ponašala kao optimalan ponor CO₂ u uslovima povećanog UV zračenja, koje je rezultat globalnog zagađenja vazduha i stanjivanja ozonskog omotača. Ili bi možda biljke koje senče niže slojeve vegetacije bolje napredovale u takvim uslovima. Ponor NO_x i O₃ su šume koje onemogućavaju vertikalni transport, smanjuju količinu zračenja koja dospe do nižih slojeva, odnosno šume čiji maksimum lisne površine se javlja visoko u gornjoj četvrtini biljnog sklopa. S obzirom na to što su biljni sklopovi date strukture veliki ponori O₃ u prirodnim uslovima, degradirajuće dejstvo ozona negativno će da utiče na rast i razvoj gustih šuma. MLC-LAPS shema dozvoljava praćenje pojava koje izaziva vertikalna heterogenost vegetacije. Detaljan opis strukture biljnog sklopa omogućava opisivanje uticaja različitih agrotehničkih mera koje menjaju gustinu, visinu, pokrivenost ili neki strukturalni parametar, a koje se mogu opisati pojedinim parametrima modela, na ukupnu neto razmenu ili npr. trend ukupne primarne produkcije biljne mase.

Mana svakog, trenutno prisutnog modela, je neadekvatno modeliranje turbulentnog transporta veličina unutar vazduha koji ispunjava biljni sklop. Do sada korišćena *K*-shema daje dobre rezultate samo u određenim situacijama, npr. ukoliko se biljni sklop opiše bez izvora i ponora. Složenost problema dozvoljava da samo mali broj kompleksnih trodimenzionalnih modela, koji se koriste isključivo samostalno, koriste složeniji pristup modeliranju razmene između slojeva unutar vegetacije, uključujući viši red zatvaranja jednačine kretanja. *LAD* koncept korišćen u MLC-LAPS shemi približava nas mogućoj promeni parametrizacije turbulentnog transporta koji će sigurno biti jedan od budućih zadataka.

Prikazani rezultati verifikacije MLC-LAPS sheme govore u prilog kaplovanja shema radi povećavanja njihove sposobnosti i unapređivanja parametrizacije različitih spregnutih meteoroloških i eko-fizioloških veličina. Spregnutost procesa u shemi zapravo imitira spregnutost prirodnih procesa i mahanizme njihovog odigravanja, pa se kaplovanjem prilazi jedan korak bliže u numeričkom opisu prirode.

LITERATURA

1. Andreas, E.L., Claffey, K.J., Fairall, C.W., Grachev, A.A., Guest, P.S., Jordan, R.E., Persson, P.O.G., 2004: Measurements of the von Karman constant in the atmospheric surface layer – further discussions. In: *Proceedings of 16th Conference on Boundary Layers and Turbulence*, Portland, Amer. Meteorol. Soc., 7.2, 1–7.
2. Atkins, P., de Paula, J., 2006: *Physical chemistry*. 8th ed., W. H. Freeman and Company, New York, p. 1085.
3. Atkinson, R., Lloyd, A.C., Wings, L., 1982: An updated chemical mechanism for hydrocarbon/NO_x/SO₂ photooxidations suitable for inclusion in atmospheric simulation models. *Atmos. Environ.*, **16**, 1341–1355.
4. Arrhenius, S., 1908: *Das Werden der Welten*. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, p. 208.
5. Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, Ü., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A.S., Martin, P.H., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grünwald, T., Morgenstern, K. et al., 2000: Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: The EUROFLUX Methodology. *Adv. Ecol. Res.*, **30**, 114–177.
6. Baldocchi, D., 1991: Canopy control of trace gas emissions. In: *Trace Gas Emissions by Plants*. Eds. Roy, J., Sharkey T.D., Holland, E.A., Academic Press, San Diego, pp. 293–333.
7. Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., et al., 2001: FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 2415–2434.
8. Baldocchi, D.D., Wilson, K., 2002: Forest canopies as sources and sinks of atmospheric trace gases (methods for scaling up, contributions of different ecosystems): scaling up to the ecosystem level. In: *Trace Gas Exchange in Forest Ecosystems*. Eds. Gasche, R., Papen, H., Rennenberg, H., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 229–242.
9. Baldocchi, D.D., 1994: An analytical solution for coupled leaf photosynthesis and stomatal conductance models. *Tree Physiol.*, **14**, 1069–1079.
10. Baldocchi, D.D., 2003: Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biol.*, **9**, 479–492.
11. Baldocchi, D.D., Hicks, B.B., Camara, P., 1987: A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surface. *Atmosph. Environ.*, **21**(1), 91–101.
12. Ball, J.T., I.E. Woodrow and J.A. Berry. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: *Proceedings of the 7th International Congress on Photosynthesis: Progress in Photosynthesis Research*. Vol. 4. Ed. Biggins, J., Martins Nijhoff, Dordrecht, pp. 221–224.
13. Bonan, G.B., Levis, S., Kergoat, L., Oleson, K.W., 2002: Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models. *Glob. Biogeochem. Cy.*, **16**(2), 5.1–5.23.
14. Bond–Lamberty, B., Thomson, A., 2010: A global database of soil respiration data. *Biogeosciences*, **7**, 1915–1926.

15. Brasseur, G.P., Orlando, J.J., Tyndall, G.S., Eds., 1999: *Atmospheric chemistry and global change*. Oxford University Press, New York, p. 688.
16. Brown, M., Parker, G.G., Posner, N.E., 1994: A survey of ultraviolet-B radiation in forests. *J. Ecol.*, **82**(4), 843–854.
17. Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Bradley, E.F., 1971: Flux–profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 181–189.
18. Calvet, J.C., Noilhan, J., Roujean, J.L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., Wigneron, J.P., 1998: An interactive SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agr. Forest. Meteorol.*, **92**, 73–95.
19. Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998: An introduction to environmental biophysics. 2nd ed., Springer–Verlag, New York, Inc., p. 306.
20. Chen, J.M., Mo, G., Pisek, J., Deng, F., Ishozawa, M, Chan, D., 2012: Effects of foliage clumping on global terrestrial gross primary productivity. *Global Biogeochem. Cy.*, **26**(GB1019).
21. Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao S., Thornton, P., 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2013)*. Eds. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, New York, pp. 465–570.
22. Collatz, G.J., Ball, J.T., Grivet, C., Berry, J.A., 1991: Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agric. Forest Meteorol.*, **54**(2–4), 107–136.
23. Collatz, J., Ribas–Carbo, M., Berry, J., 1992: Coupled photosynthesis–stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Aust. J. Plant Physiol.*, **19**, 519–538.
24. Cowan, I.R., 1968: Mass, heat, and momentum exchange between stands of plants and their atmospheric environment. *Qtr. Jour. Royal Meteorol. Soc.*, **94**, 523–544.
25. Dang, Q.–L., Margolis, H.A., Collatz, G.J., 1998: Parameterization and testing of a coupled photosynthesis–stomatal conductance model for boreal trees. *Tree Physiol.*, **18**, 141–153.
26. Davidson, E.A., 1992: Pulses of nitric oxide and nitrous oxide ux following wetting of dry soil: an assessment of probable sources and importance relative to annual uxes. *Ecol. Bull.*, **42**, 149–155.
27. Davidson, E.A., Kinglerlee, W., 1997: A global inventory of nitric oxide emissions from soils. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, **48**, 37–50.
28. de Pury, D.G.G., Farquhar, G.D., 1997: Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big–leaf models. *Plant Cell. Environ.*, **20**(5), 537–557.
29. de Wit, C.T., 1965: Photosynthesis of Leaf Canopies. In: *Agricultural Research Report 663*, Wageningen, pp. 1–57.
30. del Grosso, S.J., Parton, W.J., Mosier, A.R., Holland, E.A., Pendall, E., Schimel, D.S., Ojima, D.S., 2005: Modeling soil CO₂ emissions from ecosystems. *Biogeochemistry*, **73**, 71–91.
31. Door, H., Munnich, K.O., 1987: Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperature zone. *Tellus*, **39B**, 114–121.
32. Drewry, D.T., Kumar, P., Long, S., Bernacchi, C., Liang, X.–Z., Sivapalan, M., 2010: Ecohydrological responses of dense canopies to environmental variability: 1. Interplay between vertical structure and photosynthetic pathway. *J. Geophys. Res.*, **115**(G04022).
33. Droppo, Jr., J.G., 1985: Concurrent measurements of ozone dry deposition using eddy correlation and profile flux methods. *J. Geophys. Res.*, **90**(D1), 2111–2118.
34. Dubois, J.J.B., Fiscus, E.L., Booker, F.L., Flowers, M.D., Reid, C.D., 2007: Optimizing the statistical estimation of the parameters of the Farquhar–von Caemmerer–Berry model of photosynthesis. *New Phytol.*, **176**, 402–414.
35. Duncan, W.G., Loomis, R.S., Williams, W.A., Hanau, R., 1967: A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, **38**, 181–205.

