УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ

METEOROLOGIJA I KLIMATOLOGIJA ZA AGRONOME

Branislava Lalić, Jozef Ejcinger,
Ana Dalamarta, Simone Orlandini,
Ana Firanj Sremac, Bernard Paher

1

BRANISLAVA LALIĆ
JOZEF EJCINGER
ANA DALAMARTA
SIMONE ORLANDINI
ANA FIRANJ SREMAC
BERNARD PAHER

METEOROLOGIJA I KLIMATOLOGIJA ZA AGRONOME

Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet Novi Sad
Novi Sad, 2021.

EDICIJA OSNOVNI UDŽBENIK

Osnivač i izdavač edicije
Poljoprivredni fakultet, Novi Sad,
Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad

Glavni i odgovorni urednik edicije
prof. dr Nedeljko Tica, redovni profesor
Dekan Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu

Članovi komisije za izdavačku delatnost
dr Ljiljana Nešić, vanredni profesor, predsednik
dr Branislav Vlahović, redovni profesor, član
dr Milica Rajić, redovni profesor, član
dr Nada Plavša, vanredni profesor, član

REČ ZAHVALNOSTI

Zahvaljujemo se brojnim kolegama i saradnicima koji su na različite načine doprineli najpre engleskom a zatim i srpskom izdanju udžbenika *Meteorologija i klimatologija za agronome*. Posebnu zahvalnost dugujemo recenzentima srpskog izdanja: prof. Rudolfu Kastoriju, čije je znanje i iskustvo donelo brojne korisne primedbe koje su unapredile tekst i otklonile nejasnoće, prof. Ružici Stričević, čije je „oštro“ oko uočilo i neusklađenosti u tekstu i tehničke greške koje su potom otklonjene, i dr Nenadu Aleksiću, koji je bio oštar kritičar ali uvek spreman za diskusiju o konceptu i sadržaju udžbenika – naročito kada se radi o njegovih prvih šest poglavlja. Zahvaljujemo se Inji Firanj na dizajnu brojnih ilustracija koje su obogatile knjigu i Ivani Koči na pažljivom čitanju, lekturi i korekturi. Na kraju, zahvaljujemo se Vladimiru Kočiju, koji je pročitao knjigu očima devetnaestogodišnjaka i stavio brojne primedbe iz ugla onih kojima je ovo štivo i namenjeno.

PREDGOVOR SRPSKOM IZDANJU

Bilo je suđeno da ova knjiga bude napisana. Gotovo jedan vek su njeni autori proveli za katedrama svojih univerziteta. Više od petnaest godina zajedničkog rada i dugih diskusija o meteorološkom obrazovanju budućih agronoma pokušali smo da prenesemo na stranice knjige *Meteorologija i klimatologija za agronome*.

Ugledajući se na prethodnike i njihove udžbenike kojima se uvek vraćamo, sadržaj knjige odmerili smo tako da objašnjenje osnovnih meteoroloških elemenata i procesa, te meteorološka merenja i primena meteoroloških znanja u poljoprivredi budu ravnomerno zastupljeni. Naročita pažnja je posvećena uticaju biljaka na fizičke procese u atmosferi, ali i uticaju ovih procesa na biljke.

Nadamo se da će čitajući ovu knjigu buduće generacije agronoma naučiti da vremenske prilike doživljavaju kao partnerske, a ne kao protivničke okolnosti u poduhvatu za koji su se opredelili – da proizvedu što više zdravije hrane.

Srpsko izdanje udžbenika se unekoliko razlikuje od engleskog. Pojedine glave (od sedme do četrnaeste) prilagođene su planu i programu nastave na predmetu Meteorologija Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu. Takođe, napisane su i dve nove koje se odnose na klimatske karakteristike Srbije i očekivane efekte klimatskih promena na poljoprivrednu proizvodnju u našoj zemlji. Ove dve glave su obogaćene brojnim tabelama, po mnogo čemu jedinstvenim, te verujemo da će biti jedan od razloga zbog kojih će agronomi često posezati za ovim štivom.

Branislava Lalić

REZIME SRPSKOG IZDANJA

„Meteorologija i klimatologija za agronome" je udžbenik namenjen studentima koji meteorologiju i klimatologiju izučavaju na poljoprivrednom fakultetu, ali i studentima drugih fakulteta koji u svojim programima imaju kurseve Agrometeorologije i Agroklimatologije. Knjiga je, takođe, koristan izvor informacija za iskusne agronome i sve one koji su zainteresovani za uticaj vremena i klime na poljoprivredu.

U vremenu kada se saznanja u gotovo svim oblastima nauke eksponencijalno uvećavaju teško je zaokružiti knjigu. Zato smo odlučili da ovaj rukopis ne bude ograničen svojim koricama. Ono što se među njima nalazi čini samo jedan deo udžbenika. Drugi, jednako važan, pohranjen je u elektronskoj formi i sastoji se od brojnih numeričkih primera (https://serbiaforexcell.com/education/book/) i pomoćnog udžbenika pod naslovom „Agrometeorološko modeliranje – abiotički stres i produktivnost biljaka" u vidu dodatnog materijala za one koji žele da saznaju više. Ovako dizajniran udžbenik lako je dostupan čitaocu, a autorima ostavlja mogućnost stalnog unapređivanja.

Knjiga je podeljena na četiri dela: „Osnovni pojmovi", „Primena", „Agrometeorološka merenja i numerički primeri" i „Klimatske karakteristike Srbije".

Prvi deo, „Osnovni pojmovi", posvećen je najznačajnijim atmosferskim procesima – njihovim uzrocima i posledicama. Sastav atmosfere, karakteristike podloge i upadno Sunčevo zračenje određuju grejanje i hlađenje Zemljine površine, koji su, direktno ili indirektno, pokretači svih procesa koji određuju vreme i klimu. Zato je naročita pažnja posvećena interakciji između zemljišta, biljaka i atmosfere i uvek prisutnim povratnim spregama.

„Primena" znanja o meteorološkim pojavama i procesima od ključnog je značaja za buduće agronome. Ovo poglavlje je posvećeno uticaju vremena na fenologiju biljaka i štetnih organizama, na rast i razvoj useva, ali i efektima ekstremnih vremenskih pojava i upravljanju rizikom koji izazivaju.

Klima se menja, i to je realnost i u ovom delu sveta. Efekti njene promene mogu biti sagledani tek nakon nekoliko decenija, ali saznanje o njihovim, potencijalno štetnim, učincima i merama kojima se mogu ublažiti ili koje mogu pomoći da se bolje adaptiramo, jeste od suštinskog značaja za sve koji se bave poljoprivredom.

„Agrometeorološka merenja i numerički primeri" trebalo bi da ohrabre čitaoce u primeni stečenih znanja prilikom rešavanja konkretnih problema vezanih za mikrometeorološke uslove u njihovim usevima i zasadima. Odličan prvi korak u tom pravcu predstavlja merenje meteoroloških elemenata (korišćenjem automatskih meteoroloških stanica) i osmatranje bioloških događaja. Znanja koja će steći u ovom delu knjige trebalo bi da im olakšaju organizaciju reprezentativnih merenja, obradu i tumačenje dobijenih rezultata. Naprednim korisnicima ponuđen je kratak uvod u daljinska i satelitska merenja i tumačanje ovako dobijenih rezultata za potrebe poljoprivrede.

Na kraju, „Klimatske karakteristike Srbije" pružaju sveobuhvatnu analizu temperaturnog i padavinskog režima kao i njihovog uticaja na poljoprivredu. U ovom delu poseban akcenat stavljen je na pojavu, intenzitet i karakteristike zabeleženih i očekivanih promena klime na teritoriji Srbije, kao i njihovog uticaja na promenu dinamike vegetacije, prinos i pojavu štetnih organizama.

SADRŽAJ

Osnove 11
1. Poreklo i sastav atmosfere 11
1.1. Atmosfera i Zemlja. 11
1.2. Uticaj sastava atmosfere na biljke. 17
2. Energetski bilans atmosfere 21
2.1. Kratkotalsno i dugotalasno zračnje u atmosferi 21
2.2. Energetski bilans 27
2.3. Uticaj zračenja na vegetaciju. 31
2.4. Uticaj vegetacije na zračenje 35
3. Temperatura zemljišta i vazduha 39
3.1. Toplota, termičke karakteristike tela i temperatura. 39
3.2. Zagrevanje i hlađenje zemljišta 41
3.3. Zagrevanje i hlađenje vazduha 43
3.4. Uticaj temperature zemljišta i vazduha na biljke 46
3.5. Uticaj vegetacije na temperaturu zemljišta i vazduha 54
4. Vlažnost vazduha 57
4.1. Elementi vlažnosti vazduha 57
4.2. Procesi koji čine vodni ciklus 60
4.3. Isparavanje i kondenzacija u atmosferi 62
4.4. Uticaj vlažnosti vazduha na biljke 64
4.5. Uticaj biljaka na vlažnost vazduha. 67
5. Oblaci i padavine. 73
5.1. Adijabatski procesi i atmosferska stabilnost. 73
5.2. Oblaci i njihovo formiranje 77
5.2.1. Niski oblaci. 79
5.2.2. Oblaci srednjeg sloja. 81
5.2.3. Visoki oblaci. 82
5.3. Rast kapi vode u oblacima 83

5.4. Hidrometeori . . . 86
5.4.1. Padavine . . . 86
5.4.2. Hidrometeori nastali depozicijom čestica . . . 91
5.4.3. Čestice nošene vetrom . . . 93
5.5. Uticaj oblaka i padavina na biljke . . . 94
5.6. Uticaj biljaka na oblake i padavine . . . 98
6. Atmosferska cirkulacija i vetrovi . . . 102
6.1. Sile koje dovode do atmosferskih kretanja . . . 102
6.2. Razmere atmosferskog kretanja . . . 104
6.2.1. Opšta cirkulacija atmosfere - globalni vetrovi . . . 105
6.2.2. Vetrovi sinoptičkih razmera . . . 107
6.2.3. Lokalni vetrovi . . . 108
6.2.4. Periodični vetrovi . . . 110
6.3. Uticaj vetra na biljke . . . 112
6.4 Uticaj biljaka na vetar . . . 113
7. Vodni bilans biljnog sklopa . . . 116
7.1. Komponente vodnog bilansa u sistemu biljka - zemljište . . . 116
7.2. Faktori koji određuju kretanja vode u zemljištu . . . 121
7.2.1. Kapacitet zemljišta za zadržavanje vode dostupne usevima . . . 122
7.3. Usvajanje vode iz zemljišta preko korenovog sistema . . . 124
7.4. Isparavanje zemljišta i transpiracija (evapotranspiracija) . . . 127
7.5. Osnovni pristupi proračunu vodnog bilansa zemljišta . . . 130

Primena . . . 133
8. Fenologija . . . 133
8.1. O fenologiji i njenom značaju . . . 133
8.2. Vegetacioni period i fenološke faze . . . 135
8.2.1. Klasifikacija fenofaza . . . 138
8.3. Fenologija štetočina i bolesti . . . 139
8.3.1. Procena razvoja useva i štetočina na osnovu fenoloških modela . . . 141
8.4. Uticaj niskih temperatura na fenologiju biljaka . . . 143
8.5. Fenologija useva kao važan izvor podataka za upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom . . . 146
8.6. Fenologija biljaka kao agroklimatski indikator . . . 150
9. Ekstremne vremenske prilike, uticaj na poljoprivredu i mere ublažavanja . 152
9.1. Suša . . . 152
9.1.1. Poljoprivredna suša . . . 153
9.2. Toplotni talasi . . . 159
9.2.1. Metodi zaštite od toplotnih talasa . . . 162

9.3. Mraz . . . 165
9.3.1. Vrste mraza i oštećenja koja izaziva . . . 165
9.3.2. Zaštita od mraza . . . 171
9.4. Oluje, grad i vetar . . . 176
9.4.1. Grad . . . 176
9.4.2. Vetar i oluje . . . 178
9.5. Poplave i obilne padavine . . . 184
9.6. Sistemi ranog upozoravanja u poljoprivredi . . . 188
10. Upravljanje rizicima . . . 192
10.1. Rizik . . . 193
10.2. Procena i upravljanje rizikom . . . 196
10.3. Adaptacija i ublažavanje . . . 196
11. Agrometeorološki modeli . . . 202
11.1. Pristupi modeliranju . . . 202
11.2. Tipovi modela . . . 204
11.3. Karakteristike modela biljne proizvodnje . . . 206
11.3.1. Struktura modela . . . 206
11.3.2. Ulazni podaci . . . 207
11.3.3. Simulacioni deo modela . . . 208
11.4. Kalibracija i validacija modela . . . 209
11.5. Osetljivost modela biljne proizvodnje na ekstremne vremenske uslove . . . 212
11.6. Primena modela biljne proizvodnje . . . 214
11.7. Modeliranje pojave bolesti i štetočina . . . 215
11.8. Agroklimatski i agrometeorološki indeksi . . . 220
12. Klima, klimatske promene i poljoprivreda . . . 223
12.1. Vreme i klima . . . 223
12.2. Klasifikacija i regionalizacija klime . . . 225
12.3. Klimatske promene . . . 231
12.4. Uticaj klimatskih promena na poljoprivredu . . . 239
12.5. Neodređenosti u studijama uticaja klimatskih promena na poljoprivredu . . . 248
12.6. Stručne procene kao dodatni izvor informacija . . . 249
12.7. Adaptacija poljoprivrede na klimatske promene . . . 251
12.8. Mere ublažavanja efekata klimatskih promena u poljoprivredi . . . 255

Agrometeorološka merenja . . . 259
13. Metode merenja u agrometeorologiji . . . 259
13.1. Osnovne tehnologije senzora . . . 259
13.2. Metode merenja . . . 260

14. Daljinska merenja u poljoprivredi 281
14.1. In situ i daljinska merenja 281
14.2. Upotreba satelitskih merenja u praćenju fenologije i dinamike vegetacije 284
14.3. Upotreba satelitskih merenja za procenu vlažnosti zemljišta 290
14.4. Primeri primene daljinskih merenja u poljoprivredi 291

Klimatske karakteristike Srbije 295
15. Klimatske karakteristike Srbije (temperaturni i padavinski režim) i njihov uticaj na poljoprivredu 295
15.1. Uvodne napomene 295
15.2. Promene temperaturnog režima u Srbiji 298
15.3. Učestalost dana s ekstremnim temperaturama vazduha 303
15.4. Promene akumulacije stepen-dana i njihov uticaj na dinamiku vegetacije 307
15.5. Promene padavinskog režima u Srbiji 310
15.6. Učestalost dana bez padavina 316
15.7. Dužina perioda bez mraza 317
16. Očekivane promene klime u Srbiji 319
16.1. Uvodne napomene 319
16.2. Očekivane promene temperaturnog režima 320
16.3. Očekivane promene učestalosti dana s ekstremnim temperaturama vazduha 323
16.4. Očekivane promene akumulacije stepen-dana i njihov uticaj na dinamiku vegetacije 329
16.5. Očekivane promene padavinskog režima u Srbiji 333
16.6. Očekivani uticaj klimatskih promena na dinamiku vegetacije i prinos 336
16.7. Očekivani uticaj klimatskih promena na pojavu nekih štetnih organizama 340

Numerički primeri 342

Dodatak 369

Literatura 389

Dodatna literatura 398

Registar pojmova 422

OSNOVE

1. Poreklo i sastav atmosfere

Priča o atmosferi, uzrocima i posledicama njenog sastava, stanja i ponašanja mora početi od samog nastanka atmosfere. Uzrok današnjeg sastava atmosfere treba tražiti u načinu na koji je nastala planeta Zemlja.

Zajedno sa dolazećim sunčevim zračenjem i karakteristikama Zemljine površine, sastav atmosfere je uzrok različitog grejanja i hlađenja površine Zemlje što je pokretačka sila gotovo svih atmosferskih procesa.

1.1. Atmosfera i Zemlja

Zemlja, naša planeta, je stvorena pre oko 4,5 milijardi godina. Puna vulkana i vrela, Zemlja se rotirala i hladila. U vulkanskim erupcijama emitovani su gasovi kao što su ugljen-dioksid, ugljen-monoksid, azotni oksidi i vodena para. Pored toga, neke komponente atmosfere, uključujući i vodenu paru, dolazile su na površinu planete tokom njenog bombardovanja od meteora i kometa. Nakon što je formirana čvrsta površina Zemlje, čija je temperatura pala ispod 100 °C, voda u tečnom stanju mogla je da se zadrži na Zemljinoj površini i incira nastajanje Svetskog okeana.

Prvi okean je bio jedino mesto na mladoj Zemlji na kome su mogli da se održe prvi oblici života. Na njegovom dnu pre otprilike 3,5 millijardi godina (ali sigurno ne manje od 2,7 milijardi) pojavile su se cianobakterije, odnosno modrozelene alge. One su bile prvi mikrooragnizmi koji su mogli da stvaraju kiseonik u procesu fotosinteze. Kao rezultat različitih geoloških i hemijskih procesa, kiseonik koji je stizao u tu prvu atmosferu dodatno je smanjivao intenzitet ultraljubičastog (UV) zračenja koje je dolazilo do površine okeana. To je pomoglo da prve forme života – nastale u okeanu – prežive u sve plićoj vodi, te su se tako uspinjale

ka njegovoj površini. Nakon oko 2 milijarde godina veoma sporog uzdizanja, prve biljke su se pojavile na kopnu pre oko 700 miliona godina.

Tabela 1.1.

Prosečni sastav „suve" atmosfere ispod 80 km visine (Barry and Chorley, 1998)

Komponenta	Simbol	% u zapremini	% u masi
Azot	N_2	78,08	75,51
Kiseonik	O_2	20,95	23,15
Argon	Ar	0,93	1,28
Međuzbir		99,96	99,94
Neon	Ne	0,0018	
Helijum	He	0,0005	
Kripton	Kr	0,0011	
Vodonik	H_2	0,00005	
Ksenon	Xe	0,00009	

Danas se zemljina atmosfera uglavnom sastoji od istih gasova kao što je to bilo u vreme kada su se prve biljke pojavile na kopnu, ali u sasvim drugačijem odnosu od onog za koji mislimo da je postojao u prošlosti.

Tabela 1.2.

Sastojci atmosfere koji imaju promenljiv sadržaj (Thompson, 1998).

Komponenta	Simbol	% u zapremini	Koncentracija (ppm)
Vodena para	H_2O	0 to 4	
Ugljen-dioksid	CO_2	0,035	355
Metan	CH_4	0,00017	1,7
Azot-suboksid	N_2O	0,00003	0,3
Ozon	O_3	0,000004	0,04
Čestice i aerosoli	PM	0,000001	0,01
Hlorofluorokarbonati	CFC's	0,00000001	0,0001

Današnja atmosfera je smeša stalnih gasova, aerosola i gasova koji se nalaze samo u tragovima, kao i nekih čvrstih i tečnih čestica. Stalni sastojci atmosfere koji imaju gotovo konstantnu koncentraciju su: azot (N_2), kiseonik (O_2) i argon (Ar), dati u tabeli 1.1, dok su vodena para (H_2O), ugljen-dioksid (CO_2) i ozon (O_3) gasovi sa promenljivom koncentracijom, dati u tabeli 1.2. Štaviše, vodena

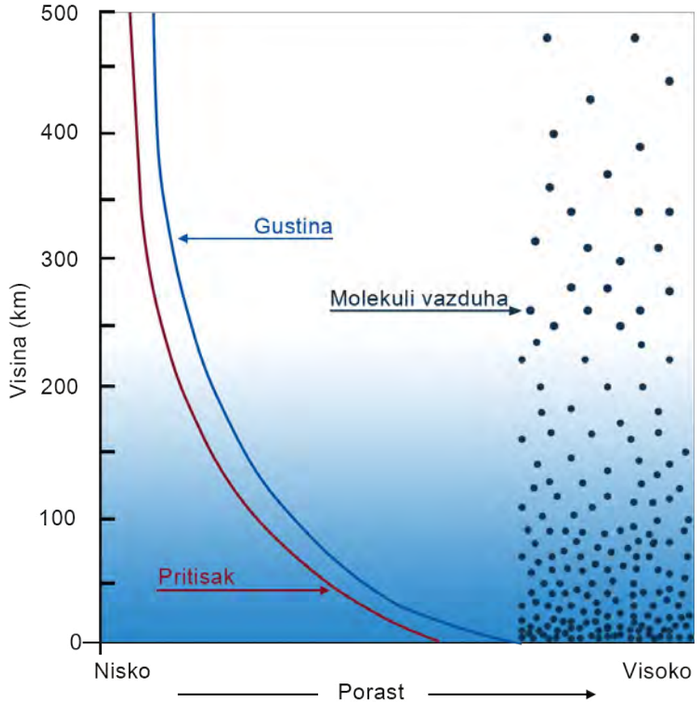
para je sastojak atmosfere čiji se sastav najviše menja i tokom vremena i u prostoru.

Na ovom mestu valjalo bi istaći ulogu još jednog gasa – ozona – koji je zastupljen samo u pojedinim delovima atmosfere ali igra odlučujuću ulogu u zaštiti živih bića na Zemlji od štetnog uticaja UV zračenja. Ovaj troatomni molekul kiseonika ima svoju dobru i lošu stranu, te se obično prema njima i naziva, dakle, u zavisnosti od toga u kom delu atmosfere se javlja i koju ulogu obavlja. Stratosferski ozon je „dobar". On ima sposobnost da u fotohemijskim reakcijama apsorbuje zračenje iz UV dela spektra dolazećeg Sunčevog zračenja, obezbeđujući da samo mali njegov deo stigne do Zemlje. Međutim, u prizemnom sloju atmosfere ozon nastaje kao rezultat kompleksnih fotohemijskih reakcija koje uključuju azot-dioksid (NO_2) i ugljovodonike, od kojih se većina ubraja u isparljiva organska jedinjenja (engl. VOC). Kao snažan oksidant, ozon je opasan i za biljke i za ljude ukoliko se nađu u direktnom kontaktu s njime. Zato se troposferski ozon naziva „loš" ozon. Ulazeći u biljku kroz stome, izaziva oksidacione procese na ćelijskom nivou. Vidljivi simptomi izloženosti biljaka su lezije na površini lista, umanjen rast i moguće smanjenje preraspodele ugljenih hidrata u zoni korena, što sve može imati značajan uticaj na razvoj biljke i prinos. Delovi atmosfere u kojima je smanjena koncentracija „dobrog" ozona u odnosu na normalnu naziva se ozonska rupa.

Na kraju, značajan sastojak atmosfere, koji se javlja u vidu malih čestica ili kapljica, jesu aerosoli. Iako su njihove dimenzije relativno male[1], oni mogu značajno da utiču na fizičke i hemijske procese u atmosferi. Ukoliko im se dimenzije ili koncentracija dovoljno povećaju, aerosoli mogu da utiču na prozračnost atmosfere prouzrokujući efekte kao da su prisutni tanki oblaci ili magla.

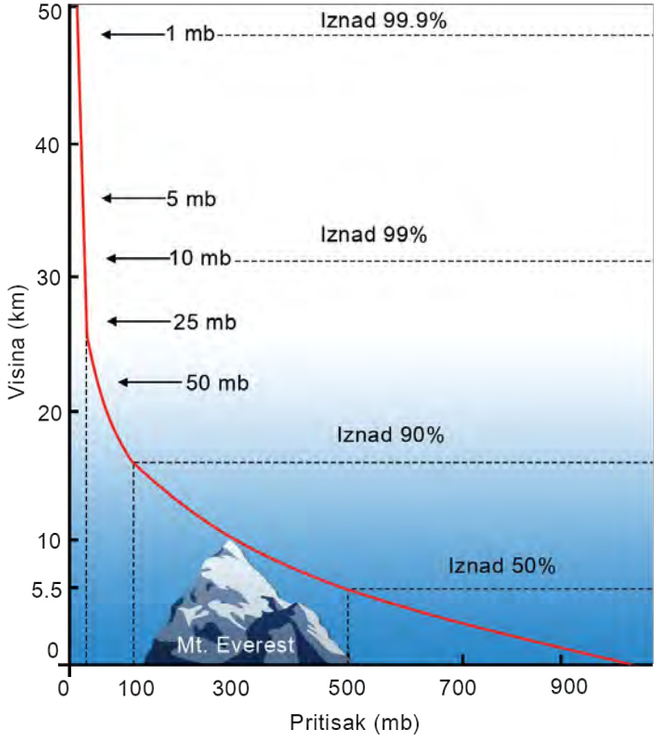
Gustina i pritisak atmosfere. Usled prisustva izvora i ponora različitih komponenata atmosfere, njihov sadržaj se značajno menja. Koncentracija većine gasova se smanjuje s visinom, međutim, usled fotohemijskih procesa u delu atmosfere iznad 10 km, koncentracija ozona i jednoatomskog kiseonika je na visini veća nego u nižim slojevima atmosfere. Više od 50% mase atmosfere je locirano u najnižih 5,5 km, dok se 99% njene mase može naći u sloju debljine 30 km (slike 1.1 i 1.2). Prikazani primeri su u skladu sa rezultatima eksperimenata koji pokazuju da se gustina atmosfere smanjuje s visinom.

[1] Aerosoli se po dimenzijama najčešće razvrstavaju u dve grupe: PM2,5 aerosoli čiji je prečnik 2,5 μm ($2{,}5 \cdot 10^{-6}$ m) i PM10 aerosoli prečnika 10 μm ($10 \cdot 10^{-6}$ m).



Slika 1.1.
Vertikalna raspodela atmosferskog pritiska i gustine atmosfere

Kako bismo bolje objasnili atmosferski pritisak, zamislimo stub vazduha čija je osnovica površine 1 m² a visina odgovara debljini atmosfere, tj. stub se prostire od tla do vrha atmosfere. Vazduh u ovom stubu pritiska tlo svojom težinom. Odnos težine vazduha u stubu i površine površi koju pritiska naziva se *atmosferski pritisak*. Kao što smo već primetili, s povećanjem visine smanjuje se gustina vazduha, ali se i skraćuje stub vazduha koji pritiska tlo. Dakle, na većim nadmorskim visinama je sve manje vazduha koji vrši pritisak pa je i atmosferski pritisak niži (slika 1.2).



Slika 1.2.
Vertikalna raspodela atmosferskog pritiska i mase atmosfere (u procentima)

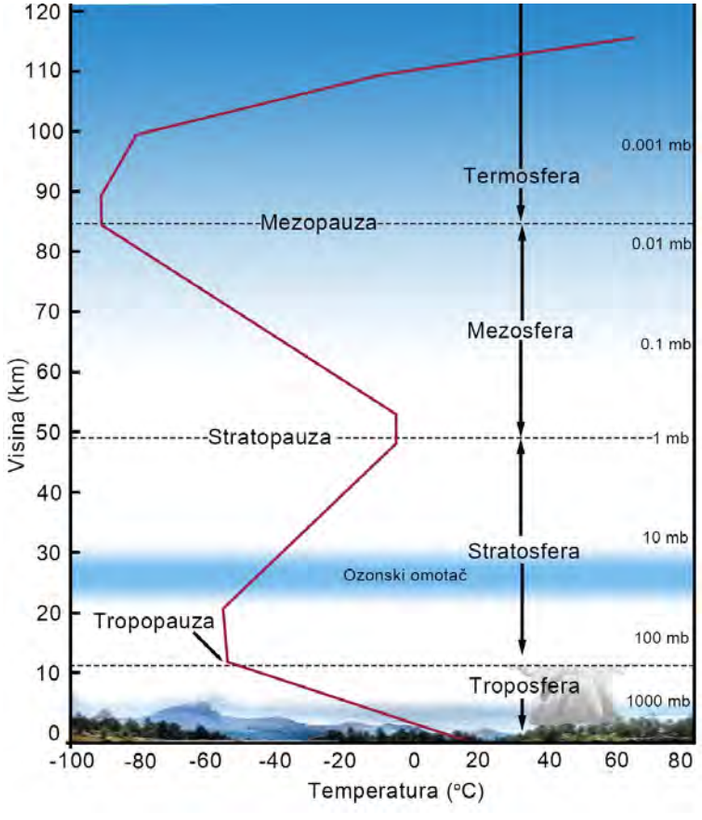
Stratifikacija atmosfere. Masa i pritisak atmosfere se naglo smanjuju u prizemnom sloju debljine oko 20 km, dok je iznad ove visine opadanje znatno sporije. Međutim, temperatura, kao jedna od najznačajnijih karakteristika atmosfere, ne menja se uniformno s visinom (slika 1.3). Rezultati merenja pokazuju sledeće: polazeći od površine Zemlje, temperatura vazduha opada u proseku za 6,5 °C/1000 m sve do 11 km visine. Ovaj deo atmosfere se naziva *troposfera*. Debljina troposfere se menja s geografskom širinom, ali i tokom godine. Najizraženija je varijacija između polova (7 km) i ekvatora (20 km). Imajući u vidu da je najznačajniji izvor toplote za atmosferu upravo Zemljina površina, a dodajući tome i smanjenje gustine atmosfere s visinom (s kojim smo se upoznali u prethodnoj sekciji) – opadanje temperature s udaljavanjem od površine je očekivana posledica. U troposferi se nalazi 75–80% mase atmosfere koja formira vreme ili utiče na njega. Na gornjoj granici troposfere nalazi se tanki sloj vazduha – tropopauza

– za koji se obično kaže da se u njemu temperatura vazduha ne menja sa visinom. To nije sasvim tačno. Na početku tropopauze temperatura vazduha opada za 6,5 °C/1000 m, ali se ova promena smanjuje sve do 2 °C/1000 m, ili na još manje u narednih nekoliko kilometara, formirajući sloj vazduha skoro konstantne temperature prema Svetskoj meteorološkoj organizaciji (SMO) (engl. *World Meteorological Organization*, WMO), 1992. Zavisno od geografske širine, ovo „nekoliko" može da bude 2 ili 4 km. Iz termodinamičkih razloga, konstantna temperatura sloja prigušuje sva vertikalna kretanja. Zato se tropopauza ponaša kao nesavršen krov troposfere koji je odvaja od ostatka atmosfere.

Porast temperature vazduha s visinom siguran je znak prelaska iz tropopauze u *stratosferu*. Ovaj sloj atmosfere svoj temperaturni profil „duguje" pre svega sadržaju pojedinih gasova. Na visini od oko 20 km najveća je koncentracija ozona koji intenzivno apsorbuje UV zračenje povisujući temperaturu ovog dela atmosfere. Porast temperature sa visinom, tzv. stabilna stratifikacija atmosfere (vidi poglavlje 5), ne dozvoljava uzdizanje vazduha, te su vertikalno mešanje i konvekcija praktično zanemarljivi. Čestice koje stignu do ovog dela atmosfere mogu ostati u njemu decenijama. To je razlog zašto u stratosferi može da se pronađe materijal nastao u snažnim erupcijama vulkana ili nuklearnim akcidentima koji su se odigrali pre mnogo godina. Takođe, stratosfera je veoma suva. Najveći deo vodene pare ostaje u troposferi, dok je 20% njene mase raspoređeno u sloju čija je debljina veća od 30 km. Na visinama između 50 i 55 km nalazi se gornja granica stratosfere na kojoj počinje *stratopauza*. Prosečna temperatura na ovoj visini je –15 °C, dok atmosferski pritisak od 100 Pa (1 mb) ukazuje na činjenicu da se 99,9% mase atmosfere nalazi ispod ovog nivoa. Stratopauza je tanak sloj atmosfere u kome je promena temperature sa visinom zanemarljiva.

Na visini iznad 50 km (ili 55 km) temperatura vazduha ponovo počinje da opada dostižući svoj apsolutni atmosferski minimum od –90 °C na visini od oko 85 km. Ovaj sloj atmosfere, bogat UV zračenjem, u kome je gustina gasova veoma mala i gotovo da nema kiseonika, nazvan je *mezosfera*. Zbog male gustine vazduha, apsorpcija Sunčevog zračenja je mala u ovom sloju atmosfere, dok stratosfersko grejanje intenzivno opada sa visinom. Usled svog specifičnog položaja (previsoko za istraživačke avione i balone, a prenisko za satelite), mezosfera je do danas ostala najmanje istraženi deo atmosfere. Na gornjoj granici mezosfere nalazi se *mezopauza* koja je odvaja od najvišeg sloja atmosfere – *termosfere*. U ovom sloju vazduha, koji se prostire do 100 km visine, vazduh je toliko razređen da su čak i sudari atoma i molekula retka pojava. Sastav i temperatura termosfere su u velikoj meri posledica Sunčeve aktivnosti, pa su tako u višim delovima glavni sastojci azot, kiseonik i helijum u atomskom stanju. Iako se smatra da temperatura raste s visinom u ovom delu atmosfere, pomenuti sastav nikako ne bi trebalo shvatiti na isti način kao, recimo, u slučaju stratosfere. Naime, u ovom

delu atmosfere sadržaj gasova je toliko mali da njegovu temperaturu treba shvatiti bukvalno kao srednju kinetičku energiju prisutnih molekula.



Slika 1.3.