36. Duyzer, J., Pilegaard, K., Simpson, D., Weststrate, H., Walton, S., 2005: A simple model to estimate exchange rates of nitrogen dioxide between the atmosphere and forests. *Biogeosciences Discuss.*, **2**, 1033–1065.
37. Duyzer, J., Weststrate, H., Walton, S., 1995: Exchange of ozone and nitrogen oxides between the atmosphere and coniferous forest. *Water Air Soil Pollut.*, **85**, 2065–2070.
38. Dyer, A.J., Hicks, B.B., 1970: Flux–gradient relationships in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **96**, 715–721.
39. Fang, C., Moncrieff, J.B., 2001: The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biol. Biochem.*, **33**, 155–165.
40. Fang, H.J., Yu, G.R., Cheng, S.L., Zhu, T.H., Wang, Y.S., Yan, J.H., Wang, M., Cao, M., Zhou, M., 2010: Effects of multiple environmental factors on CO₂ emission and CH₄ uptake from old–growth forest soils. *Biogeosciences*, **7**, 395–407.
41. Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A. 1980: A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, **149**, 78–90.
42. Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., Berry, J.A. 2001: Models of photosynthesis. *Plant Physiol.*, **125**, 42–45.
43. Firanj, A., Lalic, B., Podrascanin, Z., 2014: The impact of forest architecture parameterization on GPP simulations. *Theor. Appl. Climatol.*, DOI: 10.1007/s00704–014–1251–7.
44. Fitzjarrald, D.R., Lenschow, J.H., 1983: Mean concentration and flux profiles for chemically reactive species in the atmospheric surface layer. *Atmos. Environ.*, **17**(12), 2505–2512.
45. Flechard, C.R., Nemitz, E., Smith, R.I., Fowler, D., Vermeulen, A.T., Bleeker, A., Erisman, J.W., Simpson, D., Zhang, L., Tang, Y.S., Sutton, M.A., 2011: Dry deposition of reactive nitrogen to European ecosystems: a comparison of inferential models across the NitroEurope network. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 2703–2728.
46. Foken, T., 2006: 50 years of Monin–Obukhov similarity theory. *Bound.–Lay. Meteorol.*, **119**, 431–447.
47. Foley, J.A., 1994: The sensitivity of terrestrial biosphere to climate change: a simulation of middle Holocene. *Glob. Biogeochem. Cy.*, **8**, 505–525.
48. Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R.A., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Jones, C., Joos, F., Kato, T., et al., 2006: Climate–carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison. *J. Climate*, **19**, 3337–3353.
49. Friend, A.D., 2001: Modelling canopy CO₂, fluxes: are 'big–leaf' simplifications justified? *Glob. Ecol. Biogeography*, **10**, 603–619.
50. Ganzeveld, L., Lelieveld, J., 1995: Dry deposition parameterization in a chemistry general circulation model and its influence on the distribution of reactive trace gases. *J. Geophys. Res.*, **100**, 20999–21012.
51. Ganzeveld, L., Lelieveld, J., Roelofs, G.–J., 1998: Dry deposition parameterization of sulfur oxides in a chemistry and general circulation. *J. Geophys. Res.*, **103**, 5679–5694.
52. Ganzeveld, L.N., Lelieveld, J., Dentener, F.J., Krol, M.C., Roelofs, G.–J., 2002a: Atmosphere–biosphere trace gas exchanges simulated with a single–column model. *J. Geophys. Res.*, **107**(D16) 4297.
53. Ganzeveld, L., Lelieveld, J., Dentener, F.J., Krol, M.C., Bouwman, A.F., Roelofs, G.–J., 2002b: The influence of soil–biogenic NO_x emissions on the global distribution of reactive trace gases: the role of canopy processes. *J. Geophys. Res.*, **107**(D16), 4298.
54. Ganzeveld, L., Lelieveld, J., 2004: Impact of Amazonian deforestation on atmospheric chemistry. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06105.
55. Ganzeveld, L., Klemm, O., Rappenglück, B., Valverde–Canossa, J., 2006a: Evaluation of micrometeorology over a coniferous forest in a single–column chemistry–climate model. *Atmos. Environ.*, **40**, 21–27.
56. Ganzeveld, L., Valverde–Canossa, J., Moortgat, G., Steinbrecher, R., 2006b: Evaluation of peroxide exchanges over a coniferous forest in a single–column chemistry–climate model. *Atmos. Environ.*, **40**, 68–80.
57. Gao, W., Wesely, M.L., Doskey, P.V., 1993: Numerical modeling of the turbulent diffusion and chemistry of NO_x, O₃, isoprene, and other reactive trace gases in and above a forest canopy. *J. Geophys. Res.*, **98**, 18339–18353.

58. Garstang, M., Fitzerrald, D.R., 1999: *Observations of surface and atmosphere interaction in Tropics*. Oxford University Press, New York, p. 405.
59. Gash, J.H.C., Nobre, C.A., Roberts, J.M., Victoria, R.L., 1996: An overview of ABRACOS. In: *Amazonian Deforestation and Climate*. Eds. Gash, J.H.C., Nobre, C.A., Roberts, J.M., Victoria, R.L., John Wiley & Sons, Chichester, pp. 1–14.
60. Gash, J.H.C., Nobre, C.A., 1997: Climatic effects of amazonian deforestation: Some results from ABRACOS. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 823–830.
61. Geddes, J.A., Murphy J.G., 2014: Observations of reactive nitrogen oxide fluxes by eddy covariance above two midlatitude North American mixed hardwood forests. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 2939–2957.
62. Gery, M.W., Whitten, G.Z., Killus, J.P., Dodge, M.C., 1989: A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. *J. Geophys. Res.*, **94**, 12925–12956.
63. Gower, S.T., Vogel, J.G., Norman, J.M., Kucharik, C.J., Steele, S.J., Stow, T.K., 1997: Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine, and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *J. Geophys. Res.*, **102**, 29029–29041.
64. Griffin, R.J., Dabdub, D., Seinfeld, J.H., 2002: Secondary organic aerosol 1. Atmospheric chemical mechanism for production of molecular constituents. *J. Geophys. Res.*, **107**(D17), 4332.
65. Grünhage, L., Haenel, H.D., 1997: PLATIN (PLant–ATmosphere INteraction) I: A model of plant–atmosphere interaction for estimating absorbed doses of gaseous air pollutants. *Environ. Pollut.*, **98**(1), 37–50.
66. Hadley, J.L., O’Keefe, J., Munger, J.W., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., 2009: Phenology of forest–atmosphere carbon exchange for deciduous and coniferous forests in southern and northern New England: Variation with latitude and landscape position. In: *Phenology of ecosystem processes: applications in global change research*, Ed. Noormets, A., Springer Verlag, Dordrecht, pp 119–141.
67. Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T., Andrews, J.A., 2000: Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, **48**(1), 115–146.
68. Hoffmann, M.R., 2005: Homogeneous and heterogeneous photochemistry in the troposphere. In: *Environmental Photochemistry*, part II. Eds. Boule, P., Bahnemann, D.W., Robertson, P.K., Springer, New York, pp. 77–118.
69. Högström, U., 1967: Turbulent water vapour transfer at different stability conditions. *Phys. Fluids*, **10**, 247–254.
70. Högström, U., 1974: A field study of the turbulent fluxes of heat water vapour and momentum at a “typical” agricultural site. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **100**, 624–639.
71. Högström, U., 1985: Von Karmans constant in atmospheric boundary flow: revaluated. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 263–270.
72. Högström, U., 1988: Non–dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re–evaluation. *Bound.–Lay. Meteorol.*, **42**, 55–78.
73. Högström, U., 1996: Review of some basic characteristics of the atmospheric surface layer. *Bound.–Lay. Meteorol.*, **78**, 215–246.
74. Hollinger, D.Y., Kelliher, F.M., Byers, J.N., Hunt, J.E., McSeveny, T.M., Weir, P.L., 1994: Carbon dioxide exchange between an undisturbed old–growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, **75**(1), 134–150.
75. Hosoi, F., Nakai, Y., Omasa, K., 2010: Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3–D airborne and ground–based scanning lidar remote–sensing techniques. *IEEE T. Geosci. Remote.*, **48**(5), 2215–2223.
76. Houghton, D.D., 1985: *Handbook of Applied Meteorology*. John Wiley & Sons, New York, p. 1461.
77. Houweling, S., Dentener, F., Lelieveld, J., 1998: The impact of nonmethane hydrocarbon compounds on tropospheric photochemistry. *J. Geophys. Res.*, **103**(D9), 10673–10696
78. Ingestad, T., Lund, A.–B., 1986: Theory and techniques for steady state mineral nutrition and growth of plants. *Scand. J. For. Res.*, **1**, 439–453.

79. Jacob, D.J., Wofsy, S.C., 1990: Budgets of reactive nitrogen, hydrocarbons and ozone over the Amazon forest during the wet season. *J. Geophys. Res.*, **95**, 16737–16754.
80. Jacobson, M.Z., 2005: *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. 2nd ed., Cambridge University Press, New York, p. 829.
81. Jarvis, P.G., 1976: Interpretation of variations in leaf water potential and stomatal Conductance Found in Canopies in Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B–Biological Sciences* **273**(927), 593–610.
82. Jenkin, M.E., Saunders, S.M., Wagner, V., Pilling, J., 2003: Protocol for the development of the Master Chemical Mechanism, MCM v3 (Part B): tropospheric degradation of aromatic volatile organic compounds. *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 181–193.
83. Joss, U., Graber, W.K., 1996: Profiles and simulated exchange of H₂O, O₃, NO₂ between the atmosphere and the HartX Scots Pine Plantation. *Theor. Appl. Climatol.*, **53**, 157–172.
84. Johansson, C., Granat, L., 1984: Emission of nitric oxide from arable land. *Tellus*, **36B**, 25–37.
85. Jupp, D.L.B., Culvenor, D.S., Lovell, J.L., Newnham, G.J., Strahler, A.H., Woodcock, C.E., 2008: Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground based laser called “Echidna”. *Tree Physiol.*, **29**(2), 171–191.
86. Kader, B.A., Yaglom, A.M., 1972: Heat and mass transfer laws for fully turbulent wall flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **15**, 2329–2350.
87. Kasting, J.F., 1993: Earth’s early atmosphere. *Science*, **259**, 920–926.
88. Kastori, R., 1998: *Fiziologija biljaka*. Feljton, Novi Sad, str. 506.
89. Kattge, J., Knorr, W., Raddatz, T., Wirth, C., 2009: Quantifying photosynthetic capacity and its relationship to leaf nitrogen content for global-scale terrestrial biosphere models. *Global Change Biol.*, **15**, 976–991.
90. Kimball, J.S., Thornton, P.E., White, M.A., Running, S.W., 1997: Simulating forest productivity and surface–atmosphere carbon exchange in the BOREAS study region. *Tree Physiol.*, **17**, 589–599.
91. Knohl, A., Baldocchi, D.D., 2008: Effects of diffuse radiation on canopy gas exchange processes in a forest ecosystem. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **113**:G02023.
92. Kondo, J., Sato, T., 1982: The determination of the von Karman constant. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **60**, 461–471.
93. Kotchenova, S.Y., Song, X., Shabanov, N.V., Potter, C.S., Knyazikhin, Y., Myneni, R.B., 2004: Lidar remote sensing for modeling gross primary production of deciduous forests. *Remote Sens. Environ.*, **92**, 158–172.
94. Kramm, G., Beier, N., Foken, T., Müller, H., Schröder, P., Seiler, W., 1996: A SVAT Scheme for NO, NO₂, and O₃ – Model Description and Test Results. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **61**, 89–106.
95. Kull, O., Jarvis, P.G., 1995: The role of nitrogen in a simple scheme to scale up photosynthesis from leaf to canopy. *Plant, Cell Environ.*, **18**, 1174–1182.
96. Lalić, B., 1997: Vertikalni profil vetra unutar „viskozno“g” podsloja iznad vegetacije. *Magistarski rad*, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 70 str.
97. Lalic, B., Mihailovic, D.T., Rajkovic, B., Arsenic, I., Radlovic, D., 2003: Wind profile within the forest canopy and in the transition layer above it. *Environ. Model. Soft.*, **18**, 943–950.
98. Lalic, B., Mihailovic, D.T., 2004: An empirical relation describing leaf–area density inside the forest for environmental modeling. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 641–645.
99. Lalić, B., 2006: Jedan mogući postupak u parametrizaciji turbulentnog transporta unutar i iznad šume za potrebe numeričkog modeliranja atmosferskih procesa različitih razmera. *Doktorska disertacija*, ACIMSI, Univerzitet u Novom Sadu, 139 str.
100. Lalic, B., Firanj, A., Mihailovic, D.T., Podrascanin, Z., 2013: Parameterization of PAR vertical profile within horizontally uniform forest canopies for use in environmental modeling. *J. Geophys. Res.*, **118**, 8156–8165.
101. Lamaud, E., Loubet, B., Irvine, M., Stella, P., Personne, E., and Cellier, P., 2009: Partitioning of ozone deposition over a developed maize crop between stomatal and non-stomatal uptakes, using eddy-covariance flux measurements and modelling. *Agr. Forest Meteorol.*, **149**, 1385–1386.

102. Lambers, H., Chapin III, S.F., Pons, T.L., 2008: *Plant Physiological Ecology*. 2nd ed., Springer, New York, p. 623.
103. Launder, B.E., Reece, G.J., Rodi, W., 1975: Progress in the development of Reynolds–stress turbulence closure. *J. Fluid Mech.*, **68**, 537–566.
104. Law, B.E., Cescatti, A., Baldocchi, D.D., 2001: Leaf area distribution and radiative transfer in open–canopy forests: implications for mass and energy exchange. *Tree Physiol.*, **21**, 777–787.
105. Lawrence, M. G., Jöockel, P., von Kuhlmann, R., 2001: What does the global mean OH concentration tell us? *Atmos. Chem. Phys.*, **1**, 37–49.
106. Lee, M.–S., Nakane, K., Nakatsubo, T., Mo, W.–H., Koizumi, H., 2002: Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad–leaved forest. *Ecol. Res.*, **17**(3), 401–409.
107. Lenz, K.E., Host, G.E., Roskoski, K., Noormets, A., Sôber, A., Karnosky, D.F., 2010: Analysis of a Farquhar–von Caemmerer–Berry leaf–level photosynthetic rate model for *Populus tremuloides* in the context of modeling and measurement limitations. *Environ. Pollut.*, **158**, 1015–1022.
108. Leuning, R., 1990: Modeling Stomatal Behavior and Photosynthesis of *Eucalyptus Grandis*. *Aust. J. Plant Physiol.*, **17**(2), 159–175.
109. Liou, K.N., 2002: *An Introduction to Atmospheric Radiation*. 2nd ed., Academic Press, San Diego, p. 583.
110. Lloyd, J., Taylor, J.A., 1994: On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.*, **8**(3), 315–323.
111. Mahfouf, J.F., 1990: A numerical study of the surface water budget during HAPEX– MOBILHY. *Bound.–Lay. Meteorol.*, **53**, 201–222.
112. Mahrt, L., 1982: Momentum balance of gravity flows. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2701–2711.
113. Massman, W., 1987: A comparative study of some mathematical models of the mean wind structure and aerodynamic drag of plant canopies. *Bound.–Lay. Meteorol.*, **40**, 179–197.
114. Medlyn, B.E., Badek, F.–W., de Pury, D.G.G., Barton, C.V.M., Broadmeadow, M., Ceulemans, R., de Angelis, P., Forstreuter, M., Jach, M.E., et al. 1999: Effects of elevated CO₂ on photosynthesis in European forest species: A meta–analysis of model parameters. *Plant Cell. Environ.*, **22**, 1475–1495.
115. Melillo, J.M., Butlera, S., Johnsona, J., Mohana, J., Steudlera, P., Luxa, H., Burrowsa, E., Bowlesf, F., Smitha, R., Scotta, L., Varioa, C., Hilla, T., Burtoni, A., 2011: Soil warming, carbon–nitrogen interactions, and forest carbon budgets. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **108**(23), 9508–9512.
116. Mihailović, D.T., 1991: A model for prediction of the soil temperature and the soil moisture content in three layers. *Z. Meteorol.*, **41**, 29–33.
117. Mihailovic, D.T., 1996: Description of a land – air parameterization scheme (LAPS). *Global Planet. Change*, **13**, 207–215.
118. Mihailović, D.T., Ruml, M., 1996: Design of land-air parameterization scheme (LAPS) for modelling boundary layer surface processes. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **58**, 65–81.
119. Mihailović, D.T., Kallos, G., 1997: A sensitivity study of a coupled-vegetation boundary -layer scheme for use in atmospheric modelling. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **82**, 283–315.
120. Mihailović, D.T., Kallos, G., Lalić, B., Papadopoulos, A., Arsenić, I., 1999: Parameterization of hydrological processes for application to regional and mesoscale modeling. *Glob. Atmos. Ocean Sys.*, **8**, 78–91.
121. Mihailović, D.T., Lee, T.J., Pielke, R.A., Lalić, B., Arsenić, I., Rajković, B., Vidale, P.L., 2000: Comparison of different boundary layer schemes using single point micrometeorological field data. *Theor. App. Climatol.*, **67**, 135–151.
122. Mihailović, D. T., Lalić, B., Arsenić, I., Eitzinger, J., Dusanić, N., 2001: Simulation of air temperature inside the canopy by the LAPS surface scheme. *Ecol. Model.*, **147**, 199–207.
123. Mihailović, D.T., Rao, S.T., Hogrefe, C., Clark, R., 2002: An approach for the aggregation of aerodynamic surface parameters in calculating the turbulent fluxes over heterogeneous surfaces in atmospheric models. *Environ. Fluid Mech.*, **2**(4), 315–337.
124. Mihailovic, D.T., Lazic, J., Lesny, J., Olejnik, J., Lalic, B., Kapor, D., Cirisan, A., 2010: A new design of the LAPS land surface scheme for use over and through heterogeneous and non-heterogeneous surfaces: Numerical simulations and tests. *Theor. App. Climatol.*, **100**, 299–323.

125. Misson, L., Baldocchi, D.D., Black, T.A. et al., 2007: Partitioning forest carbon fluxes with overstory and understory eddy-covariance measurements: a synthesis based on FLUXNET data. *Agr. Forest Meteorol.*, **144**, 14–31.
126. Monin, A.S., Obukhov, A.M., 1954: Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. *Tr. Akad. Nauk., SSSR Geophys. Inst.*, **24**(151), 1963–1987.
127. Monteith, J.L., 1977: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, **281**, 277–294.
128. Moxim, W.J., Levy II, H., Kasibhatla, P. S., 1996: Simulated global tropospheric PAN: its transport and impact on NO_x. *J. Geophys. Res.*, **101**, 12621–12638.
129. Munger, J.W., Wofsy, S.C., Bakwin, P.S., Fan, S.–M., Goulden, M.L., Daube, B.C., Goldstein, A.H., Moore, K.E., Fitzjarrald, D.R., 1996: Atmospheric deposition of reactive nitrogen oxides and ozone in a temperate deciduous forest and a subarctic woodland: 1. Measurements and mechanisms. *J. Geophys. Res.*, **101**(D7), 12639–12657.
130. Munger, W., Wofsy, S., 1999a: Canopy–Atmosphere Exchange of Carbon, Water and Energy at Harvard Forest EMS Tower since 1991. Harvard Forest Data Archive: HF004.
131. Munger, W., Wofsy, S., 1999b: Concentrations and surface exchange of air pollutants at Harvard Forest EMS tower since 1990. Harvard Forest Data Archive: HF066.
132. Neubert, A., Kley, D., Wildt, J., 1993: Uptake of NO, NO₂ and O₃ by sunflower (*Helianthus annuus* L.) and Tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.) – Dependence on stomatal conductivity. *Atmos. Environ.*, **27**(14), 2137–2145.
133. Niu, S., Yuan, Z., Zhang, Y., Liu, W., Zhang, L., Huang, J., et al., 2005: Photosynthetic responses of C3 and C4 species to seasonal water variability and competition. *J. Exp. Bot.*, **56**, 2867–2876.
134. Niyogi, D.D.S., Alapaty, K., Raman, S., 2003: A photosynthesis-based dry deposition modeling approach. *Water Air Soil Pollut.*, **144**, 171–194.
135. Noilhan, J., Planton, S., 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536–549.
136. Norby, R.J., Warrena, J.M., Iversena, C.M., Medlynb, B.E., McMurtriec, R.E., 2010: CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **107**(45), 19368–19373.
137. Norman, J.M., 1993: Scaling processes between leaf and canopy. In: *Scaling physiological processes: leaf to globe*. Eds. Ehleringer, J.R., Field, C., Academic Press, San Diego, pp. 41–75.
138. Papke, H., Papen, H., 1998: Influence of acid rain and liming on fluxes of NO and NO₂ from forest soil. *Plant Soil*, **199**, 131–139.
139. Pendall, E., Bridgham, S., Hanson, P.J., Hungate, B., Kicklighter, D.W., Johnson, D.W., Law, B.E., Luo, Y., Megonigal, J.P., Olsrud, M., Ryan, M.G., Wan, S., 2004: Below–ground process responses to elevated CO₂ and temperature: A discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytol.*, **162**, 311–322.
140. Pielke, R.A., 1984: *Mesoscale meteorological modelling*. Academic Press, New York, p. 612.
141. Pielke, R.A., Avissar, R., Raupach, M., Dolman, A.J., Zeng, X., Denning, A.S., 1998: Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Glob. Change Biol.*, **4**, 461–475.
142. Portner, H., Bugmann, H., Wolf, A., 2010: Temperature response functions introduce high uncertainty in modelled carbon stocks in cold temperature regimes. *Biogeosciences*, **7**, 3669–3684.
143. Pruitt, W.O., Morgan, D.L., Lourence, F.J., 1973: Momentum and mass transfer in the surface boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **99**, 370–386.
144. Rajković, B., Mesinger, F., 2002: *Mikrometeorologija*. Univerzitet u Beogradu, Beograd, 189 str.
145. Raupach, M.R., Thom, A.S., 1981. Turbulence in and above plant canopies. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **13**, 97–129.
146. Raupach, M.R., Shaw, R.H., 1982: Averaging procedures for flow within vegetation canopies. *Bound.–Lay. Meteorol.*, **22**, 79–90.