Slojevi atmosfere definisani preko vertikalnog gradijenta temperature

1.2. Uticaj sastava atmosfere na biljke

Atmosfera i zemljište čine životnu sredinu terestričnih biljaka. Sastav atmosfere i uslovi koji vladaju u njoj imaju presudni uticaj na razvoj biljaka. Bilans i balans atmosferskih gasova praktično je glavni pokretač fizioloških i hemijskih procesa u biljci kao i njenog kompletnog rasta i razvoja. Značaj porasta koncentracije ugljen-dioksida (CO_2) u atmosferi za razvoj biljaka predmet je brojnih

studija još od poslednjih decenija 20. veka. U centru pažnje je njegov uticaj na proces fotosinteze (slika 1.4) i transpiracije (slika 1.5). Nema sumnje da postoji značajna razlika u reakciji C_3 i C_4 biljaka[2] (i fotosinteze koja se u njima odvija) na porast koncentracije ugljen-dioksida (CO_2) u uslovima kada ne postoji manjak vlage.

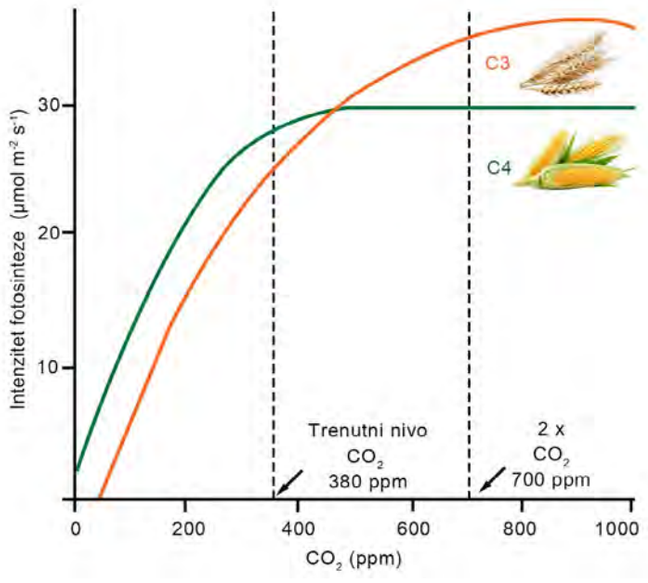
Pri promeni koncentracije CO_2 od 180 ppm do 700 ppm intenzitet fotosinteze se menja za 30% kod C_4 biljaka, ali čak za 142% kod C_3 biljaka. Pri fotosintetski aktivnom zračenju[3] (FAZ) od 279,12 W m^{-2}, neto bilans fotosinteze kod pšenice (C_3) u proseku iznosi 15,9 mol m^{-2} h^{-1} (4,42·10^{-3} mol m^{-2} s^{-1}), dok je u slučaju kukuruza (C_4) taj iznos 12,5 mol m^{-2} h^{-1} (3,47·10^{-3} mol m^{-2} s^{-1}). Takođe, fotosinteza može da dođe u stanje „saturacije" kada se radi o uticaju CO_2 na intenzitet procesa, odnosno da dalje povećanje koncentracije ne dovodi do povećanja intenziteta. Korisno je zapaziti da se ovo odigrava kod kukuruza, pri mnogo nižim koncentracijama CO_2 (450 ppm) nego u slučaju pšenice (850 ppm). Uticaj povećane koncentracije CO_2 na intenzitet transpiracije odigrava se na nivou stoma, gde dolazi do povećanja stomaternog otpora i usled toga do smanjenja intenziteta transpiracije. U zavisnosti od izloženosti stresu, prihrane ili genetskih karakteristika, ista biljna vrsta može različito reagovati na istu promenu sadržaja CO_2, što unosi dodatnu neodređenost u predviđanja u ovom pogledu i potencijalne mere adaptacije.

U Evropi je, tokom 20. veka sumpor-dioksid (SO_2) bio najznačajniji fitotoksični[4] zagađivač atmosfere. Tokom 1990-ih, njegova emisija je značajno smanjena, dok su NO_x (grupa oksida NO i NO_2) i O_3 postali mnogo značajniji zagađivači. Visoka koncentracija atmosferskog SO_2 tokom kratkog vremenskog perioda može proizvesti značajna oštećenja na biljkama, naročito kada se radi o funkcionalnosti stomaternog aparata. S druge strane, kumulativni efekti, koji su posledica dugotrajne izloženosti, mogu značajno da utiču na otpornost biljaka prema stresu i na smanjenje rasta bez prethodnih jasnih simptoma. U kombinciji sa troposferskim ozonom koji ima slično štetno dejstvo, čak i vrlo niske koncentracije SO_2 i NO_x mogu značajno da oštete biljke.

[2] C3 biljke su biljke umerenih klimata kao što su pšenica, suncokret, soja i ječam, dok su C4 biljke aridnih klimatskih zona (kukuruz, sirak) u kojima preovlađuje toplo ili tropsko vreme.

[3] Deo spektra sunčevog zračenja koji učestvuje u procesu fotosinteze. Više reči o ovom zračenju biće u poglavlju 2.

[4] Fitotoksični su oni zagađivači atmosfere koji proizvode jasne i merljive štete na biljkama



Slika 1.4.

Intenzitet fotosinteze C_3 i C_4 biljaka u odnosu na promene koncentracije CO_2 (Allen and Prasad, 2004)

1.3. Uticaj biljaka na sastav atmosfere

Usled prirodnih, ali i antropogenih procesa sastav atmosfere se stalno menja u vremenu i prostoru. Počev od Prve industrijske revolucije (18. vek), antropogeni procesi (procesi koje izaziva čovek) dobijaju na značaju. Ipak, do kraja poglavlja pažnja će biti posvećena fizičkim, hemijskim i fiziološkim procesima, za koje su odgovorne biljke i zemljište.

Počećemo sa jednim od najznačajnih procesa, a to je balans u produkciji i razlaganju azota i kiseonika u atmosferi. Azot nastaje i oslobađa se iz zemljišta tokom procesa nitrifikacije (biološka oksidacija amonijaka do nitrata) i denitrifikacije (mikrobiološki proces redukcije, odnosno nestajanja nitrata) u kojima dolazi do oslobađanja N_2, N_2O, NO i NH_4. Nasuprot tome, biološka aktivnost koja se odigrava u zemljištu (pre svega fiksacija azota) naročito je odgovorna za uklanjanje azota iz atmosfere. Najznačajniji izvor atmosferskog kiseonika je proces fotosinteze koji se odvija u biljkama. S druge strane, ponori kiseonika su svi procesi oksidacije organske (biljaka, životinja i disanje bakterija) i neorganske materije, kao i aerobno razlaganje organske materije.

Biljke utiču na sastav atmosfere u mehaničkom i fiziološkom smislu. Na površini biljaka zadržavaju se različite čestice. Biljni sklop, a naročito šumski, povećava hrapavost površine, menja tok vazdušnih masa iznad šuma i produkuje razmenu gasova između atmosfere i šumskog sklopa. Atmosferski gasovi poput O_2, CO_2 i H_2O stalni su učesnici značajnih fizičkih i fizioloških procesa koji se vezuju za rast i razvoj biljaka i interakciju biljnog sklopa sa okruženjem. Neki drugi gasovi mogu biti asimilirani od biljaka (O_3) ili deponovani na njihovoj površini (NO_x, SO_x,...). Prisustvo biljaka utiče na bilans ugljenika preko procesa distribucije biomase, disanja, asimilacije ugljen-dioksida, razgradnje organske materije i mineralizacije hraniva. U slučaju vode i vodene pare, vegetacija uvek povećava vlažnost vazduha preko procesa evapotranspiracije i umanjuje transport vodene pare od površine Zemlje ka atmosferi. To je razlog zašto se biljni sklop smatra značajnim izvorom, ali i ponorom većine gasova koji čine gasne komponente atmosfere.

2. Energetski bilans atmosfere

Tri najznačajnija mehanizma kojima se obavlja transfer energije u pririodi su provođenje, konvekcija i zračenje. Energija se *provođenjem* prenosi kroz čvrste materijale tako što atomi ili molekuli međusobno interaguju prenoseći deo svoje kinetičke ili vibracione energije od čestica koje imaju veću energiju (topliji deo sistema) do čestica s manjom energijom (hladniji deo sistema). *Konvekcija* je karakteristična za transfer energije u fluidima, odnosno kroz granicu između čvrstog tela i fluida koji protiče. Elektromagnetno *zračenje* je mehanizam kojim se energija trasportuje putem elektromagnetnih talasa koji se prostiru brzinom svetlosti kroz vazduh, vakuum ili neke druge dijatermne materijale.

2.1. Kratkotalsno i dugotalasno zračnje u atmosferi

Talasna dužina (l) i frekvencija (n) predstavljaju karakteristike talasa koje se najčešće koriste za opisivanje elektromagnetnog zračenja. S obzirom da su elektromagnetni talasi samo specijalan način prenosa energija putem talasa, moguće je, kao i kod svih drugih talasa, uspostaviti vezu između talasne dužine i frekvencije u obliku:

$$c = \lambda \cdot \nu \tag{2.1}$$

gde je c brzina prostiranja talasa. U slučaju elektromagnetnih talasa u vazduhu ili vakuumu, ova veličina je dobro poznata *brzina svetlosti*, koja iznosi $3{\cdot}10^8$ m s^{-1}. U skladu sa Plankovom (Planck) kvantnom teorijom, energija se ne emituje niti apsorbuje kontinualno, već u vidu kvantova. U slučaju elektromagnetnog zračenja ovi paketi energije se nazivaju fotoni i njihova energija (E) je proporcionalna frekvenciji, a obrnuto proporcionalna talasnoj dužini zračenja:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \tag{2.2}$$

Svako telo na temperaturi iznad 0 K emituje zračenje. Energija elektromagnetnog zračenja emitovana s površine tela od jednog kvadratnog metra u svakoj sekundi, u skladu sa Štefan–Bolcmanovim (Stefan–Boltzmann) zakonom, proporcionalna je četvrtom stepenu apsolutne temperature tog tela (T):

$$B = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \qquad (2.3)$$

gde je σ Štefan–Bolcmanova konstanta ($5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}), a ε emisivnost površine. Brojni eksperimenti su pokazali da na istoj temperaturi različita tela različito zrače. Očigledno je da energija koju telo emituje ne zavisi samo od temperature nego i od karakteristika tela. Emisivnost površine može da varira od 0, kod aposlutno belih tela, do 1, kod apsolutno crnih. Naravno, u prirodi ne postoje ni apsolutno crna ni apsolutno bela tela, ali neke prirodne površine se ponašaju slično ovim idealizovanim telima (tabela 2.1).

Tabela 2.1.

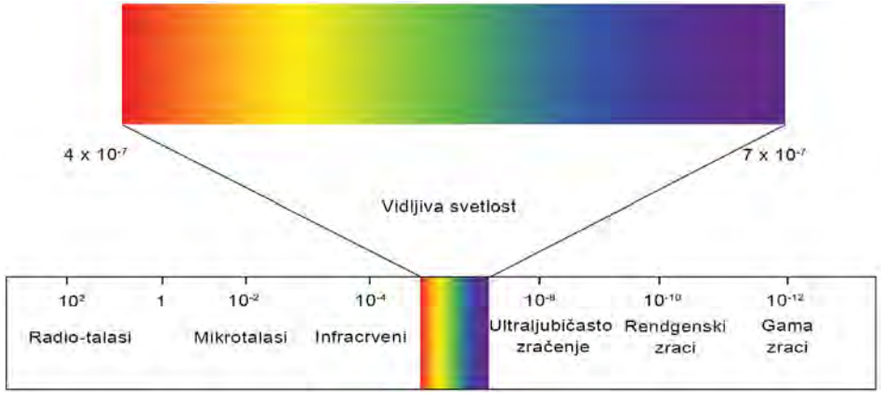
Srednji godišnji albedo (vidi poglavlje 2.2) i emisivnost različitih pokrivača (Thompson, 1998)

Tip pokrivača	Albedo	Emisivnost
Tropska šuma	0,13	0,99
Šuma	0,14	0,98
Njive i pašnjaci	0,20	0,95
Polupustinja i kamena pustinja	0,24	0,92
Suvi pesak	0,37	0,89
Vodena površina	< 0,08	0,96
Okeanski led	0,25-0,60	0,90
Vegetacija pokrivena snegom	0,20-0,80	0,88
Led prekriven snegom	0,80	0,92

Talasna dužina (odnosno frekvencija) i spektar su najznačajnije karakteristike elektromagnetnog zračenja nekog tela. S obzirom da je energija elektromagnetnog zračenja obrnuto proporcionalna njegovoj talasnoj dužini, izraz *kratkotalasno* je rezervisan za zračenje velike energije, a *dugotalasno* – za niskoenergetsko zračenje.

Spektar elektromagnetnog zračenja nekog tela predstavlja distribuciju monohromatske iradijanse, odnosno intenziteta zračenja po talasnim dužinama (slika 2.1). U zavisnosti od talasne dužine koja odgovara maksimumu u spektru, elektromagnetno zračenje nekog tela može se smatrati kratkotalasnim ili dugotalasnim. Najznačajniji izvor kratkotalsnog zračenja za Zemlju je Sunce (maksimum u emisionom spektru je na 500 nm), dok svi drugi oblici elektromagnetnog

zračenja koji dolaze sa mnogo hladnije Zemljine površine odgovaraju dugotalasnom delu spektra.

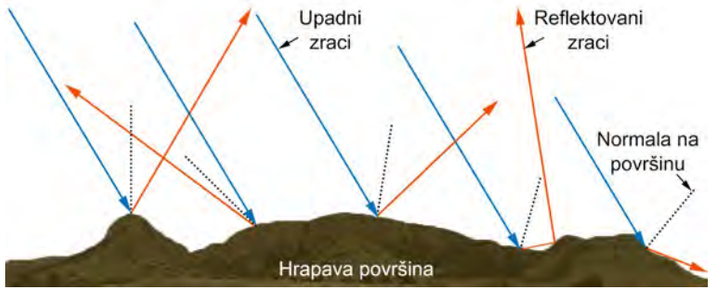


Slika 2.1.

Spektar elektromagnetnog zračenja

Sunce je zvezda. Ono je lopta užarenih gasova i plazme, čija površina zrači kao površina apsolutno crnog tela na temperaturi od oko 6000 °C. Atmosferski gasovi ne apsorbuju sunčevo zračenje u vidljivom delu spektra (380 nm – 760 nm) već omogućavaju da visokoenergetsko zračenje stigne od Sunca na Zemljinu površinu i na taj način odigra ulogu najznačajnijeg pokretača svih procesa u atmosferi. Naravno, apsorpcija nije jedini mehanizam slabljenja Sunčevog zračenja u atmosferi. *Difuzna refleksija* i *selektivna apsorpcija* su procesi koji mogu značajno da promene i kvalitet i kvanititet Sunčevog zračenja koje dolazi do Zemljine površine.

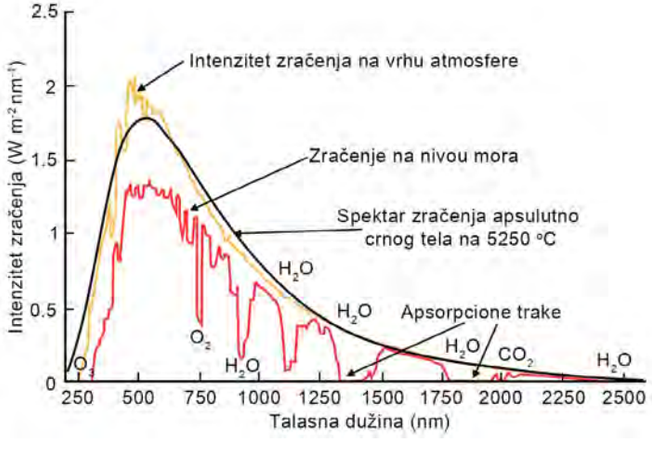
Difuzna refleksija se odigrava kada se zračenje reflektuje od površine koja nije glatka. U atmosferi je ovo česta situacija kada zračenje dospeva do delova oblaka, kapljica ili čestica koje se nalazi u atmosferi. U tom slučaju upadni snop paralelnih zraka nakon rasejanja prestaje da bude paralelan i formira difuzno zračenje (slika 2.2). Razlog tome je činjenica da se hrapava površina sastoji od mnogo malih ravnih površina koje su postavljene pod nekim uglom jedna u odnosu na drugu. Na svaku od površina paralelni zraci padaju pod istim uglom, ali se zbog njihove orijentacije različito odbijaju formirajući reflektovani snop zraka koji nisu paralelni.