147. Reichstein, M., Beer, C., 2008: Soil respiration across scales: The importance of a model–data integration framework for data interpretation, *J. Plant Nutr. Soil Sc.*, **171**, 344–354.
148. Roujean, J.-L., 1996: A tractable physical model of shortwave radiation interception by vegetative canopies. *J. Geophys. Res.*, **101**(D5), 9523–9532.
149. Russell, A.G., Winner, D.A., Harley, R.A., McCue, K.F., Cass, G.R., 1993: Mathematical modeling and control of the dry deposition flux of nitrogen–containing air pollutants. *Environ. Sci. Technol.*, **27**, 2772–2782.
150. Saeki, T., 1960: Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Bot. Mag. (Tokyo)*, **75**, 55–63.
151. Salisbury, F.B., Ross, C.W., 1978: *Plant Physiology*. 2nd ed., Wadsworth, Belmont, p. 422.
152. Sanhueza, E., 1997: Impact of human activity on NO soil fluxes. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, **48**, 61–68.
153. Saunders, S.M., Jenkin, M.E., Derwent, R.G., Pilling, M.J., 2003: Protocol for the development of the MCM v3 (Part A): tropospheric degradation of non–aromatic volatile organic compounds. *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 161–180.
154. Sehmel, G.A., 1980: Particle and gas dry deposition: a review. *Atmos. Environ.*, **14**, 983–1011.
155. Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., Dalcher, A., 1986: A simple biosphere model (SiB) for use with general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505–531.
156. Sellers, P.J., Berry, J.A., Collatz, G.J., Field, C.B., Hall, F.G., 1992: Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and new canopy integration scheme. *Remote Sens. Environ.*, **42**, 187–216.
157. Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D., Bounoua, L., 1996: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *J. Climate*, **9**(4), 676–705.
158. Sellers, P.J., Dickinson, R.E., Randall, D.A., Betts, A.K., Hall, F.G., Berry, J.A., Collatz, G.J., Denning, A.S., Mooney, H.A., Nobre, C.A., Sato, N., Field, C.B., Henderson-Sellers, A., 1997a: Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, **275**(5299), 502–509.
159. Sellers, P.J., Hall, F.G., Kelly, R.D., Black, A., Baldocchi, D., Berry, J., Ryan, M., Jon Ranson, K., Crill, P.M., Lettenmaier, D.P., Margolis, H., Cihlar, J., Newcomer, D., Goodison, B., Wickland, D.E., Guertin, F.E., 1997b: BOREAS in 1997: Experiment overview, scientific results, and future directions. *J. Geophys. Res.*, **102**(D4), 28731–28769.
160. Seok, B., Helmig, D., Ganzeveld, L., Williams, M.W., Vogel, C.S., 2013: Dynamics of nitrogen oxides and ozone above and within a mixed hardwood forest in northern Michigan. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 7301–7320.
161. Skiba, U., Drewer, J., Tang, Y.S., van Dijk, N., Helfter, C., Nemitz, E., Famulari, D., Cape, J.N., Jones, J.K., Twigg, M., Pihlatie, T., Vesala, T., Larsen, K.S., Carter, M.S., Ambus, P., et al., 2009: Biosphere–atmosphere exchange of reactive nitrogen and greenhouse gases at the NitroEurope core flux measurement sites: Measurement strategy and first data sets. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **133**(3–4), 139–149.
162. Sokolov, A. P., Kicklighter, D. W., Melillo, J. M., Felzer, B. S., Schlosser, C. A., and Cronin, T. W., 2008: Consequences of considering carbon–nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *J. Climate*, **21**, 3776–3796.
163. Speziale, C.G., 1991: Analytical methods for the development of Reynolds–stress closures in turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **23**, 107–157.
164. Stockwell, W.R., 1986: A homogeneous gas–phase mechanism for use in a regional acid deposition model. *Atmos. Environ.*, **20**, 1615–1632.
165. Stohl, A., Williams, E., Wotawa, G., Kromp–Kolb, H., 1996: A European inventory of soil nitric oxide emission and the effect of these emissions on the photochemical formation of ozone. *Atmosph. Environ.*, **30**(22), 3741–3755.
166. Stella, P., Personne, E., Loubet, B., Lamaud, E., Ceschia, E., Béziat, P., Bonnefond, J. M., Irvine, M., Keravec, P., Mascher, N., and Cellier, P., 2011: Predicting and partitioning ozone fluxes to maize crops from sowing to harvest: the Surfatzm-O₃ model. *Biogeosciences*, **8**, 2869–2886.

167. Stull, R.B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 667.
168. Tanner, C.B., Sinclair, T.R., 1983: Efficient water use in crop production: research or re-search? In: *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA Special Publication. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1–27.
169. Teske, M.E., Thistle, H.W., 2004: A library of forest canopy structure for use in interception modeling. *Forest Ecol. Manag.*, **198**, 341–350.
170. Thornton, P.E., Doney, S.C., Lindsay, K., Moore, J.K., Mahowald, N., Randerson, J.T., Fung, I., Lamarque, J.-F., Feddes, J.J., Lee, Y.-H., 2009: Carbon–nitrogen interactions regulate climate–carbon cycle feedbacks: results from an atmosphereocean general circulation model. *Biogeosciences*, **6**, 2099–2120.
171. Treuhaft, R.N., Asner, G.P., Law, B.E., Van Tuyl, S., 2002: Forest leaf area density profiles from the quantitative fusion of radar and hyperspectral data. *J. Geophys. Res.*, **107**(D21 4568).
172. Tuomia, M., Vanhalaa, P., Karhua, K., Fritzec, H., Liskia, J., 2008: Heterotrophic soil respiration—Comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecol. Model.*, **211**, 182–190.
173. van Groenigen, K.J., Osenberg, C.W., Hungate, B.A., 2011: Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂. *Nature*, **475**, 214–216.
174. Urbanski, S., Barford, C., Wofsy, S., Kucharik, C., Pyle, E., Budney, J., McKain, K., Fitzjarrald, D., Czikowsky, M., Munger, J.W., 2007: Factors controlling CO₂ exchange on timescales from hourly to decadal at Harvard Forest. *J. Geophys. Res.*, **112**, G02020.
175. van Hoff, J.H., 1884: *Etudes de dynamique chimique*. Frederik Muller & Co., Amsterdam.
176. Vitousek, P.M., Menge, D.N., Reed, S.C., Cleveland, C.C., 2013: Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, **27**, 368(1621):201301.
177. von Caemmerer, S., 2000: *Biochemical models of leaf photosynthesis*. CSIRO publishing, Collingwood, p. 165.
178. Vukadinović, S.V., 1990: *Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike*. Privredni pregled, Beograd, 492 str.
179. Walcek, C.J., Brost, R.A., Chang, J.S., 1986: SO₂, sulfate and HNO₃ deposition velocities computed using regional landuse and meteorological data. *Atmos. Environ.*, **20**, 949–964.
180. Walton, S., Gallagher, M.W., Duyzer, J.H., 1997: Use of a detailed model to study the exchange of NO_x and O₃ above and below a deciduous canopy. *Atmos. Environ.*, **31**, 2915–2931.
181. Weibull, W., 1951: A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, **18**, 293–297.
182. Wesely, M.L., 1989: Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmos. Environ.*, **23**, 1293–1304.
183. Wesely, M.L., Hicks, B.B., 2000: A review of the current status of knowledge on dry deposition. *Atmos. Environ.*, **34**, 2261–2282.
184. Whitten, G.Z., Hogo, H., Killus, J.P., 1980: The carbon bond mechanism: A condensed kinetic mechanism for photochemical smog. *Environ. Sci. Technol.*, **14**, 690–700.
185. Wilks, D.S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed., Elsevier Inc., p. 649.
186. Williams, E.J., Parrish, D.D., Fehsenfeld, F.C., 1987: Determination of nitrogen oxide emissions from soils: Results from a grassland site in Colorado, United States. *J. Geophys. Res.*, **92**, 2173–2179.
187. Wilson, J.D., 1985: Numerical studies of flow through a windbreak. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **21**, 119–194.
188. Wilson, K.W., Baldocchi, D.D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Dolman, H., Falge, E., Field, C., Goldstein, A., Granier, A., Grelle, A., Halldor, T., Hollinger, D., Katul, G., Law, B.E., 2002: Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites. *Water Resour. Res.*, **38**(12), 30.1–30.11.