Slika 2.2.

Difuzna refleksija zračenja sa hrapave površine

Selektivna apsorpcija je proces pri kome neki molekul apsorbuje samo zračenje određenih talasnih dužina. Rezultat je apsorpcioni spektar molekula koji pokazuje na kojim talasnim dužinama posmatrani molekul apsorbuje elektromagnetno zračenje. Specifičan apsorpcioni spektar gasova koji čine atmosferu je odgovoran za selektivnu apsorpciju sunčevog zračenja. Oni gasovi koji su zastupljeniji u atmosferi obezbediće veću apsorpciju na talasnim dužinama karakterističnim za njihov apsorpcioni spektar, što će na tim mestima dovesti do smanjenja intenziteta sunčevog zračenja nakon njegovog prolaska kroz atmosferu. Dakle, prisustvo pojedinih gasova dovodi do selektivne apsorpcije, a njihova veća ili manja koncentracija u pojedinim delovima atmosfere formira spektar sunčevog zračenja koji će biti registrovan na površini Zemlje (slika 2.3).



Slika 2.3.

Spektar sunčevog zračenja na vrhu atmosfere i površini Zemlje

Planeta Zemlja je telo čija temperatura i emisivnost nisu jednake na svim delovima površine. Intenzitet zračenja emitovanog sa Zemljine površine, B_z može da se izračuna korišćenjem jednačine 2.1, uzimajući, naravno, u obzir temperaturu površine Zemlje i njenu emisivnost.

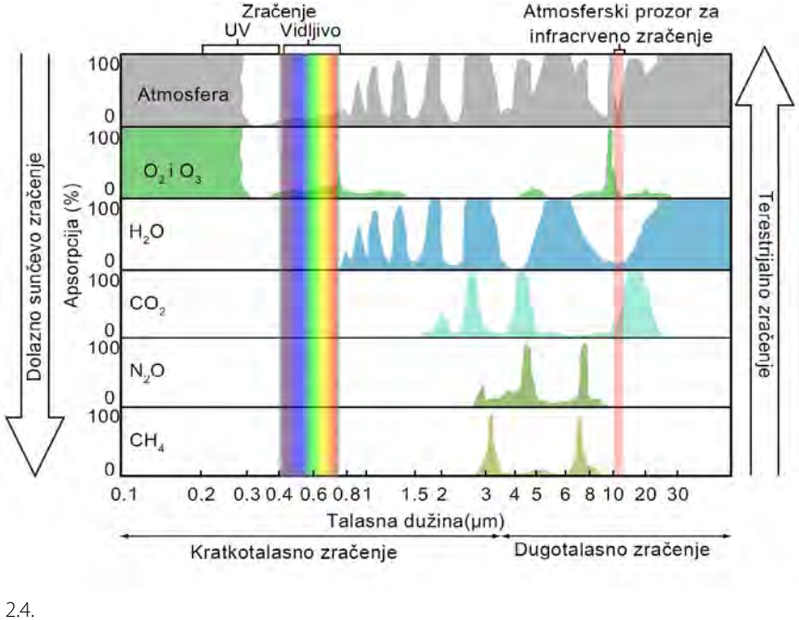
Elektromagnetno zračenje atmosfere je mnogo kompleksnije od Zemljinog izračivanja. Naime, svaka gasna komponenta atmosfere, svaka čestica ili delić oblaka mogu biti izvori toplotnog zračenja koji emituju, u skladu sa Štefan-Bolcmanovim zakonom, elektromagnetno zračenje čiji je intenzitet srazmeran njihovoj temperaturi. S obzirom da je svaki delić mnogo manji od oklonog vazduha, on za njih predstavlja beskonačan toplotni rezervoar. Zbog toga možemo smatrati da je temperatura svakog od ovih gasova (ili kapljica vode) praktično jednaka temperaturi vazduha koji ga okružuje. U tom slučaju je opravdana pretpostavka da intenzitet dugotalasnog zračenja koje sastojci atmosfere emituju (B_a), biva proporcionalan četvrtom stepenu temperature vazduha i sadržaju ovih malih izvora zračenja u atmosferi. Postaje očigledno da je gotovo nemoguće formulisati egzaktnu relaciju za izračunavanje atmosferskog zračenja. Međutim, postoji mnogo empirijskih relacija, od kojih svaka daje prednost određenim sastojcima atmosfere. Često je korišćena Brentova (Brent) empirijska formula, koja može biti napisana u obliku

$$B_a = \sigma T_a^4 (0{,}625 + 0{,}056 \cdot e^{1/2}) \qquad (2.4)$$

gde je e pritisak vodene pare izražen u hPa (1 mb = 1 hPa = 100 Pa), a T_a je temperatura vazduha. Primer izračunavanja protivzračenja atmosfere možete pronaći u glavi pod nazivom „Numerički primeri". S obzirom da se temperature površine Zemlje i površinskog sloja atmosfere nalaze u intervalu 200–300 K, emitovano zračenje pripada tzv. infracrvenom delu spektra elektromagnetnog zračenja (4–10 μm) sa maksimumom intenziteta na talasnoj dužini od 10 μm, što se smatra dugotalasnim zračenjem (slika 2.4). U literaturi se uobičajio naziv *Zemljino izračivanje* za dugotalasno zračenje koje emituje Zemlja, dok se dugotalasno zračenje koje stiže na Zemlju stiže iz pravca atmosfere naziva *protivzračenje atmosfere* ili *atmosfersko zračenje*. Često se Zemljino izračivanje i protivzračenje atmosfere nazivaju i *terestrijalno zračenje* (slika 2.4). Razlika između protivzračenja atmosfere i Zemljinog izračivanja naziva se *efektivno izračivanje*. Ovo zračenje je odgovorno za hlađenje i grejanje Zemljine površine i atmosfere tokom noći. Ukoliko je ono pozitivno, onda je bilans dugotalasnog zračenja pozitivan i tlo će se grejati tokom noći, u protivnom, tlo će se hladiti. Prisustvo oblaka može povećati bilans dugotalasnog zračenja na površini tla. Naime, Zemljino izračivanje i deo protivzračenja atmosfere koji je usmeren naviše mogu da se odbiju od oblaka i vrate ka površini Zemlje, značajno usporavajući njeno hlađenje tokom noći.

Većina gasova koji čine atmosferu apsorbuje elektromagnetno zračenje, ali u različitom opsegu talasnih dužina (slika 2.4). Možda najmoćniji apsorber elektromagnetnog zračenja na talasnim dužinama manjim od 0,4 μm (UV zračenje) jeste stratosferski ozon. Sa apsorptivnošću za UV zračenje koja iznosi skoro 1, „dobar" ozon je praktično čuvar života na Zemlji. Azot i kiseonik takođe apsorbuju elektromagnetno zračenje, ali na talasnim dužinama manjim od 0,1 μm (N_2) i na 0,245 μm (O_2). Interesantno je da gotovo nijedan gas u atmosferi ne absorbuje na talasnim dužinama između 0,39 μm i 0,70 μm, pa se ovaj deo spektra naziva „atmosferski prozor" (slika 2.4). Njegovo postojanje omogućuje da Sunčevo zračenje, čije talasne dužine odgovaraju vidljivom delu spektra, stigne do Zemlje.

Uz izvesno smanjenje intenziteta, Sunčevo zračenje stiže do površine Zemlje u nešto širem opsegu talasnih dužina (0,3–3,0 μm) koji uključuje i blisko ultraljubičasto, i vidljivo i blisko infracrveno, sažeto rečeno – kratkotalasno zračenje. Apsorpcija ovog zračenja u najvećoj meri zavisi od prisustva vodene pare i ugljen-dioksida u atmosferi (slika 2.4).



Slika 2.4.

Apsorpcioni spektar najznačajnijih „gasova staklene bašte"

Odlazeće Zemljino izračivanje pripada dugotalasnom delu spektra, s talasnim dužinama većim od 4 μm. U apsorpciji dugotalasnog zračenja u atmosferi,

najvažniju ulogu igraju gasovi koje obično zovemo „gasovi staklene bašte"[5] (engl. Greenhouse gases, GHG). U ove gasove se ubrajaju: vodena para, ugljen-dioksid, ozon, natrijumovi oksidi i metan. Oni su u atmosferi odgovorni za apsorpcicju zračenja u tzv. „infracrvenom prozoru" koji se nalazi izmedju 2 i 10 μm. Jedino ugljen-dioksid ima značajnu apsorpciju dugotalasnog zračenja iznad 13 μm.

2.2. Energetski bilans

Sučevo zračenje stiže na zemljinu površinu u vidu *direktnog* i *difuznog* zračenja. Direktno zračenje je deo Sunčevog zračenja koji dolazi na horizontalnu površinu Zemlje u vidu snopa paralelnih zraka u vrlo malom prostornom uglu (do 5°). Međutim, ako na putu direktnog Sunčevog zračenja kroz atmosferu dođe do njegove difuzne refleksije i rasejanja u atmosferi, Sunčevo zračenje stiže na površinu Zemlje u vidu *difuznog* zračenja. Mera direktnog Sunčevog zračenja koje stiže do Zemljine površine je takozvano *globalno* zračenje, definisano kao zbir intenziteta direktnog i difuznog zračenja. Ovakva podela globalnog zračenja uglavnom je posledica prisustva oblaka u atmosferi i ugla pod kojim stižu Sunčevi zraci. U slučaju bezoblačnog neba, na površini Zemlje će biti prisutno i direktno i difuzno zračenje. Naravno, ukoliko je na nebu prisutan debeo sloj oblaka koji ga u potpunosti prekriva, tako da se Sunce i ne vidi, onda će svo direktno Sunčevo zračenje biti apsorbovano ili rasejano, a jedino će difuzno zračenje stizati na Zemljinu površinu. Slična situacija se javlja kad se Sunčevi zraci prostiru pod vrlo velikim zenitnim uglom, odnosno kada se Sunce nalazi blizu zalaska iza horizonta. U području centralne Evrope tipična vrednost dnevne sume globalnog zračenja, u zavisnosti od doba godine i geografske širine, varira od 5 MJ m^{-2} zimi do 30 MJ m^{-2} leti.

Kada stigne do površine Zemlje, globalno zračenje može biti apsorbovano na njenoj površini, ili pak reflektovano nazad u atmosferu. Apsorpcija kratkotalasnog zračenja na površini Zemlje varira u zavisnosti od geografske širine, godišnjeg doba i karakteristika površine do koje je došlo. Iznos globalnog zračenja koje će biti reflektovano od površine Zemlje – *reflektovano* zračenje – zavisi od karakteristika površine, a u prvom redu od njenog albeda. Albedo je karakteristika površine koja pokazuje koji deo globalnog zračenja će se odbiti od površine Zemlje i vratiti u atmosferu. Albedo površine može da se izračuna, kao količnik

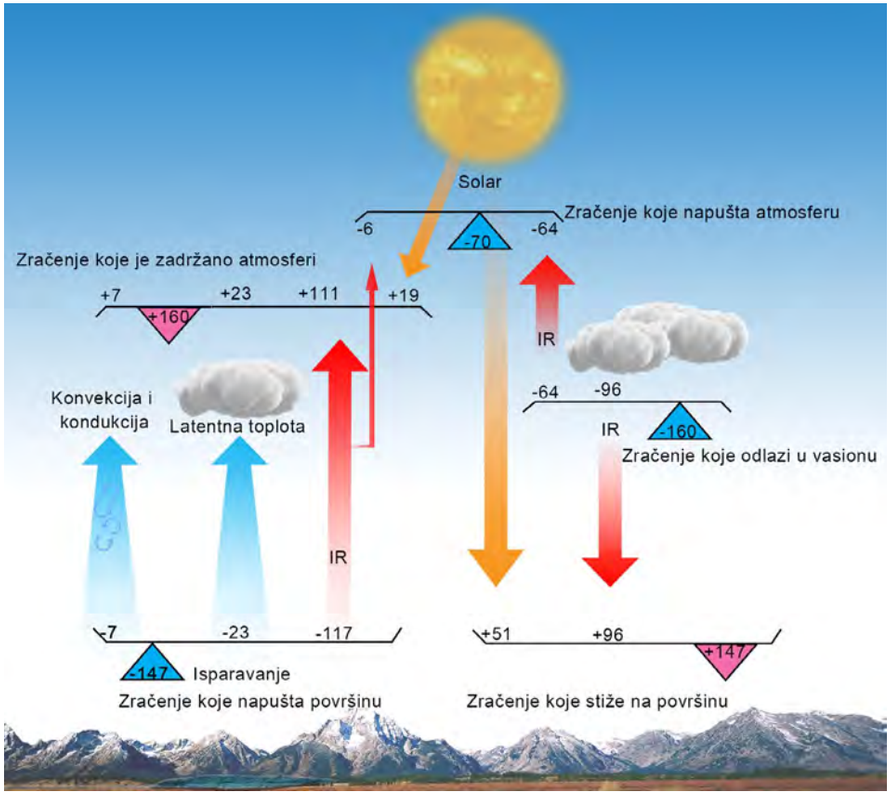
[5] Naziv „gasovi staklene bašte" je zadržan iz istorijskih razloga iako efekat na koji se odnosi nema nikakve veze sa staklenom baštom. Naime, glavni razlog više temperature u staklenoj bašti nego u njenoj okolini jeste sprečavanje provođenja toplote iz bašte zbog prisustva staklenih zidova. Kada se radi o grejanju koje se povezuje sa GHG, uzrok porasta temperature je povećana apsorpcija dugotalasnog zračenja od strane ovih g asova. Dakle radi se o dva potpuno različita fizička procesa. Prvi je izolacija, odnosno sprečavanje provođenja, a drugi je apsorpcija dugotalasnog zračenja i njegova reemisija ka zemljinoj površini.

intenziteta reflektovanog i globalnog zračenja. Ova veličina u značajnoj meri zavisi od boje, vlažnosti, strukture i pokrivenosti površine, odnosno od karakteristika njenog pokrivača. Tamna i vlažna površina bez biljnog pokrivača ima mali albedo čak i nakon dubokog oranja, jer svaka od ovih karakteristika ponaosob povećava intenzitet apsorpcije sunčevog zračenja. Naime, tamna površina bolje apsorbuje zračenje nego svetla, dok prisustvo vode u zemljištu povećava njen toplotni kapacitet jer je vazduh, koji ima manji toplotni kapacitet, sada zamenjen vodom, čiji je toplotni kapacitet veći. S druge strane, dubokim oranjem se povećava broj površina koje reflektuju pod različitim uglom, što dovodi do višestruke refleksije Sunčevog zračenja u rastresitom, površinskom sloju zemljišta. Na taj način se mnogo više energije zadržava u zemljištu. Dakle, jedna veoma bitna komponenta energetskog bilansa Zemljine površine – reflektovano zračenje – zavisi od karakteristika površine koje mogu biti promenjene. Vrednost albeda prirodnih površina varira od 0,13, za tropske šume, do 0,8, za snegom pokrivenu ledenu površinu (tabela 2.1). (Mnogo više o uticaju vegetacije na albedo biće rečeno u poglavlju 2.3)

Pre detaljnije analize energetskog bilansa, biće nešto više reči o značajnim izvorima i ponorima energije u atmosferi, *osetnoj* i *latentnoj* toploti, koje se prenose putem konvekcije i turbulencije. Osetna toplota predstavlja energiju prenesenu s toplijeg na hladnije mesto posredstvom fluida, izazivajući promenu temperature svih tela koja su u kontaktu. Pred kraj 19. veka (1884.) Džul (Joule) je ovu pojavu opisao kao energiju na koju ukazuje termometar. Latentna (skrivena) toplota je energija uključena u fazne prelaze pri konstantoj temperaturi. Na Zemljinoj površini i u atmosferi ova energija je povezana s prelaskom vode iz vodene pare u tečnu vodu i led. Fluks osetne toplote je pozitivan ako je usmeren od površine prema atmosferi, dok je fluks latentne toplote pozitivan ako površina isparava. Ova konvencija ima smisla zato što u oba slučaja atmosfera postaje toplija.

Na ovom mestu pozabavićemo se još jednim problemom koji često unosi konfuziju kod čitalaca kada se radi o tome koliko energije Zemlja, ili njena jedinična površina, zaista dobija od Sunca. Treba razmatrati dva aspekta ovog problema. Jedan se odnosi na energiju sunčevog zračenja koja u datom trenutku pada na kvadratni metar površine normalne na pravac upadnih zraka. U proseku, ova energija iznosi 1367 J po 1 m^2 u 1 s, tj. odgovara joj zračenje intenziteta 1367 W m^{-2} i naziva se *solarna konstanta*. Drugi aspekt se odnosi na energiju koja stiže od Sunca do kvadratnog metra površine gornje granice atmosfere *u proseku* u jednoj sekundi. Ova energija pokazuje koliko bi energije dobio svaki deo atmosfere kad bi se ona ravnomerno raspoređivala u svakom trenutku. Kratak proračun pokazuje da intenzitet ovog zračenja iznosi oko ¼ solarne konstante, odnosno 342 W m^{-2}.