189. Wolfe, G.M., Cantrell, C., Kim, S., Mauldin III, R.L., Karl, T., Harley, P., Turnipseed, A., Zheng, W., Flocke, F., Apel, E.C., Hornbrook, R.S., Hall, S.R., Ullmann, K., Henry, S.B., DiGangi, J.P. et al., 2014: Missing peroxy radical sources within a summertime ponderosa pine forest. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 4715–4732.
190. Wolfe, G.M., Thornton J.A., 2011: The Chemistry of Atmosphere–Forest Exchange (CAFE) model. Part 1: Model description and characterization. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 77–101.
191. Wong, S.C., Cowan, I.R., Farquhar G.D., 1979: Stornatal conductance correlates with photosynthetic capacity. *Nature*, **282**, 424–426.
192. Woodward, F.I., Thompson, G.B., McKee, I.F., 1991: How plants respond to climate change: Migration rates, individualism and the consequences for plant communities. *Ann. Bot.*, **67**, 23–38.
193. Wullschleger, S.D., 1993: Biochemical limitations to carbon assimilation in C3 plants – A retrospective analysis of the A/C_i curves from 109 species. *J. Exp. Bot.*, **44**, 907–920.
194. Xu, L., Baldocchi, D.D., Tang, J., 2004: How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochem. Cy.*, **18**(GB4002).
195. Xue, B.-L., Kumagai, T., Lida, S., Nakai, T., Matsumoto, K., Komatsu, H., Otsuki, K., Ohta, T., 2011: Influences of canopy structure and physiological traits on flux partitioning between understory and overstory in an eastern Siberian boreal larch forest. *Ecol. Model.*, **222**, 1479–1490.
196. Yaglom, A.M., 1977: Comments on wind and temperature flux–profile relationships. *Bound.–Lay. Meteorol.*, **11**, 89–102.
197. Yan, X., Ohara, T., Akimoto, H., 2005: Statistical modeling of global soil NO_x emissions, *Global Biogeochem. Cy.*, **19**, GB3019.
198. Yienger, J.J., Levy, H. 1995: Empirical model of global soil–biogenic NO_x emissions, *J. Geophys. Res.*, **100**, 11447–11464.
199. Yuste, J.C., Janssens, I.A., Carrara, A., Meiresonne, L., Ceulemans, R., 2003: Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiol.*, **23**(18), 1263–1270.
200. Zeng, P., Takahashi, H., 2000: A first order closure model for the wind flow within and above vegetation canopies. *Agric. For. Meteorol.*, **103**, 301–313.

DODATAK A

Tabela A.1 Hemijske reakcije gasne faze Carbon Bond Mechanism IV (CBM4).

R	Reakcija	A	-E/R	n
<i>Neorganske reakcije</i>				
1	$\text{NO}_2 \xrightarrow{h\nu} \text{NO} + \text{O}_3$	RJ.1		
2	$\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2$		$2,0 \cdot 10^{-12}$	-1400
3	$\text{NO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$		$3,7 \cdot 10^{-12}$	250
4	$\text{NO}_2 + \text{OH} \xrightarrow{M} \text{HNO}_3$	k_0 k_∞	$2,6 \cdot 10^{-30}$ $2,4 \cdot 10^{-11}$	3,2
5	$\text{HNO}_3 \xrightarrow{h\nu} \text{NO}_2 + \text{OH}$	RJ.2		1,3
6	$\text{HNO}_3 + \text{OH} \rightarrow \text{NO}_3$	k_0^a k_1^a k_2^a	$7,2 \cdot 10^{-15}$ $4,1 \cdot 10^{-16}$ $1,9 \cdot 10^{-33}$	785
7	$\text{NO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3$		$1,2 \cdot 10^{-13}$	1440
8	$\text{NO} + \text{NO}_3 \xrightarrow{M} 2\text{NO}_2$		$1,5 \cdot 10^{-11}$	725
9	$\text{NO}_3 \xrightarrow{h\nu} \text{NO}$	RJ.3		-2450
10	$\text{NO}_3 \xrightarrow{h\nu} \text{NO}_2 + \text{O}_3$	RJ.4		170
11	$\text{NO}_2 + \text{NO}_3 \xrightarrow{M} \text{N}_2\text{O}_5$	k_0 k_∞	$2,2 \cdot 10^{-30}$ $1,5 \cdot 10^{-12}$	
12	$\text{N}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{NO}_3$		$k(\text{NO}_2 + \text{NO}_3)/\text{EQ}$	

				N_2O_5	
13	N_2O_5	$\xrightarrow{h\nu}$	$NO_2 + NO_3$	RJ.5	
14	NO_2+HO_2	\rightarrow	HNO_4	k_0	$1,8 \cdot 10^{-31}$
				k_∞	$4,7 \cdot 10^{-12}$
15	HNO_4	$\xrightarrow{h\nu}$	NO_2+HO_2	RJ.6	
16	HNO_4+OH	\rightarrow	NO_2		$1,3 \cdot 10^{-12}$ 380
17	HNO_4	\xrightarrow{M}	NO_2+HO_2		$k(NO_2+HO_2)/EQ$ HNO_4
18	O_3	$\xrightarrow{h\nu}$	$2OH$	RJ7	
				kO_2^d	$3,2 \cdot 10^{-11}$ 70
				kN_2^d	$1,8 \cdot 10^{-11}$ 110
				kH_2O^d	$2,2 \cdot 10^{-11}$
19	$HO_2 + O_3$	\rightarrow	OH		$1,1 \cdot 10^{-14}$ -500
20	$OH + O_3$	\rightarrow	HO_2		$1,6 \cdot 10^{-12}$ -940
21	$H_2 + OH$	\rightarrow	HO_2		$5,5 \cdot 10^{-12}$ -2000
22	$HO_2 + OH$	\rightarrow			$4,8 \cdot 10^{-11}$ 250
23	$HO_2 + HO_2$	\rightarrow	H_2O_2	b	
24	$H_2O_2 + OH$	\rightarrow	HO_2		$2,9 \cdot 10^{-12}$ -160
25	H_2O_2	$\xrightarrow{h\nu}$	$2OH$	RJ.8	
Hemijske reakcije vezane za ciklus metana					
26	CH_4+OH	\rightarrow	CH_3O_2		$2,65 \cdot 10^{-12}$ -1800
27	CH_3O_2+NO	\rightarrow	$CH_2O+HO_2+NO_2$		$4,2 \cdot 10^{-12}$ 180
28	$CH_3O_2+HO_2$	\rightarrow	CH_3O_2H		$3,8 \cdot 10^{-13}$ 800
29	CH_3O_2+ CH_3O	\rightarrow	$1.33CH_2O+0.67HO_2$		$2,5 \cdot 10^{-13}$ 190
30	CH_3O_2H+OH	\rightarrow	$0.7CH_3O_2+0.3CH_2O+0.3OH$		$3,8 \cdot 10^{-12}$ 200
31	CH_3O_2H	$\xrightarrow{h\nu}$	CH_2O+HO_2+OH	RJ.9	
32	CH_2O	$\xrightarrow{h\nu}$	$2 HO_2+CO$	RJ.10	
33	CH_2O	$\xrightarrow{h\nu}$	CO	RJ.11	
34	CH_2O+OH	\rightarrow	HO_2+CO		$1,1 \cdot 10^{-11}$

35	CH ₂ O+NO ₃	→	HNO ₃ + HO ₂ +CO		5,8 · 10 ⁻¹⁶	
36	CO+OH	→	HO ₂		1,5 · 10 ⁻¹³	(1+0,6P _{atm})
Nemetanski ugljovodnici						
37	ALD ₂ +OH	→	HO ₂		7,0 · 10 ⁻¹²	250
38	ALD ₂ +NO ₃	→	C ₂ O ₃ +HNO ₃		2,5 · 10 ⁻¹⁵	
39	ALD ₂	$\xrightarrow{h\nu}$	CH ₂ O +XO ₂ +CO+2HO ₂	RJ.12		
40	C ₂ O ₃ +NO	→	CH ₂ O +XO ₂ + HO ₂ +NO ₂		3,5 · 10 ⁻¹⁰	-180
41	C ₂ O ₃ +NO ₂	→	PAN	k ₀ k _∞	2,6 · 10 ⁻²⁸ 1,2 · 10 ⁻¹¹	-7,9
42	PAN	→	C ₂ O ₃ + NO ₂		2,0 · 10 ⁻¹⁶	0,9
43	PAN	$\xrightarrow{h\nu}$	C ₂ O ₃ + NO ₂	RJ.13		-13500
44	C ₂ O ₃ + C ₂ O ₃	→	2CH ₂ O +2XO ₂ +2 HO ₂		2,0 · 10 ⁻¹²	
45	C ₂ O ₃ +HO ₂	→	CH ₂ O+XO ₂ + HO ₂ +0.79OH+0.21ROOH		6,5 · 10 ⁻¹²	
46	PAR+OH	→	0.87XO ₂ +0.76ROR+0.13XO ₂ N +0.11 HO ₂ +0.11ALD ₂ +0.11RXPAR		8,1 · 10 ⁻¹³	
47	ROR	→	1.1ALD ₂ +0.96XO ₂ +0.94HO ₂ +2.1RXPAR		1,0 · 10 ⁻¹⁵	-8000
48	ROR	→	HO ₂		1.6 · 10 ³	
49	OLE+OH	→	CH ₂ O +ALD ₂ +XO ₂ + HO ₂ +RXPAR		5,2 · 10 ⁻¹²	504
50	OLE+O ₃	→	0.44ALD ₂ +0.64CH ₂ O +0.37CO +0.25HO ₂ +0.29XO ₂ +0.40H +0.9RXPAR		4,33 · 10 ⁻¹⁵	-1800
51	OLE+NO ₃	→	0.91XO ₂ + CH ₂ O + ALD ₂ +0.09XO ₂ N+NO ₂ +RXPAR		7,7 · 10 ⁻¹⁵	
52	ETH+OH	\xrightarrow{M}	XO ₂ + HO ₂ + 1.56CH ₂ O +0.22ALD ₂	k ₀ k _∞	1,0 · 10 ⁻²⁸ 8,8 · 10 ⁻¹²	0,8
53	ETH+O ₃	→	CH ₂ O+0.43CO+0.26HO ₂ +0.12OH		9,1 · 10 ⁻¹⁵	-2580
54	MGLY+OH	→	XO ₂ + C ₂ O ₃		1,7 · 10 ⁻¹¹	

55	MGLY	$h\nu$ →	$C_2O_3+HO_2+CO$	RJ.14		
56	ISOP+OH	→	0.85XO ₂ +0.61CH ₂ O +0.85HO ₂ +0.03MGLY+0.58OLE +0.15XO ₂ N+0.63PAR		$2,54 \cdot 10^{-11}$	410
57	ISOP+O ₃	→	0.9 CH ₂ O +0.55OLE+0.18XO ₂ +0.36CO+0.15C ₂ O ₃ +0.03MG LY +0.63 PAR +0.30HO ₂ +0.280 H		$12,3 \cdot 10^{-15}$	-2013
58	ISOP+NO ₃	→	0.9HO ₂ +0.9ORGNIT+0.03CH ₂ O +0.45OLE+0.12ALD+0.1NO ₂ +0.08MGLY		$7,8 \cdot 10^{-13}$	
59	ROOH	$h\nu$ →	OH			kao CH ₃ O ₂ H
60	ROOH+OH	→	0.7XO ₂ +0.3OH		$3 \cdot 10^{-12}$	
61	ORGNIT+OH	→	NO ₂ +XO ₂		$1,78 \cdot 10^{-12}$	
62	ORGNIT	$h\nu$ →	NO ₂ +HO ₂	RJ.15		
Literatura			Houweling et al. (1998)			

DODATAK B

Tabela B.1 Vrednosti srednje kvadratne greške (ν), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti temperature (T_c) i relativne vlažnosti vazduha (R_{hc}) unutar biljnog sklopa na lokalitetu HF-EMS.