Energetski bilans kratkotalasnog zračenja na Zemljinoj površini i u atmosferi, kao i vrednosti pojedinih flukseva zračenja, često se izražava u odnosu na intenzitet upadnog Sunčevog zračenja (normirano na 100 jedinica). U daljoj analizi će se sve komponente bilansa izražavati kao procenat od ovog upadnog zračenja. Na svom putu kroz atmosferu (slika 2.5), Sunčevo zračenje prolazi kroz procese: a) *apsorpciju* u stratosferi (2) i troposferi (17); b) *refleksiju* od oblaka (20) i Zemljine površine (4), uključujući i rasejavanje u atmosferi (6); i c) *transmisiju* u vidu direktnog (28) i difuznog (23) zračenja. Svi ovi procesi dovode do zajedničkog efekta refleksije 30 jedinica zračenja, što odgovara planetarnom albedu od 0,3. Uzimajući u obzir sve „dolazne" i „odlazne" flukseve, može se zaključiti da atmosfera apsorbuje tek 19% od upadnog Sunčevog zračenja, dok oko 51% dođe do Zemljine površine.



Slika 2.5.

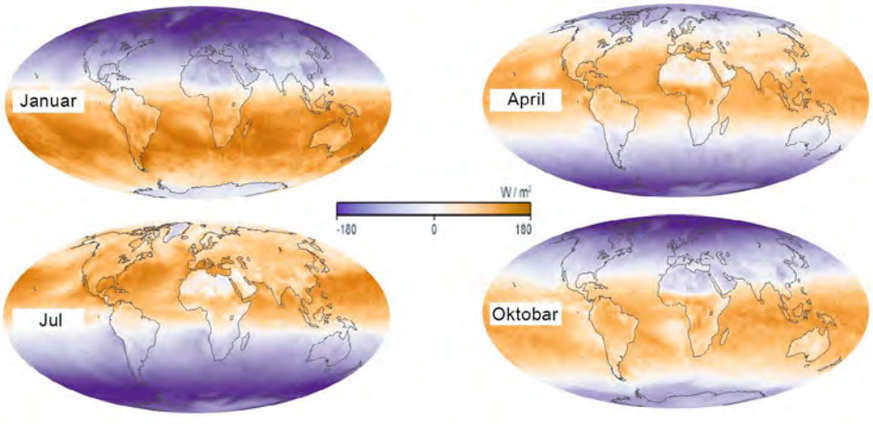
Energetski bilans kratkotalasnog i dugotalasnog zračenja na Zemljinoj površini i u atmosferi

Sunčevo zračenje koje apsorbuje atmosfera i Zemljina površina uzrokuje njihovo zagrevanje. Pretpostavlja se da je Zemljina površina pri temperaturi od 18,55 °C (291,7 K) i sa emisivnošću od 0,95 u termodinamičkoj ravnoteži sa atmosferom. Prema Štefan-Bolcmanovom zakonu, ovakva površina emituje 390 W m^{-2} što je otprilike 114% od upadnog Sunčevog zračenja (Liou, 2002).

Ako nastavimo sa raspodelom flukseva na način na koji je to urađeno kod kratkotalasnog zračenja (slika 2.5), fluksevi dugotalasnog zračenja na Zemljinoj površini i u atmosferi podeljeni su na sledeći način: od 117 jedinica dugotalasnog Zemljinog izračivanja, njih 111 će aposrbovati atmosferski gasovi, dok će 6 jedinica biti izgubljeno u svemiru; dodatno, u proseku 30 jedinica dolazi sa površine Zemlje u atmosferu u vidu latentne (23) i osetne (7) toplote. Dakle, atmosfera dobija 19 jedinica od sunčevog zračenja, 111 od Zemljinog izračivanja i 30 od flukseva osetne i latentne toplote. To ukupno čini 160 jedinica zračenja. Ali, atmosfera takođe i emituje zračenje. Prema njenoj trenutnoj prosečnoj temperaturi i trenutnoj zastupljenosti gasova, protivzračenje atmosfere iznosi 96 jedinica, dok su 64 jedinice izgubljene u Svemiru. Ovih 96 jedinica reemitovane energije (tj. 111 jedinica apsorbovanog Zemljinog izračivanja) produkuje takozvani „efekat staklene bašte". Naravno, u slučaju veće koncentracije gasova koji apsorbuju dugotalasno zračenje, apsorpcija Zemljinog izračivanja će biti preko 111 jedinica, što će povećati ravnotežnu temperaturu, a time i protivzračenje atmosfere.

Globalni[6] efekat svih navedenih procesa može se najbolje sagledati preko neto zračenja Zemlje koje predstavlja razliku između ukupnog dolaznog i odlaznog zračenja na gornjoj granici atmosfere. Kako bi temperatura planete bar globalno ostala konstantna, suma neto zračenja Zemlje tokom godine mora biti jednaka nuli. Sa slike 2.6 se vidi da neto zračenje značajno varira tokom sezone i u odnosu na geografski položaj mesta.

[6] U ovom kontekstu izraz „globalni" označava planetarne razmere.



Slika 2.6.

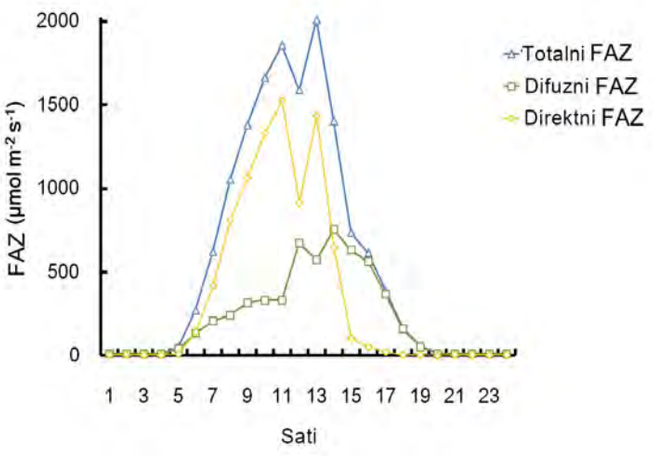
Srednje mesečno neto zračenja planete Zemlje za period 2006–2018.
[izvor: Zemaljska opservatorija NASA, SAD (NASA Earth Observatory, USA), https://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=CERES_NETFLUX_M]

2.3. Uticaj zračenja na vegetaciju

Zračenje utiče na biljke svojom energijom, talasnom dužinom i trajanjem. Iz ugla fiziologije biljaka, najznačajniji delovi elektromagnetnog spektra su vidljivi – poznatiji kao *svetlost* i UV-B[7] deo (280–315 nm). Svetlost je odgovorna za formiranje hlorofila, funkcionisanje stoma, fotosintezu, rast, razviće i morfologiju biljke, a u slučaju šuma – za stratifikaciju vrsta, kao i veličinu i strukturu listova i brojne druge karakteristike biljaka. Sa stanovišta fotosinteze, najznačajniji opseg talasnih dužina je onaj od 400 nm do 700 nm, te se zato i zove fotosintetski aktivno zračenje (FAZ). Od značaja mogu biti dnevne varijacije ovog zračenja, kao i varijacije njegove direktne i difuzne komponente. Sa slike 2.7 može se uočiti da je intenzitet direktnog FAZ-a u šumi posle 14 časova gotovo zanemarljiv i da fotosinteza u potpunosti zavisi od difuznog zračenja.

Ultraljubičasto zračenje, a naročito UV-B (280–315 nm), ima negativan efekat na fotosintezu redukujući veličinu biljke uz istovremeno razaranje enzima i DNK, što dovodi do oštećenja tkiva i povećane osetljivosti na biljne bolesti. Dodatno, UV-B zračenje utiče na produktivnost fitoplanktona koji su zaduženi za skladištenje ugljenika u okeanu.

[7] Deo UV elektromagnetnog spektra koji se prostire od 280 do 315 nm zove se UV-B, dok je deo od 315 do 400 nm UV-A spektar zračenja.



Slika 2.7.

Dnevna varijacija ukupnog, direktnog i difuznog FAZ-a iznad šumskog sklopa, izmerena 1.6.2012. na Prospekt Hil Traktu u Harvardskoj šumi u SAD (Prospect Hill Tract, Harvard Forest, Petersham, USA[8]) (Munger and Wofsy, 2017)

Infracrveno zračenje (IC) je elektromagnetno zračenje talasnih dužina između 700 nm i 1 mm. Svako zagrejano telo emituje IC zračenje. Njegovom apsorpcijom telo se greje, pa je to bio razlog da se za ovo zračenje koristi i izraz *termičko zračenje*. S obzirom da je emisija i apsorpcija IC zračenja povezana sa promenom vibracione energije molekula, analiza odgovarajućih spektara kod različitih biljaka može doprineti boljem poznavanju njihove molekularne strukture.

Temperatura (njen gornji i donji prag) jeste faktor koji pokreće ili ograničava gotovo sve fiziološke i biohemijske procese koji su važni za rast i razvoj biljaka. Intenzitet procesa često je proporcionalan efektivno uloženoj energiji, odnosno energiji razmenjenoj između organizma i okoline na temperaturama između biološkog minimuma i maksimuma. Iako je fotosinteza najvažniji fiziološki proces koji uključuje zračenje, biljka angažuje samo 50% upadnog zračenja za potrebe ovog procesa. Korisno je znati da se od energije koja dospe do listova, samo 5% pretvori u biomasu, 60% se izgubi na neapsorbovane talasne dužine, 8% na refleksiju i transmisiju, 8% na toplotne gubitke i 19% na metabolitičke procese. U zavisnosti od toga kako se obavlja fiksacija ugljen-dioksida tokom fotosinteze, biljke su svrstane u tri grupe: C_3, C_4 i CAM. CAM biljke su one kod kojih je evoluirao

[8] Toranj na lokalitetu Prospekt Hil Trakt u harvardskoj šumi je instaliran 1989. Vremenske serije turbulentnih flukseva izmerenih na ovom tornju predstavljaju najduži neprekinuti niz merenja neto razmene CO2 između šumskog ekosistema i atmosfere u Severnoj Americi.

tzv. *crassulacean acid metabolism* (metabolizam organskih kiselina kod biljaka iz roda *Crassula*) kao adaptacija na uslove suše. Za ove biljke je karakteristično da stome ostaju zatvorene tokom dana kako bi bila smanjena evapotranspiracija, ali se otvaraju noću kako bi biljka mogla da usvoji ugljen-dioksid. Od ostale dve grupe, C_3 biljke se smatraju manje produktivnim nego C_4 zbog manje efikasnosti u asimilaciji ugljen-dioksida. Takođe, one se razlikuju u pogledu optimalne temperature za postizanje maksimalnog intenziteta fotosinteze – C_4 biljke imaju višu optimalnu temperaturu.

Biljka kao fizički sistem uvek je u energetskoj ravnoteži sa svojom okolinom. Čak i ako neki organizmi mogu autonomno da promene svoju temperaturu, ona je dugoročno stabilna i rezultat je razmene energije sa okolinom. Pretpostavka koja se često koristi zasniva se na tome da je ukupno zračenje (R_{net}) koje stiže do površine biljke utrošeno na turbulentne flukseve latentne (LE) i osetne (H) toplote, kao i toplotu uskladištenu u zemljištu (Q_G) i biomasi (Q_S):

$$R_{net} = LE + H + Q_G + Q_S. \quad (2.5)$$

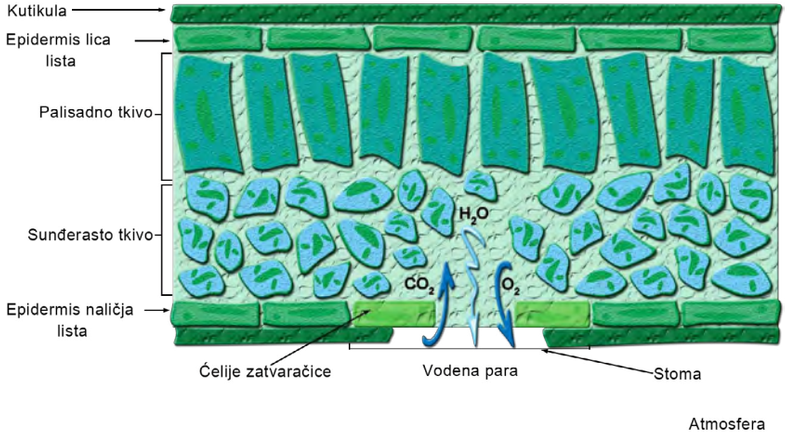
Energija uskladištena u biljkama, koja se troši na neke male autonomne regulacije temperature i unutrašnje procese, ne premašuje 20–30 W m^{-2}. Stoga se obično smatra da su prva tri člana s desne strane jednačine bilansa odgovorna za utrošak više od 95% ukupnog zračenja.

Biljni sklop veoma efikasno apsorbuje zračenje. Od zračenja koje stigne do biljnog sklopa, nakon što je deo reflektovan od njegove gornje granice, manje od 10% dođe do tla. *Fluks latentne toplote* s površine lista (LE_l) je proporcionalan intenzitetu evapotranspiracije (E_l). Koeficijent proporcionalnosti je latentna toplota isparavanja (L) koja zavisi od temperature tečnosti koja isparava. U slučaju listova, temperatura vode unutar listova i na njihovoj površini jednaka je temperaturi lista (T_l) i može se smatrati da je latentna toplota isparavanja funkcija temperature lista ($L = f(T_l)$). Za vodu $L = 2{,}43 \cdot 10^6$ J kg^{-1} na 30 °C i $L = 2{,}501 \cdot 10^6$ J kg^{-1} na 0 °C. Evapotranspiracija je kompleksan proces koji uključuje fizički proces isparavanja s površine lista i fiziološki proces transpiracije vode iz unutrašnjosti biljke. Pošto voda potencijalno isparava sa površine lista samo tokom kratkog perioda nakon padavina ili formiranja rose, u analizi energetskog bilansa lista fluks latentne toplote (LE) uključuje samo proces transpiracije.

Često korišćena parametrizacija[9] transpiracije je zasnovana na Fikovom (Fick) zakonu difuzije i otpornoj reprezentaciji vegetacije. Prema pomenutom zakonu, fluks vodene pare između unutrašnjosti lista i okolnog vazduha je di-

[9] Parametrizacija (engl. parameterisation) u meteorologiji označava postupak pri kome se veoma složeni procesi (koje nije moguće direktno opisati) opisuju pojednostavljenim parametarskim jednačinama. Vrednosti parametara se određuju eksperimentalnim putem.

rektno srazmeran razlici koncentracija vodene pare u ove dve sredine, a obrnuto srazmeran otporu koji vazduh pruža kada se vodena para transportuje kroz njega. Sličan pristup može se primeniti na difuziju ugljen-dioksida između biljke i okolnog vazduha koristeći razliku u koncentraciji gasa unutar i izvan stoma i otpor transportu gasa. To je jedan od razloga zašto su usvajanje ugljen-dioksida i oslobađanje vode iz biljke tesno povezani procesi. U tu svrhu se često koristi koeficijent transpiracije koji daje vezu između transpiracije i intenziteta fotosinteze.



Slika 2.8.
Šematski prikaz stominog aparata

Razumnom se čini pretpostavka da je vodena para unutar lista u saturaciji na temperaturi lista i stoga koncentracija vodene pare može biti izražena koristeći pritisak pare u saturaciji na temperaturi lista: $E(T_l)$. Ako je relativna vlažnost vazduha (r) poznata, pritisak pare okolnog vazduha može biti izražen kao $r \cdot E(T_a)$, gde je sa T_a označena temperatura vazduha. S obzirom da se vodena para prenosi kroz stome biljke i kroz vazduh, postoje dva otpora koja treba uzeti u obzir prilikom računanja fluksa vodene pare između biljke i atmosfere: stomaterni (r_S) i aerodinamički (r_a) te ovaj fluks može biti izražen i preko latentne toplote u obliku

(2.6)

gde je r gustina vazduha, c_p je specifična toplota pri konstantnom pritisku, a g je psihrometarska konstanta.

Fluks osetne toplote (H) sa površine lista je posledica temperaturne razlike između lista i okruženja. Primenom Fikovog zakona i otporne reprezentacije na transport osetne toplote, ovaj fluks može biti napisan u sledećem obliku

(2.7)

U tankom sloju vazduha koji dodiruje površinu lista, kao i na graničnoj površini između tla i atmosfere, odnosno tla i biljke, molekularno provođenje je dominantan mehanizam transporta energije. Ovaj iznos energije je veoma teško izračunati tako da je uobičajeno da se izražava kao deo neto zračenja.

Trajanje zračenja je vremenski period u toku dana kada postoji merljivo Sunčevo zračenje. Fotoperiod je period u toku dana kada su živa bića izložena svetlosti i njegovo trajanje se menja sa geografskom širinom. Na ekvatoru je fotoperiod konstantan (12 sati traje dan i 12 sati je noć), ali s približavanjem polovima dan i noć postaju sve duži. Mnogo biljaka je osetljivo na dužinu fotoperioda i mogu da cvetaju, recimo, samo kada je svetlost određenog intenziteta i trajanja. U zavisnosti od reakcije na dužinu fotoperioda, biljke su klasifikovane u tri grupe: biljke kratkog dana, biljke dugog dana i biljke koje su indiferentne u odnosu na fotoperiod. Biljke kratkog dana imaju fiziološku reakciju kada je dan kraći od noći, dok za biljke dugog dana važi obrnuto.

Deo godine sa određenom dužinom dana je povezan i sa drugim karakteristikama životne sredine kojima su ove biljke morale da prilagode svoj celokupan razvoj. Biljke detektuju svetlost (svetlosni signal) preko lista apsorpcijom fotona, koju vrši hromoprotein fitohrom, i produkuju signal koji pokreće procese u njima, a ovi vode ka sledećoj fazi razvoja. U najznačajnije faze razvoja kojima je svetlost „okidač“ ubrajaju se: cvetanje, tuberizacija i zametanje pupoljaka.

2.4. Uticaj vegetacije na zračenje

Prisustvo vegetacije može značajno da utiče na spektar zračenja i energetski bilans Zemljine površine. Apsorpcioni, reflektivni i transmisioni spektri vegetacije umnogome zavise od njenih morfoloških i fizioloških karakteristika, koje se manje ili više menjaju tokom godine. Biljke apsorbuju 90% upadnog zračenja u fotosintetski aktivnom delu spektra (FAZ): 0,4–0,7 μm, a samo od 15 do 20% u bliskom infracrvenom (IC): 0,7–2,5 μm. Refleksivnost listova biljaka se menja usled prisustva vode na površini biljke (u opsegu 1,5–1,9 μm) ili prisustva vode u listu i biljnom sklopu (u opsegu 0,7–1,5 μm). Promene u apsorpcionom i reflektivnom spektru biljaka su dobar pokazatelj sadržaja vode u biljki, različitih

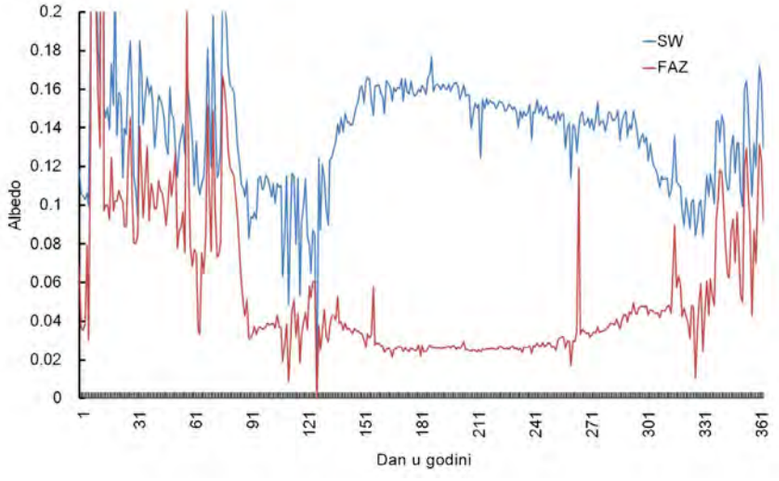
vidova stresa i njenog zdravstvenog stanja, što je ukazalo na mogućnost primene daljinskih i satelitskih merenja u poljoprivredi. Optička svojstva zelenih listova za FAZ, blisko IC zračenje i Sunčevo kratkotalasno zračenje prikazani su u tabeli 2.2.

Tabela 2.2.

Tipične optičke karakteristike zelenih listova

Optičke karakteristike	FAZ	Blisko IC	Sunčevo kratkotalasno
Refleksivnost	0,09	0,51	0,30
Transmitivnost	0,06	0,34	0,20
Apsorptivnost	0,85	0,15	0,50

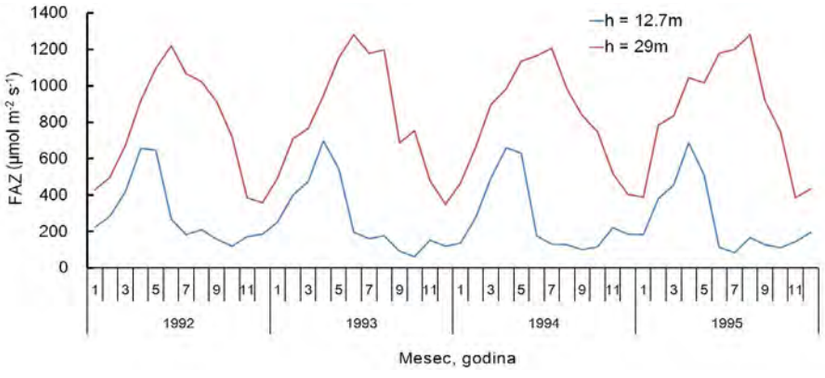
Kako bi sagledali uticaj biljaka na energetski bilans Zemljine površine, potrebno je pomeriti fokus i analizirati procese na nivou celog biljnog sklopa umesto samo jednog lista ili biljke. Primera radi, pri istim atmosferskim uslovima, emisivnost i temperatura golog zemljišta se prilično razlikuju od temperature zemljišta pod vegetacijom, što dovodi do razlike u emitovanom dugotalasnom zračenju sa ove dve površine. Takođe, intenzitet Sunčevog zračenja reflektovanog od površine menja se u prisustvu vegetacije usled promenjenog površinskog albeda. Nasuprot mnogim drugim površinama, vegetacija menja albedo autonomno tokom godine dovodeći do razlike u reflektovanom FAZ-u i Sunčevom zračenju (slika 2.9). Karakteristika biljnog sklopa koja je često korišćena da opiše ovu pojavu jeste indeks lisne površine (engl. leaf area index, LAI), definisan kao površina svih listova po jedinici površine zemlje pokrivene biljkama na kojima su ti listovi. Posmatranje promena LAI-ja omogućava praćenje površinskog albeda tokom godina i obrnuto. Lep primer može da se vidi iz merenja sunčevog albeda i FAZ albeda u Harvardskoj šumi u SAD (slika 2.9). Slične vrednosti globalnog albeda i FAZ albeda su tipične za periode u toku godine kada nema lišća.



Slika 2.9.

Srednje dnevne (samo sredina dana je analizirana 10–14 č.) vrednosti globalnog albeda (SW) i FAZ albeda merenog tokom 2004. iznad šumskog sklopa na Prospekt Hil Traktu u Harvardskoj šumi u SAD (Munger and Wofsy, 2017)

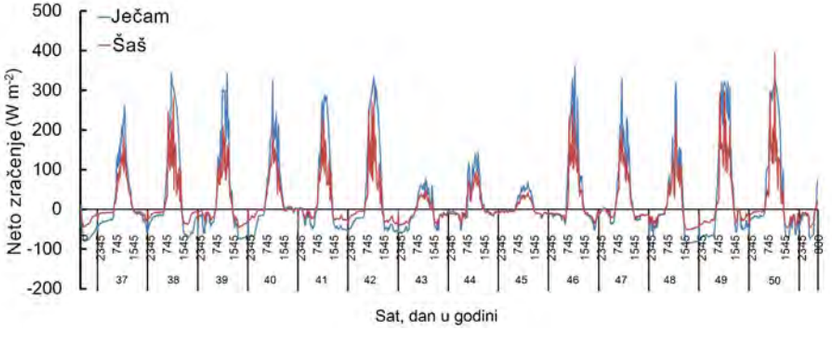
Nagli skokovi u vrednostima albeda u ovom periodu su, najverovatnije, uzrokovani prisustvom snega. U aprilu, kada se listovi pojave, FAZ albedo se smanjuje zato što je apsorpcija FAZ-a povećana. U isto vreme, albedo globalnog zračenja se povećava zato što se povećava površina listova koji reflektuju zračenje. Tokom leta kada su stabla potpuno olistala i krošnja zatvorena, oba albeda su manje-više konstantna. Ova situacija se zadržava sve do septembra, kada lišće počinje da opada. Tada se povećava albedo globalnog zračenja, a smanjuje se FAZ albedo, jer se površina listova i intenzitet fotosinteze smanjuju. Biljni sklop veoma efikasno apsorbuje zračenje. Od zračenja koje stiže na gornju granicu biljnog sklopa, nakon što se jedan deo reflektuje, manje od 10% dolazi do površine tla (slika 2.10). Naravno, iznos zračenja koji će biti apsorbovan u biljnom sklopu umnogome zavisi od vrste vegetacije, njene gustine i strukture, ali i od površine listova i njihove orijentacije. Kao što smo videli, intenzitet apsorbovanog FAZ-a se značajno menja tokom vegetacionog perioda. Kada je LAI maksimalan, šumska krošnja, recimo, može da apsorbuje 80% Sunčevog zračenja.



Slika 2.10.

Srednje mesečne vrednosti FAZ-a merene iznad i inutar krošnje na Prospekt Hil Traktu u Harvardskoj šumi, SAD (Munger and Wofsy, 2017)

Pri istom intenzitetu upadnog Sunčevog zračenja, vrsta biljke i struktura biljnog sklopa mogu značajno da utiču na energetski bilans Zemljine površine (slika 2.11). Čak i tokom zime, kada su u stanju mirovanja, biljke svojim prisustvom i strukturom utiču na komponente energetskog bilansa. Recimo, u slučaju miskantusa (kineski šaš), energetski bilans, meren u februaru 1998 (slika 2.11), tokom dana biva manji nego u slučaju ječma, dok je tokom noći situacija obrnuta. Razlog tome je zemljište potpuno prekriveno vegetacijom, kod sklopa miskantusa, što smanjuje dnevna kolebanja energetskog bilansa, dok u slučaju ječma postoji značajan fluks toplote u zemljište koji dodatno povećava dnevno kolebanje neto zračenja.



Slika 2.11.

Dnevna kolebanja neto bilansa zračenja na površini tla u prisustvu šaša i ječma u Marčfildu (Marchfeld) u Austriji u periodu 5. 2.–20. 2. 1998
[izvor: Institut za meteorologiju, Univerzitet prirodnih i životnih nauka, Beč, Austrija (Universität für Bodenkultur, Vienna) BOKU-Met]

3. Temperatura zemljišta i vazduha

Temperatura tela je mera prosečne kinetičke energije njegovih molekula. Zagrevanje i hlađenje su rezultat razmene energije koja dovodi do povišavanja ili snižavanja temperature. Brzina i veličina promene temperature zavise ne samo od apsorbovane ili emitovane energije već i od toplotnih karakteristika tela.

Zemljište i atmosfera čine okruženje u kojem biljka raste i u kojem se odvija njen životni ciklus. Temperatura biljke je rezultat bilansa zračenja na njenoj površini i razmene energije s okolnim vazduhom – najčešće konvekcijom i emisijom zračenja, kao i sa zemljištem – kondukcijom (provođenjem).

3.1. Toplota, termičke karakteristike tela i temperatura

Toplota je oblik energije. Toplotu telo može apsorbovati ili emitovati, što dovodi do promene temperature.

Termičke karakteristike se uglavnom odnose na fizičke veličine koje opisuju ponašanje tela pod dejstvom toplote: kad opisujemo kako telo skladišti toplotu, govorimo o *toplotnom kapacitetu*; kada želimo da opišemo koliko dobro prenosi toplotu, koristimo *toplotnu provodnost*; a kada želimo da pokažemo koliko dobro telo prenosi temperaturne promene, koristimo *toplotnu difuzivnosti*.

Toplotni kapacitet (C) je merljiva fizička veličina, brojno jednaka energiji koju treba dodati telu ili mu je oduzeti da bi ono promenilo svoju temperaturu za 1 K. S obzirom na to da ova definicija zavisi od samog tela, prilično ju je teško koristiti. Zbog toga se uvode konkretnije karakteristike, kao što su *molarni* (C_n) i *specifični* (C_h) *toplotni kapacitet*, kako bi se kvantifikovala toplota potrebna da se 1 molu, odnosno 1 kg supstance, temperatura poveća za 1 K. Količina energije potrebna za određenu promenu temperature zavisi od toga da li se energija dodaje ili oduzima pod konstantnim pritiskom ili konstantnom zapreminom. U slučaju idealnog gasa, sva energija koja se dodaje pri konstantnoj zapremini pretvara se u kinetičku energiju molekula gasa, što dovodi do povećanja temperature. S

druge strane, ako se energija dodaje pri konstantnom pritisku, biće podeljena na rad utrošen za povećanje zapremine gasa (kako bi se održao konstantan pritisak) i na kinetičku energiju molekula gasa, tj. povišavanje temperature. Prema tome, da bi se postigao isti rast temperature, potrebno je više energije pri konstantnom pritisku nego pri konstantnoj zapremini; drugim rečima, *toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku* (C_p) veći je od *toplotnog kapaciteta pri konstantnoj zapremini* (C_v). Odnos ova dva toplotna kapaciteta obično se označava sa g, što je kod idealnog gasa jednako 5/3. U slučaju realnih gasova, g se blago menja s temperaturom.

Tabela 3.1.

Tipične vrednosti gustine (r), specifičnog toplotnog kapaciteta (C_h), toplotne provodnosti (K_h) i toplotne difuzivnosti (D_h) pojedinih komponenti zemljišta i geoloških formacija

Materijal	ρ (10^3 kg m^{-3})	C_h (10^3 J kg^{-1} K^{-1})	K_h (J m^{-1} s^{-1} K^{-1})	D_h (10^{-6} m^2 s^{-1})
Vazduh	0,00116	1,007	0,025	21,4
Kvarc	2,65	0,84	8,8	3,95
Humus	1,4	1,9	0,25	0,094
Voda	1,00	4,22	0,57	0,14
Led	0,91	2,11	2,2	1,15

Toplotna provodnost (K_h) je karakteristika kojom se opisuje sposobnost supstance da provodi toplotu. Brojno je jednaka energiji prenetoj za 1 s kroz element zapremine jedinične površine (1 m^2) po jedinici dužine (1 m) kada je temperaturna razlika između krajeva tela 1 K. Termička svojstva određenih materijala, kao što je zemljište, zavise od njihove vlažnosti, jer voda ima mnogo veći specifični toplotni kapacitet od ostalih komponenti zemljišta (tabela 3.1). Među različitim tipovima zemljišta, peskovito ima najveću toplotnu provodnost.

Toplotna difuzivnost (D_h) je mera termičke inercije. To je toplotna karakteristika specifična za određeni materijal kojom se meri njegova sposobnost da provodi toplotnu energiju u odnosu na sposobnost da skladišti energiju. Može se izračunati kao odnos toplotne provodnosti (K_h) i *zapreminskog toplotnog kapaciteta* (VHC), a potonji je, zapravo, proizvod gustine (ρ) i specifičnog toplotnog kapaciteta (C_h).

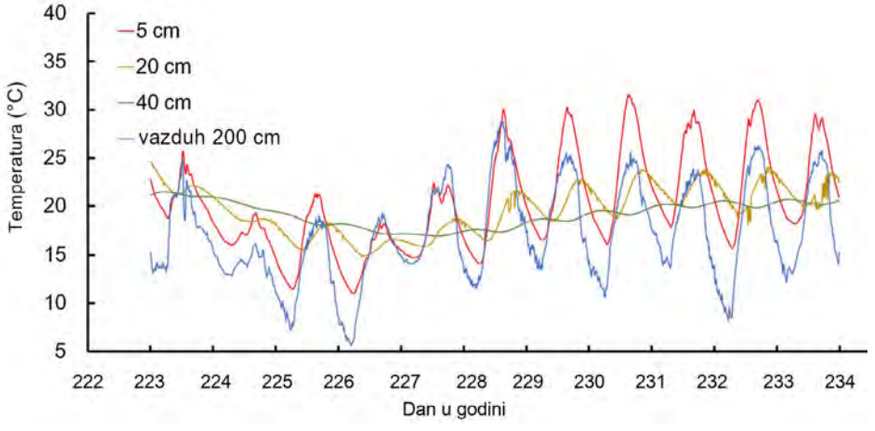
3.2. Zagrevanje i hlađenje zemljišta

Zagrevanje i hlađenje zemljišta je rezultat energetskog bilansa površine zemlje (vidi poglavlje 2.2). Pošto elektromagnetno zračenje ne prolazi kroz zemljište, deo energije koja ostaje na površini nakon refleksije transformiše se u toplotu. Intenzivno zagrevanje površinskog sloja zemljišta i provođenje energije određuju profil temperature zemljišta. Na apsorpciju i provođenje toplote značajno utiču karakteristike površine i zemljišta kao što su *boja* i *hrapavost*, *specifični toplotni kapacitet* i *toplotna provodnost*.