HF-EMS Dani	T_c (°C)			R_{hc}		
	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o
1	1.94	4.8	4.95	0.07	0.13	0.16
2	1.39	3.32	2.47	0.06	0.1	0.07
3	2.2	4.21	2.71	0.05	0.19	0.16
4	1.35	2.94	2.06	0.05	0.12	0.09
5	0.71	2.13	1.82	0.04	0.16	0.16
6	1.53	3.27	2.07	0.04	0.11	0.11
7	1.71	4.03	3.17	0.04	0.11	0.1
8	1.63	4.34	3.46	0.04	0.15	0.15
9	1.83	4.43	3.37	0.06	0.19	0.17
10	1.8	4.28	3.06	0.06	0.17	0.13
11	0.89	2.14	1.72	0.04	0.04	0.02
12	0.95	2.3	1.93	0.05	0.07	0.07
13	0.7	1.62	1.28	0.04	0.04	0.03
14	2.08	5.38	4.17	0.05	0.16	0.15
15	1.57	3.74	2.72	0.05	0.12	0.11
16	1.53	5.04	3.89	0.05	0.19	0.18
17	1.92	5.67	4.17	0.05	0.12	0.14
18	1.53	4.05	2.69	0.05	0.13	0.11
19	1.27	4.36	3.26	0.04	0.11	0.09
20	1.29	3.82	2.84	0.06	0.14	0.1
21	0.82	1.07	1	0.06	0.02	0.01
22	0.73	2.47	1.89	0.04	0.09	0.07
23	1.37	5.01	4.21	0.07	0.16	0.17
24	1.53	4.28	3.42	0.08	0.14	0.12
25	1.88	4.95	3.62	0.06	0.16	0.13
26	1.26	3.98	3.12	0.05	0.12	0.1
27	1.17	3.53	2.72	0.06	0.11	0.08
28	1.25	4.76	3.89	0.04	0.15	0.13
29	1.79	5.16	3.59	0.04	0.13	0.12
30	1.97	5.85	4.47	0.06	0.09	0.08

Tabela B.2 Vrednosti srednje kvadratne greške (ν), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} na lokalitetu ABR-RJ.

ABR-RJ Dani	H ($W\ m^{-2}$)			λE ($W\ m^{-2}$)			R_{neto} ($W\ m^{-2}$)		
	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o
1	66.49	108.99	157.59	40.91	76.94	44.75	21.31	213.53	227.55
2	58.63	114.84	160.81	29.42	71.14	46.88	21.81	215.2	229.33
3	43.82	138.07	171.15	27.84	60.28	44.52	17.65	226.18	239.52
4	49.6	100.62	140.59	29.21	69.11	47.56	17.3	197.2	209.29
5	31.66	101.98	110.54	19.81	35.36	40.08	20.9	158.05	166.11
6	38.74	126.11	139.97	22.63	51.73	42.7	20.17	200.44	207.98
7	40.18	123.31	129.83	32.19	50.81	60.53	23.26	199.88	210
8	35.89	41.85	64.18	18.43	16.01	10.2	20.18	66.88	72.38

Tabela B.3 Vrednosti srednje kvadratne greške (ν), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} na lokalitetu NSA-OBS.

NSA-OB Dani	H ($W\ m^{-2}$)			λE ($W\ m^{-2}$)			R_{neto} ($W\ m^{-2}$)		
	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o
1	16.29	16.71	4.52	37.89	11.8	8.19	15.69	23.21	27.48
2	25.37	62.71	57.6	33.51	106.56	109.13	33.88	188.78	203.79
3	61.48	75.02	64.28	92.26	132.05	159.27	58.02	229	276.61
4	66.96	67.56	53.53	91.03	138.11	161.85	36.39	229.32	261.85
5	54.41	76.13	47.32	106.73	119.54	142.54	41.87	205.61	241.95
6	54.35	64.26	49.77	95.69	141	180.98	55.78	225.49	277.07
7	41.44	58.84	75.55	34.26	149.46	142.62	33.75	234.1	262.28
8	51.57	67.38	64.49	79.86	99.63	141	56.44	182.92	233.94
9	29.67	51.88	49.3	56.05	127.42	150.45	44.15	202.89	243.87
10	44.48	51.68	29.29	49.92	47.01	47.02	11.93	67.93	78.24
11	125.23	97.51	66.97	166.22	74.25	129.97	24.24	165.13	184.97
12	99.83	78.43	66.81	96.28	112.48	135.22	32.67	190.32	220.75
13	32.08	19.98	18.65	35.52	31.01	32.7	17.54	44.57	57.9
14	29.8	22.17	39.74	29.61	33.23	29.04	25.45	55.94	65.96
15	41.98	55.86	55.13	113.86	113.22	154.89	39.73	185.87	209.88
16	55.78	45.95	49.97	120.1	140.85	180.75	39.74	205.82	236.45
17	38.43	54.64	45.52	70.71	153.28	179.35	35.5	239.12	263.99
18	42.87	44.37	39.89	58.55	74.72	81.43	25.68	130.55	152.27
19	39.65	56.21	53.19	79.13	130.16	169.46	37.79	212.21	241.88
20	44.72	52.11	47.15	50.88	108.16	124.13	20.55	176.73	193.85
21	17.34	36.85	30.15	28.7	76.25	82.32	20.91	128.08	144.65
22	51.24	72.11	77.67	88.87	138.5	188.05	37.95	231.24	254.62
23	53.4	88.12	84.47	115.78	95.84	171.74	27.64	199.8	222.54

Tabela B.4 Vrednosti srednje kvadratne greške (ν), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} na lokalitetu SSA-OA.

SSA-OA Dani	H (W m^{-2})			λE (W m^{-2})			R_{neto} (W m^{-2})		
	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o
1	101.25	108.5	168.35	66.72	108.32	64.9	38.86	244.77	271.65
2	55.2	89.69	123.7	82.36	124.45	64.1	48.11	248.87	291.16
3	72.2	82.52	115.82	64.33	93.5	56.45	35.42	192.91	207.52
4	47.37	83.63	69.38	54.29	54.11	49.64	33.89	105.52	116.58
5	72.88	70.04	129.51	64.6	124.89	81.56	31.61	227.83	251.17
6	42.96	86.63	93.47	37.54	69.63	58.76	31.02	167.72	178.23
7	54.16	41.28	86.15	45.03	109.14	86.53	27.06	175.11	194.79
8	55.97	74.53	117.22	60.64	133	99.07	36.54	239.5	269.47
9	33.74	75.15	93.32	63.47	104.65	58.41	32.91	206.18	219.88
10	52.87	75.42	116.03	81.9	96.04	46.09	43.13	199.51	229.65
11	46.8	80.57	108.92	83.44	132.72	76.2	37.1	246.53	277.5
12	46.07	63.26	80.5	60.34	116.33	69.27	37.03	197.38	219.7
13	70.75	70.05	122.83	56.96	103.47	58.59	22.26	199.47	207.61
14	74.63	97.71	140.03	76.67	117.19	60.64	50	230.77	269.86
15	63.03	74.89	108.89	71.91	130.59	68.57	31.73	225.27	241.9
16	34.22	43.57	72.02	39.6	92.02	74.31	36.87	154.36	170.18
17	34.53	44.57	65.62	37.46	65.7	44.57	21.69	122.67	121.94
18	41.94	53.64	86.94	58.29	96.61	52.66	41	174.68	208.46
19	46.92	69.67	108.88	58.78	116.63	75.45	37.8	217.31	248.19
20	54.9	50.83	95.89	51.58	95.86	54.91	30.31	168.86	190.06
21	55.82	51.04	98.29	55.46	115.79	80.27	37.67	188.97	223.36
22	37.96	69.77	97.35	56.21	112.88	78.17	38.96	211.37	235.09
23	50.1	78.74	118.21	57.52	116.56	76.84	44.35	226.1	260.3
24	49.29	65.1	103.79	36.28	134.16	114.36	44.68	229.22	263.58
25	44.38	83.16	75.16	44.04	102.94	83	58.72	215.78	265.79
26	37.76	78.36	92.86	52.06	113.49	71.79	37.92	221.97	252.68
27	53.9	71.47	99.88	50.72	107.64	85.08	46.01	206.9	244.57
28	64.49	68.46	100.17	65.07	108.28	68.99	45.84	205.4	238.39
29	45.66	69.1	75.87	46.9	113.84	83.33	39.84	208.85	236.15
30	53.63	66.04	99.61	47.42	105.13	91.9	48.66	199.35	235.61
31	44.85	63.29	72.8	48.18	118.23	85.58	42.3	210.17	239.47

Tabela B.5 Vrednosti srednje kvadratne greške (ν), standardne devijacije modeliranih (σ_c) i osmotrenih (σ_o) vrednosti turbulentnih flukseva H , λE i R_{neto} na lokalitetu SSA-OA.

HF-EMS Dani	H ($W\ m^{-2}$)			λE ($W\ m^{-2}$)			R_{neto} ($W\ m^{-2}$)		
	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o	ν	σ_c	σ_o
1	45.35	107.33	130.46	22.85	94.42	88.05	51.34	229.35	279.67
2	83.78	76.5	66.5	30.48	83.47	71.66	37.51	175.16	204.52
3	81.96	123.83	168.33	18.41	89.47	85.03	60.43	245.37	304.98
4	59.83	77.01	65.94	13.53	52.16	50.64	31.92	149.6	174.58
5	81.1	79.73	150.98	24.55	46.64	34.96	37.67	146	181.52
6	62.63	85.92	146.33	20.49	77.16	77.2	42.28	187.22	227.66
7	47.7	95.77	136.21	19.24	86.63	89.73	52.51	208.8	260.89
8	43.55	92.95	108.47	23.37	53.37	43.79	43.53	170.4	213.12
9	48.53	117.37	137.73	18.59	81.91	83.06	51.99	227.79	278.34
10	39.36	111.3	128.23	11.94	87.8	87.13	56.01	231.56	285.83
11	66.97	60.77	40.84	10.26	24.1	24.08	28.24	93.59	114.09
12	51.74	52.76	54.79	17.58	21.91	27.17	17.3	83.28	94.99
13	69.36	55.8	33.89	16.03	23.25	28.35	20.92	90.97	101.84
14	69.74	139.06	134.43	15.86	71	79.45	45.82	239.54	282.78
15	59.88	90.45	89.97	12.54	45.12	48.2	35.89	155.37	187
16	61.07	144.67	169.05	36	73.75	74.11	44.86	250.93	294.71
17	69.41	135.8	145.83	21.32	65.56	57.84	46.63	233.88	278.97
18	62.62	120.36	119.42	25.12	75.08	72.83	43.79	224.94	266.48
19	62.57	95.03	84.16	26.9	59.88	58.96	38.22	180.62	217.1
20	56.77	104.48	88.66	21.39	53.65	63.82	35.21	183.7	217.02
21	59.34	23.4	7.05	15.43	14.56	21.62	16.82	30.97	37.59
22	40.92	66.77	72.11	38.61	30.02	55.3	30.42	111.35	138.63
23	71.16	172.21	173.03	135.02	56.37	118.01	53.69	251.75	303.74
24	105.4	147.75	102.19	58.95	81.36	68.72	45	223.98	267.56
25	68.24	136.22	121.42	12.94	68.48	73.51	49.95	237.16	286.06
26	73.9	116.81	97.01	23	63.33	74.03	41.23	206.73	245.89
27	77.5	97.45	66.11	24	65.15	65.48	27.9	170.28	193.14
28	74.84	136.97	138.85	25.93	65.02	76.35	37.33	231.84	267.7
29	62.13	123.55	160.75	30.59	72.43	72.66	42.21	224.31	265.31
30	70.61	121.44	166.05	29.73	69.08	60.94	50.43	222.86	271.06

LISTA SKRAĆENICA

ABR-RJ	tropska šuma Reserva Jaru u okviru ABRACOS projekta
ATP	adenozin trifosfat
bh-s	prostor između tla i visine donje baze krošnje
BS	biljni sklop
CBMIV	metod spajanja ugljeničkih vrsta (eng. Carbon-Bond lumping Method)
CFC	hlorofluorougljovodonici
FvCB	model fotosinteze predložen od strane Farquhar, von Caemmerer and Berry (1980)
GPP	ukupna primarna produkcija (eng. Grose Primary Production)
GSB	gasovi staklene bašte
h-bh	prostor između donje baze krošnje i srednje visine biljnog sklopa
HF-EMS	mešovita listopadna šuma u okviru Harvard Forest (eng. Harvard Forest - Environmental Measurement Site)
K-teorija	Hipoteza koeficijenata razmene
LAD	vertikalna distribucija gustine biljnog sklopa (eng. Leaf Area Density)
LAI	indeks lisne površine (eng. Leaf Area Index)
LAPS	naziv površinske sheme (eng. Land-Air Parameterization Sheme)
$LM_{LAD(z)}$	Lalić&Mihailović model LAD(z)
MACR	metakrolein
MLC-Chem	naziv površinske sheme (eng. Multi-Layer Canopy exchange model)
MLC-LAPS	kaplovana MLC-Chem i LAPS shema
MPAN	metil peroksiacetil nitrata
MVK	metil vinil keton
NADPH	nikotinamid adenin dinukleotid fosfat
NBE	neto razmena između binoma (eng. Net Biome Exchange)
NBP	neto produkcija binoma (eng. Net Biome Production)
NEE	neto razmena između ekosistema (eng. Net Ecosystem Exchange)
NPP	neto primarna produkcija (eng. Net Primary Production)
NSA-OBS	smrekova šuma u okviru BOREAS projekta (eng. Northern Study Area Old Black Spruce)
PAN	peroksiacetil nitrat
PAR	fotosintetski aktivno zračenje (eng. Photosynthetic Active Radiation)
PFT	tipovi vegetacije (eng. Plant Functional Types)
PGS	planetarni granični sloj
PS	površinski sloj
RD	tropska šuma Reserva Duche u okviru ABRACOS projekta
r-h	prostor između referentnog nivoa i srednje visine biljnog sklopa
RJ	tropska šuma Reserva Jaru u okviru ABRACOS projekta
SA	slobodna atmosfera
SS	postupak skaliranja predložen od strane de Pury and Farquhar (1997)
SSA-OA	jasikova šuma u okviru BOREAS projekta (eng. South Study Area Old Aspen)
SSL	postupak skaliranja predložen od strane Firanj et al. (2014)
SVAT	površinske sheme (eng. Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer)

$TT_{LAD(z)}$	Teske&Tisle model LAD(z)
VOC	isparljiva organska jedinjenja (eng. Volatile Organic Compounds)
VP	viskozni podsloj

LISTA HEMIJSKIH SIMBOLA

Ar	argon	HNO ₃	azotna kiselina
C ₅ H ₈	izopren	HNO ₄	peroksiazotna kiselina
C ₆ H ₁₂ O ₆	glukoza	HO ₂ [•]	hidroperoksi radikal
CH ₂ O	formaldehid	N ₂	azot
CH ₃ C(O)O ₂ NO ₂	peroksiacetil-nitrat	N ₂ O	azot-suboksid
CH ₃ CH ₃ S	dimetil-sulfid	N ₂ O ₅	azot-pentoksid
CH ₃ CHO	acetaldehid	Ne	neon
CH ₃ O	metoksi	NO	azot-monoksid
CH ₃ O ₂	metil-hidroperoksid	NO ₂	azot-dioksid
CH ₃ OOH	sirćetna kiselina	NO ₂ ⁻	nitriti
CH ₄	metan	NO ₃ ⁻	nitрати
CO	ugljen-monoksid	NO _x	grupna koncentracija NO + NO ₂
CO ₂	ugljen-dioksid	NO _y	grupna koncentracija NO, NO ₂ , HNO ₄ , NO ₃ ⁻ , N ₂ O ₅ , MPAN, HNO ₃
CS ₂	ugljenik-sulfid	O	atomski kiseonik
H	atomski vodonik	O ₂	kiseonik
H ₂ O	voda	O ₃	ozon
H ₂ O _(g)	vodena para	OCS	karbonil-sulfid
H ₂ S	vodonik-sulfid	OH [•]	hidroksilni radikal
He	helijum	SO ₂	sumpor-dioksid
HNO ₂	azotasta kiselina		

LISTA SIMBOLA

<i>A</i>	ukupna asimilacija bez uzimanja u obzir fotorespiracije
<i>a</i>	empirijska konstanta (jednačina 4.24)
<i>A_c</i>	limit intenzitetu fotosinteze od strane usvajnja CO ₂
<i>A_d</i>	empirijski koeficijenti karakteristični za suva zemljišta
<i>A_j</i>	limit intenzitetu fotosinteze od strane RuBP
<i>A_n</i>	neto asimilacija (intenzitet fotosinteze)
<i>A_s</i>	limit intenzitetu fotosinteze od strane transporta produkata
<i>A_w</i>	empirijski koeficijenti karakteristični za vlažna zemljišta
<i>b</i>	empirijska konstanta (jednačina 4.24)
<i>c</i>	empirijska konstanta (jednačina 4.24)
<i>C</i>	koncentracija inertne ili reaktivne supstance

C^*	karakterističan razmer za koncentraciju inertne supstance	
C_a	koncentracija supstance na referentnom nivou	
c_A	koncentracija reaktanta A	
c_B	koncentracija reaktanta B	
C_d	koeficijent trenja lišća	
c_F	koncentracija produkta reakcije F	
C_f	toplotni kapacitet biljnog sklopa	
C_g	toplotni kapacitet zemljišta	
C_i	koncentracija unutar lista	
C_r	koncentracija supstance na receptoru	
CRF	redukциони faktor biljnog sklopa koji opisuje efikasnost oksidacije NO u NO ₂ koji se uklanja suvom depozicijom	
C_s	koncentracija CO ₂ na listu	
d	visina ravni nultog pomeranja	
D	koeficijent difuzije molekula	
d	parametar (jednačina 4.24)	
D_a	deficit zasićenosti vodene pare u vazduhu	
D_b	Damkelerov broj	
D_{CO_2}	koeficijent molekularne difuzije CO ₂ u vazduhu	
D_{H_2O}	koeficijent molekularne difuzije vodene pare u vazduhu	
D_i	debljina i -tog sloja zemljišta	
D_X	koeficijent molekularne difuzije gasa X u vazduhu	
e	faktor konverzije	
E	intenzitet transpiracije	
e^*	maksimalan pritisak vodene pare na određenoj temperaturi	
E_0	temperaturna osetljivost	-46,02°C
E_a	energija aktivacije	
e_a	pritisak vodene pare u vazduhu	
E_a^*	saturacioni pritisak vodene pare izvan lista	
E_{list}	transporacija na nivou lista	
e_s^*	saturacioni pritisak vodene pare unutar lista	
E_{tf}	izgubljen deo vode u procesu transpiracije iz određenog sloja tla	
E_{wf}	brzina isparavanja vode sa mokre površine listova	
f	Koriolisov parametar	
$F(w_s)$	količina vlage u zemljištu na dubini korenovog sistema	
$f(z)$	bezdimezionna funkcija	
f_0	faktor reaktivnosti	0-1
F_1	zavisnost stomatarnog otpora od intenziteta zračenja - Džarisov algoritam	
F_2	zavisnost stomatarnog otpora od vlažnosti zemljišta - Džarisov algoritam	
F_3	zavisnost stomatarnog otpora od vlažnosti vazduha - Džarisov algoritam	