– *Boja i hrapavost*. Tamna površina ima veliku sposobnost apsorpcije, što smanjuje njen albedo. Hrapava površina ima niži albedo u odnosu na glatku površinu istog zemljišta zbog intenzivne apsorpcije zračenja izazvane višestrukom refleksijom i apsorpcijom zračenja na elementima hrapavosti (vidi glavu 2).
– *Specifični toplotni kapacitet*. U odnosu na vodu, zemljište ima manji toplotni kapacitet, što dovodi do bržeg zagrevanja i hlađenja površine zemljišta. Međutim, vlaženjem zemljišta povećava se njegov toplotni kapacitet.
– *Toplotna provodnost*. Vlažnost zemljišta utiče na toplotnu provodnost. Prenos energije od površine do dubljih slojeva zemljišta i obrnuto efikasniji je u vlažnom nego u suvom zemljištu.

Temperatura površine, ili takozvana površinska temperatura, ključni je faktor koji utiče na temperaturu tankog površinskog sloja atmosfere, odgovornog za stvaranje rose i mraza. Temperatura dubljih slojeva zemljišta zavisi od zagrevanja površinskog sloja i karakteristika zemljišta koje utiču na prenos toplote. I zagrevanje i karakteristike zemljišta menjaju se tokom dana i tokom godine, proizvodeći dnevni i godišnji hod temperaturnog profila zemljišta.

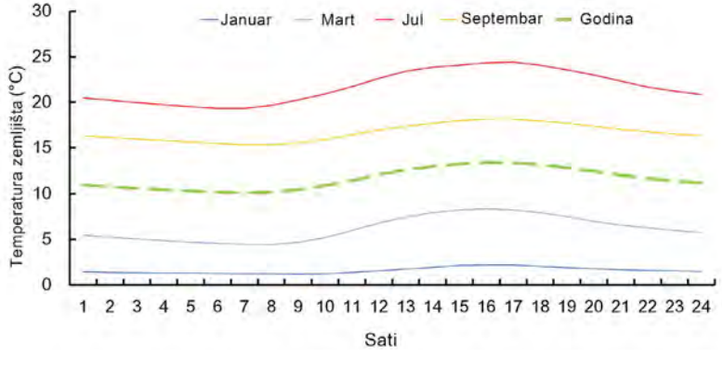
Tokom dana površinski sloj zemljišta dostiže maksimalnu temperaturu približno jedan sat nakon postizanja maksimuma intenziteta Sunčevog zračenja, dok se minimalna temperatura postiže neposredno pre izlaska sunca. Međutim, vremensko zaostajanje u javljanju maksimalne i minimalne temperature zemljišta povećava se s njegovom dubinom. To je vreme potrebno za zagrevanje površinskog sloja i prenos toplote kroz posmatrani stub zemljišta, što u velikoj meri zavisi od njegovog toplotnog kapaciteta. Dnevno kolebanje temperature zemljišta se smanjuje s dubinom dok se ne dostigne dubina konstantne temperature (slika 3.1). U proseku, ovaj nivo javlja se na dubini od 1 m, mada to zavisi od tipa zemljišta i vlažnosti, godišnjeg doba i geografske širine. Dnevni hod temperature zemljišta je sezonski uslovljen, što je posebno vidljivo u površinskom sloju (slika 3.2).



Slika 3.1.

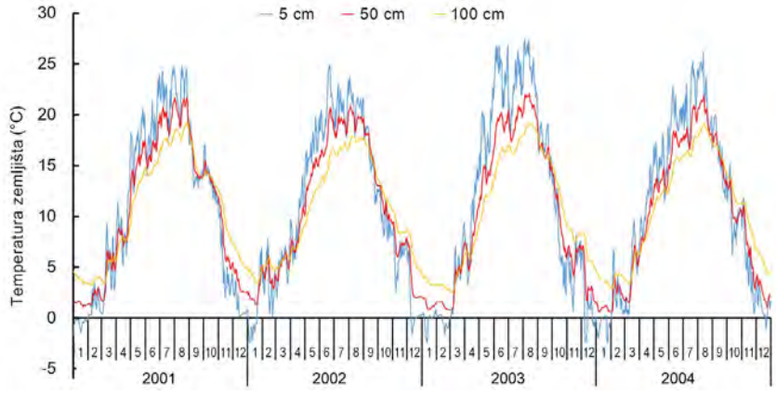
Dnevno kolebanje temperature zemljišta pod travnatim pokrivačem i temperature vazduha tokom leta 2016. u Gogendorfu (Goggendorf), Austrija
[izvor: BOKU-Met]

Zimi su površinsko zagrevanje tokom dana i hlađenje tokom noći manji nego leti, usled kraćeg trajanja i manjeg intenziteta Sunčevog zračenja. Tokom zime je dnevno kolebanje temperature zemljišta manje, dok je leti veće. Takođe, dnevno kolebanje temperature se povećava na manjim geografskim širinama zbog intenzivnog dnevnog zagrevanja i noćnog hlađenja do kojih dolazi kako se približavamo ekvatoru. Prema tome, na manjim geografskim širinama, dubina na kojoj se ostvaruje konstantna dnevna temperatura zemljišta veća je tokom leta.



Slika 3.2.

Sezonsko kolebanje dnevnog hoda temperature zemljišta na dubini od 10 cm u Ridjici, Srbija (2013-2017)
[izvor: Prognozno-izveštajna služba zaštite bilja AP Vojvodine (PIS Vojvodina), Srbija]



Slika 3.3.

Godišnje kolebanje temperature zemljišta pod travnatim pokrivačem u periodu 2001-2004. u Doksaniju (Doksany), Češka Republika
[izvor: Mendelov univerzitet, Brno (Mendelova univerzita v Brně)]

Temperatura zemljišta (slika 3.3) na severnoj hemisferi dostiže godišnji minimum u januaru, a maksimum u julu. Tokom godine kolebanje temperature zemljišta se smanjuje sa dubinom dok se ne dostigne nivo konstantne temperature. Godišnje promene su kumulativni efekat dnevnih promena temperature i zato prodiru značajno dublje u zemljište nego dnevne varijacije.

3.3. Zagrevanje i hlađenje vazduha

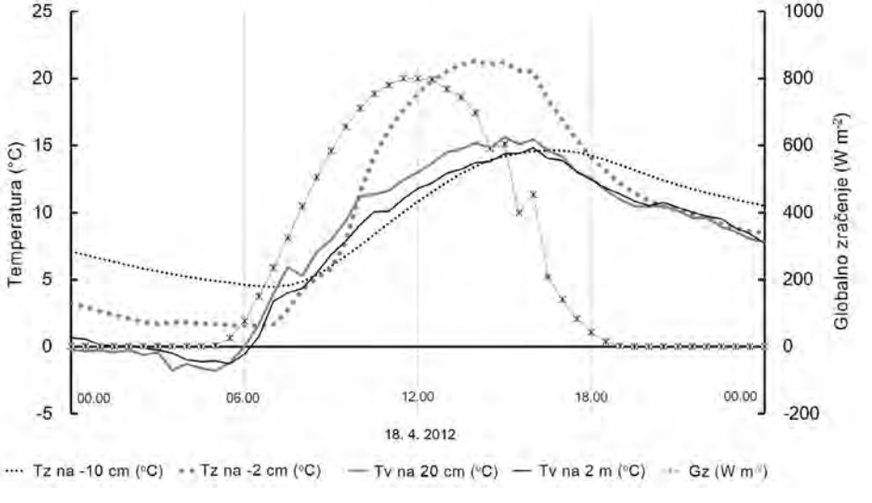
Mehanizmi koji regulišu zagrevanje i hlađenje vazduha su sledeći:

- *provođenje (kondukcija)* – proces razmene energije na molekularnom nivou između površine zemljišta i atmosfere preko tankog sloja vazduha (obično samo nekoliko mm);
- *turbulentno mešanje* – razmena energije (i supstance) između površine zemljišta i atmosfere, kao i između različitih atmosferskih slojeva turbulentnim vrtlozima unutar graničnog sloja atmosfere; debljina ovog sloja varira tokom dana, sa tipičnom vrednošću od 1 km;
- *konvekcija* – uzdizanje toplijeg i spuštanje hladnijeg vazduha, koje se obavlja pod dejstvom sile potiska;
- *zračenje* – prenos energije elektromagnetnim talasima, kojim u slučaju atmosfere dominira apsorpcija Sunčevog zračenja i Zemljinog izračivanja

(vidi poglavlje 2.2); sastav atmosfere može značajno uticati na zagrevanje atmosfere zračenjem;

– *advekcija* – u atmosferi je ovaj vid prenosa energije posledica duvanja vetra iz jedne oblasti u drugu, donoseći vazduh drugačije temperature;
– *isparavanje i kondenzacija* – usled promene agregatnog stanja vode u atmosferi sledi oslobađanje ili vezivanje energije u obliku fluksa latentne toplote; ovaj prenos toplote je važan izvor i ponor energije za atmosferu (23% solarne konstante).

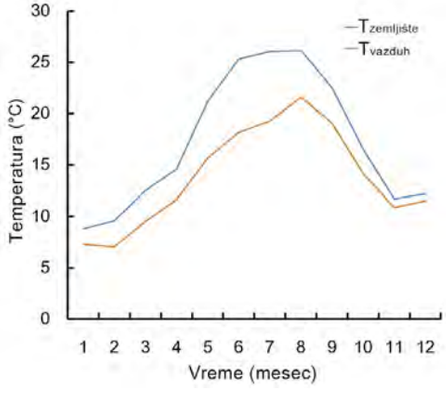
Tokom dana, na visini od nekoliko metara iznad tla, temperatura vazduha dostiže svoj maksimum 2-3 sata nakon maksimuma intenziteta Sunčevog zračenja i 1-2 sata nakon postizanja maksimalne temperature površine zemljišta (slika 3.4). Ovo kašnjenje je posledica činjenice da je potrebno vreme da bi došlo do zagrevanja zemljišta Sunčevim zračenjem i, potom, zagrevanja vazduha Zemljinim izračivanjem. Dnevno kolebanje temperature vazduha zavisi od sledećih faktora: geografske širine, godišnjeg doba (najveće je leti), vrste podloge (najveće je kod peskovitog neobraslog zemljišta ili stena), reljefa i nadmorske visine, oblačnosti (veće je pod vedrim nebom) i vegetacionog pokrivača (veće je u slučaju neobraslog zemljišta). Međutim, dnevno kolebanje temperature vazduha niže je iznad vode (nikad ne prelazi 1,7 °C) nego iznad kopna.



Slika 3.4.

Dnevno kolebanje intenziteta globalnog zračenja (G_z), temperature vazduha (T_v) i temperature zemljišta (T_z) u Gros-Enzersdorfu (Groß-Enzersdorf), Austrija
[izvor: BOKU-Met]

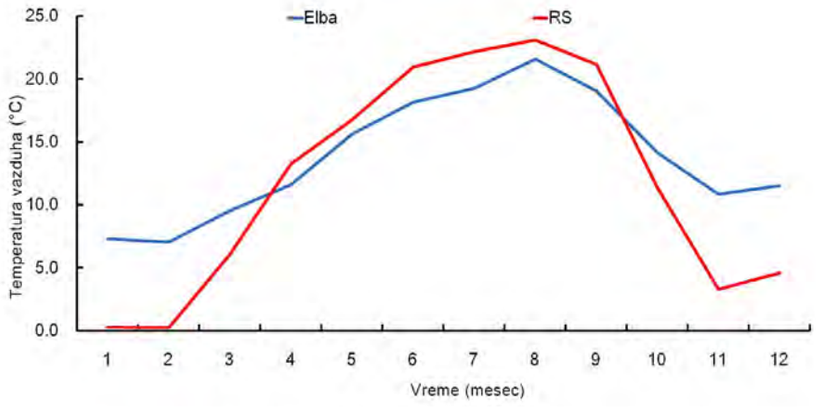
Godišnji hod temperature vazduha prati godišnji hod temperature podloge (slika 3.5). Najveće godišnje kolebanje u maritimnom vazduhu je do 20 °C, dok u kontinentalnim oblastima dostiže i 60 °C. Godišnje kolebanje temperature vazduha zavisi od sledećih faktora: geografske širine, vrste podloge (najveće je kod peskovitog neobraslog zemljišta ili stena), nadmorske visine, oblačnosti (veće je pod vedrim nebom) i vegetacionog pokrivača (veće je u slučaju neobraslog zemljišta).



Slika 3.5.

Godišnje kolebanje srednje mesečne temperature vazduha i zemljišta za period 2005-2011. na Elbi (L'Isola d'Elba), Italija [izvor: Regionalni hidrometeorološki zavod Toskane (Servizio Idrologico della Regione Toscana)]

Prisustvo velikih vodenih površina može značajno uticati na dnevno i godišnje kolebanje temperature vazduha. Usled većeg toplotnog kapaciteta vode, okeani tokom godine akumuliraju 16 puta više energije nego kopna. Zbog toga se voda sporije zagreva tokom proleća i leta, a sporije hladi u jesen i zimu. Tokom zime, temperatura vazduha iznad vode i kopnenih područja koja su pod uticajem vodenih površina uvek je viša nego temperatura vazduha iznad područja koja su u unutrašnjosti; s druge strane, temperatura vazduha iznad vode i područja pod uticajem vodenih površina niža je leti, s mnogo manjim dnevnim i godišnjim kolebanjima (slika 3.6).



Slika 3.6.

Godišnje kolebanje mesečne temperature vazduha tokom 2011. na Elbi, Italija i Rimskim šančevima, Srbija [izvor: Regionalni hidrometeorološki zavod Toskane i Republički hidrometeorološki zavod Srbije]

3.4. Uticaj temperature zemljišta i vazduha na biljke

Temperatura zemljišta i rast. Od setve do žetve, toplota i/ili temperatura su katalizatori mnogih fizioloških procesa od kojih zavisi razvoj biljaka. Temperatura zemljišta utiče na rast biljaka, kako direktno, tako i indirektno. Kod useva se kao direktan javlja uticaj temperature okoline na klijanje semena i, kasnije, njihovo nicanje. Minimalna temperatura za klijanje žitarica je oko 4 °C, dok je optimalna temperatura oko 20 °C. Indirektni uticaj je rezultat uticaja temperature zemljišta na rast korena i uzimanje vode i hranjivih materija iz zemljišta. Hlađenje zemljišta usporava fiziološke procese, a povećava rizik da buduće biljke neće biti dovoljno snažne. Zajedničkim dejstvom temperature i vlažnosti zemljišta otpočinje klijanje semena, stvaranje pupoljaka na drveću i pojavljivanje lišća u šumi. Donje granične temperature za klijanje semena pojedinih useva prikazane su u tabeli 3.2.

Tabela 3.2.

Granične temperature zemljišta za klijanje semena pojedinih useva

Vrsta	Minimalna temperatura (°C)	Optimalna temperatura (°C)	Maksimalna temperatura (°C)
Ječam	3–4	20	28–30
Raž	1–2	25	30
Pšenica	3–4	25	30–32
Suncokret	3	28	35
Kukuruz	8–10	32–35	40–44

Temperatura vazduha i rast. U skladu s tipičnim razvojnim procesima, životni ciklus živih organizama podeljen je na faze rasta. Generalno, temperatura utiče na otpočinjanje ovih faza i određuje njihovo trajanje. Tipične temperature, koje se obično povezuju sa biljnom proizvodnjom, ali su potpuno primenljive na sve žive organizme, mogu se podeliti na kardinalne (minimalna, optimalna i maksimalna) i letalne (minimalna i maksimalna). Razlika između ova dva opsega se odnosi na potencijal biljke da se oporavi. Kada je reč o rasponu kardinalnih temperatura, biljka može da oživi čak i ako je van optimalnog opsega. Nasuprot tome, ako temperatura prelazi letalne granice, oporavak nije moguć. I kardinalne i letalne temperature specifične su za svaku vrstu, fazu rasta i lokalitet. U nastavku ovog poglavlja biće reči o uticaju temperature vazduha na biljke, ali se isti principi mogu primeniti na sve žive organizme.