F_4	zavisnost stomatarnog otpora od temperature vazduha - Džarisov algoritam	
F_d	turbulentni fluks suve depozicije	
F_{dtr}	zapreminska sila trenja	
F_{emis}	fluks emisija	
f_{NO}	turbulentni fluks NO	
F_{NO}	emisija NO iz zemljišta	
f_s	procenat apsorbovanog zračenja	
f_{sha}	raspodela osenčenih listova	
$f_{snow/ice}$	površina pod snegom i ledom	
f_{soil}	površina pod golim zemljištem	
f_{sun}	raspodela osunčanih listova	
F_t	intenzitet zračenja na gornjoj granici biljnog sklopa	
F_{turb}	turbulentni fluks trasera	
f_{veg}	površina pod vegetacijom	
f_{ws}	površina prekrivena vodom	
g	ubrzanje sile Zemljine teže	9,81 m s ⁻²
G	fluks toplote u podlogu	
g_0	vrednost provodnosti kada je intenzitet fotosinteze A jednak nuli	0,01 m s ⁻¹
g_c	provodnost kroz površinski sloj i stomu	
g_m	provodnost mezofila	
g_s	provodnost CO ₂ kroz stomu	
g_v	provodnost vodene pare kroz stomu	
h	visina vegetacije, biljnog sklopa	
H	fluks osetne toplote	
H^*	Henrijeva konstanta	
I	intenzitet zračenja	
$I(\lambda)$	fluks sunčevog zračenja	
I_{beam}	intenzitet direktnog sunčevog zračenja	
I_{diff}	intenzitet difuznog sunčevog zračenja	
I_h	intenzitet zračenja na vrhu vegetacije	
I_{nl}	intenzitet zračenja koji je potreban da bi započeo proces fotosinteze	100 W m ⁻²
I_{sca}	intenzitet rasejanog sunčevog zračenja	
I_{sha}	intenzitet zračenja koje apsorbuju osenčeni listovi	
I_{sun}	intenzitet zračenja koje apsorbuju osunčani listovi	
J	stopa transporta elektrona u elektron-transportnom lancu	
J_i	brzina fotohemijske reakcije	
J_{max}	maksimalna brzina elektron-transportnog lanca	
k	fon Karmanova konstanta	
k'	koeficijent transmitivnosti	
k_1, k_2	konstanta brzine hemijske reakcije	
k_b	koeficijent ekstinkcije direktnog sunčevog zračenja	0,46/cos θ

K_c	koeficijent turbulentnog transporta inertne supstance u vazduhu	
k_c	koeficijent (jednačina 3.4)	
K_{car}	Mihaels-Mentenine konstanta za reakciju karboksilacije	
K_{CO_2}	koeficijent turbulentnog transporta CO ₂ u vazduhu	
K_{cx}	koeficijent turbulentne difuzije polutanta u x pravcu	
K_{cy}	koeficijent turbulentne difuzije polutanta u y pravcu	
K_{cz}	koeficijent turbulentne difuzije polutanta u z pravcu	
k_d	koeficijent ekstinkcije difuznog sunčevog zračenja	0,719
K_h	koeficijent turbulentnog transporta toplote u vazduhu	
K_m	koeficijent turbulentnog transporta količine kretnja u vazduhu	
K_m	Efektivna Mihaels-Mentenina konstanta	
k_n	koeficijent stope raspada azota	0,3
K_{NO_y}	koeficijent turbulentnog transporta NO _y u vazduhu	
K_o	Mihaels-Mentenine konstante za reakcije oksigeneze	
K_q	koeficijent turbulentnog vodene pare u vazduhu	
k_r	koeficijent provodnost sredine	
k_s	koeficijent ekstinkcije rasejanog sunčevog zračenja	0,46/cos θ
K_s	koeficijent turbulentnog transporta veličine S u vazduhu	
k_{T1}	brzina hemijske reakcije na temperaturi T1	
k_{T2}	brzina hemijske reakcije na temperaturi T2	
L	Monin-Obuhovljeva dužina	
$LAD(z)$	vertikalna raspodela gustine biljnog sklopa	
LAI_{sha}	indeks lisne površine osenčenih listova	
LAI_{sun}	indeks lisne površine osunčanih listova	
L_c	kumulativni LAI	
L_m	maksimalna gustina biljnog sklopa	
m	empirijska konstanta (jednačina 3.30)	0,9
M_{xt}	karakterističan razmer za x-komponentu količine kretanja	
n	statistički parametar	
N	broj merenja	
N_h	koncentracija azota u listovima na vrhu biljnog sklopa	
p	atmosferski pritisak	
P	stepen produkcije	
P_1	brzina infiltracije padavina u gornji sloj tla	
P_{chem}	hemijska konverzija	
P_f	brzina zadržavanja padavina u biljnom sklopu	
P_{ra}	Prandtlov turbulentni broj	
P_u	faktor pulsiranja fluksa NO _x iz zemljišta	
q	specifična vlažnost vazduha	
q^*	karakterističan razmer za specifičnu vlažnost vazduha	
r	koeficijent otpornosti sredine	
R	univerzalna gasna konstanta	8,314 J mol ⁻¹ K ⁻¹
r	koeficijent korelacije	

r_2	koeficijent determinacije	
r_a	otpor vazduha između referentnog nivoa i biljnog sklopa - aerodinamički otpor	
r_b	rezultujući otpor vegetacije	
r_{cdif}	ukupan otpor difuziji	
R_d	fluks dugotalasnog zračenja apsorbovan na vegetaciji i tlu	
R_{dan}	intenzitet fotorespiracije	
r_g	otpor vazduha između biljnog sklopa i tla	
r_h	relativna vlažnost vazduha	
R_{hc}	relativna vlažnost vazduha unutar biljnog sklopa	
R_i	Ričardsonov (Richardson) broj	
r_k	kutikularni otpor	
R_k	fluks kratkotalasnog zračenja apsorbovan na vegetaciji i tlu	
$r_{k,X}$	kutikularni otpor difuziji gasa X	
r_{konv}	otpor konvekciji unutar biljnog sklopa	
r_l	otpor vazduha na listu - receptoru	
r_m	otornost mezofila	
R_{net}	apsorbovani fluks kratkotalasnog i dugotalasnog zračenja	
r_p	otpor listova, grana i ostalih izloženih površina	
R_{ref}	nivo respiracije na referentnoj temperaturi	
r_s	stomatarni otpor	
$r_{s,max}$	maksimalna vrednost stomatarnog otpora	5000 s m ⁻¹
r_{tlo}	otpor na površini tla ili stelje	
r_{veg}	otpor vegetacije čiji je uzrok gustina i visina biljnog sklopa	
S	visina ili pređeni put	
$S_{c/o}$	afiniteta Rubiska prema u CO ₂ u odnosu na O ₂	
S_{cz}	intenzitet izvora ili ponora polutanta (gasa, čestica)	
t	vreme	
T	apsolutna temperatura	
T_0	parametar respiracije koji uzima vrednost	
T_c	temperatura vazduha unutar biljnog sklopa	
T_d	temperatura dubljeg sloja zemljišta	
T_f	temperatura lista	
T_g	temperatura površine zemljišta	
T_{obs}	osmotrena temperatura zemljišta	
T_r	referentna temperatura	
T_{ref}	referentna temperatura respiracije	10°C
u	x (zonalna) komponenta brzine vetra	
u^*	brzina trenja	
u_c	x komponenta brzine vetra unutar vegetacije	
v	y komponenta brzine vetra	
v_A	brzina hemijske reakcije u odnosu na reaktant A	
v_B	brzina hemijske reakcije u odnosu na reaktant B	

V_c	intenzitet karboksilacije
V_{cmax}	visina asimilacije prilikom saturacione koncentracije CO ₂
v_d	brzina suve depozicije
v_F	brzina hemijske reakcije u odnosu na proizvod reakcije F
v_h	brzina hemijske reakcije
V_o	intenzitet oksigeneze
w	z komponenta brzine vetra
$w_{[CO_2]}$	turbulentni fluks CO ₂ u pravcu z ose
$w_{[NO_y]}$	turbulentni fluks familije NO _y jedinjenaj u z - pravcu
w_2	količina vode na dubini od 1 m
w_A	koncentracija vodene pare u vazduhu
w_{A0}	turbulentni fluks veličine A u z - pravcu
w_{CO}	turbulentni fluks inertne supstance u z - pravcu
W_f	deo površine vegetacije koji je pokriven vodom
w_i	koncentracija vodene pare u listu
w_i	zapreminski sadržaj vode u <i>i</i> -tom sloju tla
w_{q0}	turbulentni fluks specifične vlažnosti u z - pravcu
w_s	maksimalna vrednost zapreminske vlažnosti zemljišta
w_u	turbulentni fluks x-komponente količine kretanja u z - pravcu
w_{ve}	tačka venjenja
$w_{\theta 0}$	turbulentni fluks toplote u z - pravcu
X_c	izračunate vrednosti veličine X
X_o	izmerene vrednosti veličine X
z	visina
z_0	visina hrapavosti
z_b	visina donje baze krošnje
z_k	visina ukupnog LAIk
z_m	visina L_m
α	parametar koji opisuje gustinu vegetacionog pokrivača
β	faktor prigušenja brzine vetra unutar biljnog sklopa
γ	psihrometerska konstanta
δ	nagib terena
ΔH	rezlika u entalpiji
ζ	bezdimenzioni dužinski razmer
θ	potencijalna temperatura
ϑ	zenitni ugao
θ^*	karakterističan razmer za potencijalnu temperaturu
θ_0	referentna temperatura
λ	talasna dužina
Λ	implicitni koeficijent razlaganja
λ	latentna toplota isparavanja
λE	fluks latentne toplote
$\mu(z)$	karakteristika sredine kroz koju se zračenje prostire

v	srednje kvadratno odstupanje
ρ	gustina vazduha
σ	konstanta proporcionalnosti
σ_c	standardne devijacija izračunatih vrednosti
σ_o	standardne devijacija osmotrenih vrednosti
$\sigma_x(\lambda)$	poprečni presek za apsorpciju
τ	napon smicanja
τ_{diff}	vreme transporta difuzijom
τ_{hem}	vreme odigravanja reakcije
τ_{turb}	vreme transporta turbulentnim vrtlozima
ϕ	kvantni prinos
χ_n	koeficijent proporcionalnosti (jednačina 3.45)
Γ^*	tačka kompenzacije CO ₂ u odsustvu fotorespiracije