Tabela 3.3.

Granične vrednosti temperature vazduha (°C) za pšenicu (indeksom *b* su označene izuzetno uzete vrednosti temperature zemljišta) (Porter and Gawith, 1999)

		Komponente		Fenofaze					
Temperatura	Letalni limiti	Početak razvoja lista	Rast izdanka	Rast korena	Od setve do nicanja	Vernalizacija	Vršni klasić	Cvetanje	Nalivanje zrna
Letalni minimum	-17,2			-20					
Letalni maksimum	47,5								
Kardinalna		-1,0	3,0	2,0[b]	3,5	-1,3	1,5	9,5	9,2
Optimalna		22,0	20,3	<16,3[b]	22,0	4,9	10,6	21,0	20,7
Maksimalna		24,0	>20,9	>25,0[b]	32,7	15,7	>20,0	31,0	35,4

Kardinalne temperature (tabele 3.3 i 3.4) definisane su na sledeći način:

- bazična temperatura (ili temperatura biološkog minimuma, Tb) predstavlja najnižu temperaturu pri kojoj metabolički procesi dovode do povećanja neto mase biljke;
- optimalna temperatura se nalazi u opsegu temperatura između gornje i donje granične vrednosti (temperaturni prag) i predstavlja temperaturu koja pruža optimalne uslove za razvoj biljaka. Donja granična vrednost je minimalna temperatura potrebna za otpočinjanje određene fenološke faze. Na temperaturama ispod donje granice prekida se rast biljaka. Kada temperatura poraste iznad ovog minimuma, biljka nastavlja s rastom bez oštećenja ili gubitka prinosa;
- maksimalna temperatura je gornja granična temperatura pri kojoj prinos zrna pada na nulu (Hatfield et al., 2008). Ova temperatura je iznad optimalne, ali i ispod maksimalne letalne temperature.

Tabela 3.4.

Granične vrednosti temperature (°C) za različite gajene vrste (indeks *a* se odnosi na kardinalne temperature koje mogu da se primene i na druge fenofaze)

Biljka	Letalni minimum	Kardinalna	Optimalna	Maksimalna
Ječam	−17,3 ~ −12,9			
Kukuruz		33 ~ 38 (intenzitet fotosinteze)	35 (održivost polena)	
Paradajz		7 (intenzitet pojave listova, intenzitet rasta i razvića do cvetanja) 6–8 (fotosinteza) 5,7 (razvoj i sazrevanje ploda)	22 (intenzitet pojave listova, intenzitet rasta i razvića do cvetanja) 30 (fotosinteza) 26 (razvoj i sazrevanje ploda) 22 ~ 25 (tempo razvoja plodova) 17 ~ 18 (dimenzija ploda)	35[a] (vegetativni rast)
Soja		6 (period do cvetanja) 13,2 (klijanje polena) 12,1 (rast polenove cevi)	26 (period do cvetanja) 23 (period posle cvetanja, prinos) 30,2 (klijanje polena) 36,1 (rast polenove cevi)	39 (tempo rasta zrna, dimenzije zrna, žetveni indeks) 47,2 (klijanje polena) 47,0 (rast polenove cevi)

Letalne maksimalne i minimalne temperature (tabela 3.4) odnose se na kritične temperature iznad i ispod kojih se određena biljka ne može oporaviti. Ako temperatura vazduha, tj. temperatura biljke prelazi jedan ili drugi prag, biljka će uvenuti ili pretrpeti značajnu štetu. Stres prouzrokovan niskim temperaturama, bilo da se radi samo o temperaturama ispod bazične (0–15 °C), bilo o mrazu (ispod 0 °C), jedan je od glavnih faktora okruženja koji utiču na rast i produktivnost useva. Temperature ispod 0 °C su kritične za sve biljke zbog zamrzavanja vode u biljnom tkivu. Kako jedino voda povećava svoju zapreminu pri mržnjenju, led ima veću zapreminu od vode. Kada se stvori, on oštećuje tkivo biljke. Međutim, kod nekih biljaka, čak i temperature znatno iznad 0 °C mogu biti kritične i uzrokovati oštećenja od hladnoće. (Više o uticaju niskih temperatura na biljke može se pronaći u poglavlju 9.3, u kom se govori o mrazu i štetama od mraza.)

Pri temperaturama iznad gornje granične vrednosti razvoj biljke se prekida, a u nekim slučajevima se mogu očekivati oštećenja. Stres prouzrokovan visokom temperaturom definisan je kao rast temperature iznad kritične vrednosti (mak-

simalne temperature) koji traje dovoljno dugo da može izazvati nepopravljiva oštećenja u rastu i razvoju biljke. Stepen oštećenja u velikoj meri zavisi od faze razvoja biljke, trajanja visokih temperatura, kolebanja dnevne temperature i brzine promene temperature. Brojna eksperimentalna istraživanja utvrdila su da je uticaj visokih temperatura veći ukoliko je biljka izložena velikom kolebanju dnevne temperature, uz naglo (npr. 6 °C h^{-1}), a ne postepeno povišavanje temperature. Efekat visokih temperatura u odnosu na fazu rasta zavisi od same biljke. U slučaju pšenice, na primer, efekat izloženosti visokoj temperaturi na prinos zrna je veći u periodu pre cvetanja nego posle njega. U ekstremnim slučajevima čak 97% varijacije prinosa može se pripisati razlikama u broju zrna po kvadratnom metru, što je usko povezano s maksimalnom temperaturom tokom perioda od 4 dana, kada se odigra i 50% cvetanja. Temperatura vazduha iznad 30 °C je posebno opasna za kukuruz 8 do 10 dana nakon cvetanja, jer smanjuje kapacitet zrna za asimilative i njegov prinos. U poređenju sa režimom nižih temperatura (22–30 °C), rast soje pri visokim temperaturama vazduha (30–38 °C) može dovesti i do 34% smanjenja u produkciji polena, 56% u klijanju polena i 33% u izduživanju polenove cevi. Prinos semena soje pri punoj zrelosti je posebno osetljiv na visoke temperature u fazi kasnog cvetanja i nalivanja zrna. U nekim istraživanjima je dobijeno smanjenje prinosa od 29% pri povećanju temperature za 10 °C tokom osam dana ovog perioda. Ako je paradajz izložen visokim temperaturama (26–32 °C) u toku vegetacije, broj plodova po biljci može se smanjiti za 90% u poređenju s rastom pri umerenim temperaturama (22–28 °C).

Akumulisani stepen-dani (DD)[10], ili stepen-dani potrebni za rast (GDD)[11], uobičajeno se koriste za opisivanje potreba živog organizma za toplotom, ali i za procenu brzine razvoja organizma pod određenim termičkim uslovima. U literaturi se još koristi i izraz „temperaturna suma". Za određenu biljnu vrstu i fazu rasta stepen-dani su jednaki energiji potrebnoj da se obavi „čitav komplet" procesa karakterističnih za datu fazu razvoja. Ova veličina predstavlja zbir temperaturnih razlika između srednje dnevne i temperature biološkog minimuma (tabela 3.5). U proizvodnji i zaštiti bilja stepen-dani su uobičajen način za procenjivanje dinamike razvoja biljaka i štetnih organizama, zatim za planiranje aktivnosti kao što su navodnjavanje, đubrenje i praćenje razvoja štetočina i bolesti, kao i za preduzimanje zaštitnih mera. (U delu „Numerički primeri", ove knjige, data su objašnjenja o izračunavanju stepen-dana.)

[10] engl. degree days, DD
[11] engl. growing degree days, GDD

Tabela 3.5.
Akumulisani stepen-dani tokom vegetacionog perioda različitih biljnih vrsta (Ahrens, 2010)

Biljna vrsta (lokacija)	T_b (°C)	Akumulisani stepen dani tokom vegetacionog perioda
Pasulj (Južna Karolina)	10	650-705
Kukuruz šećerac (Indiana)	10	1200-1500
Pamuk (Arkanzas)	15,5	1040-1380
Grašak rani (Indiana)	4,4	600-650
Pirinač (Arkanzas)	15,5	930-1150
Pšenica (Indiana)	4,4	1150-1320

Temperatura i rast biljaka. Energetski bilans biljnog sklopa i temperatura biljaka, kao njegova posledica, zavise od vrste biljke i faze rasta, kao i od morfoloških i aerodinamičkih karakteristika biljnog sklopa: indeksa lisne površine (LAI), vegetacionog pokrivača (udeo zemljišta pokrivenog biljkama), visine hrapavosti, visine ravni nultog pomeranja (poslednje dve veličine su objašnjene u glavi 6).

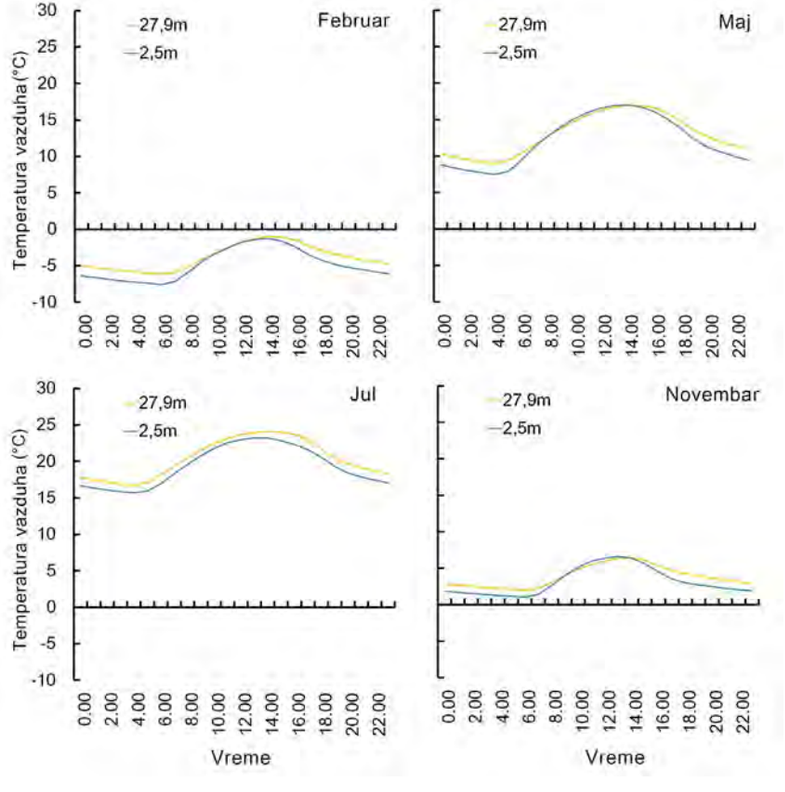
Tip biljke i faza razvića utiču na temperaturu biljke uglavnom preko flukseva osetne i latentne toplote (intenzitet evapotranspiracije). Prilagođavajući se svom okruženju, biljka razvija veličinu i nagib lišća (koji utiču na upadno Sunčevo zračenje i odlazni fluks osetne toplote), kao i otpornost stoma (utičući na transpiraciju). Sve ove karakteristike mogu značajno da izmene energetski bilans biljnog sklopa. Pored toga, tokom faze intenzivnog rasta i proizvodnje biomase, biljka teži da poveća brzinu svih procesa razmene, a posebno transpiracije.

Morfološke i aerodinamičke karakteristike biljnog sklopa, kao što su indeks lisne površine i vegetacioni pokrivač, utiču na raspodelu energije povećavanjem flukseva kako sa golog zemljišta za male vrednosti LAI-ja, tako i sa vegetacionog pokrivača. S druge strane, velike vrednosti LAI-ja povećavaju fluks latentne toplote u jednačini energetskog bilansa.

U slučaju različitih struktura biljnih sklopova i samih biljaka, pri istom intenzitetu upadnog Sunčevog zračenja mogu se očekivati različite temperature biljaka. Još je važnija činjenica da se temperatura biljke može značajno razlikovati od temperature vazduha unutar i iznad biljnog sklopa. Tokom dana razlike u temperaturi vazduha unutar i iznad biljnog sklopa mogu biti još izraženije. Razvoj lisne površine tokom godine značajno utiče na ove razlike u temperaturi (slika 3.7). Tokom zime, kada su stabla bez lišća, razlika u temperaturi je rezultat tipične promene temperature vazduha sa visinom. U julu, kada je krošnja u potpunosti olistala i ponaša se kao barijera između biljnog sklopa i atmosfere,

krive koje opisuju dnevnu varijaciju temperature vazduha su gotovo paralelne, ilustrujući zanemarljivo mešanje vazduha između ove dve sredine.

Fiziološki procesi i temperatura biljaka. Prema Van Hofovom pravilu, sa svakim povećanjem temperature za 10 °C udvostručuje se brzina hemijskih procesa. U slučaju biljaka ovo pravilo važi sve dok se ne dostigne gornja granična temperatura. Iznad ove temperature neki procesi slabe, a neki se prekidaju. Najvažniji fiziološki procesi biljaka regulisani temperaturom su fotosinteza, disimilacija, transpiracija i asimilacija hranljivih materija.



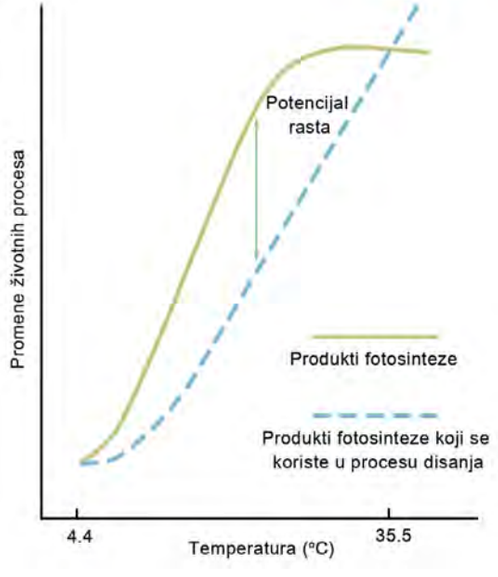
Slika 3.7.

Dnevno kolebanje srednje časovne temperature vazduha unutar i iznad biljnog sklopa u periodu 1991–2005. na Prospekt Hil Traktu u Harvardskoj šumi, SAD (Munger and Wofsy, 2017)

Fotosinteza. Odvija se u hloroplastu. Koristeći vodu i hranljive materije iz zemlje, kao i ugljen-dioksid iz vazduha, u prisustvu hlorofila i Sunčevog zračenja (FAZ deo), biljka proizvodi skrob, ugljene hidrate i proteine, a oslobađa kiseonik.

Intenzitet fotosinteze je u značajnoj meri uslovljen temperaturom i intenzitetom FAZ-a. Važna karakteristika ovog procesa je zasićenost. Pri određenom intenzitetu FAZ-a i graničnoj temperaturi vazduha više ne dolazi do povećanja intenziteta fotosinteze. Povećanje temperature vazduha iznad granične vrednosti uzrokuje smanjenje intenziteta fotosinteze.

Disanje. Koristeći kiseonik iz vazduha, biljka pretvara šećere u energiju, otpuštajući ugljen-dioksid i vodu. Disanje se odvija u mraku, kao i na svetlosti, a brzina disanja se povećava sa povećanjem temperature. Potrošnja proizvoda fotosinteze tokom respiracije smanjuje potencijal rasta biljaka. Tokom dana fotosinteza nadmašuje disanje (respiraciju) ako je temperatura vazduha ispod kritične temperature (slika 3.8). Iznad ove temperature, utrošak produkata fotosinteze prevazilazi proizvodnju, što prekida rast biljke i smanjuje biomasu.



Slika 3.8.

Primer uticaja temperature na intenzitet fotosinteze i respiracije

Usvajanje vode i hranljivih materija. Temperatura zemljišta može značajno uticati na kretanje vode i hranljivih materija iz zemljišta kroz korenov sistem, odražavajući se na hidrauličnu provodnost zemljišta i propustljivost korena. Najvažnije funkcije korena – apsorpcija vode i hranljivih materija – uslovljene su temperaturom. Ona utiče i na pasivnu i na aktivnu apsorpciju vode, povećavajući kako propustljivost ćelijske membrane, tako i metaboličku aktivnost. Porastom

temperature od 13 do 28 °C udvostručava se apsorpcija vode putem korena. Porast temperature od 5 do 22 °C kao rezultat ima sedmostruko povećanje unošenja vode kod graška. Istraživanja o uticaju temperature na usvajanje azota ukazuju na to da se amonijum jon (NO_4^+) apsorbuje lakše od nitratnog jona (NO_3^-) na niskim temperaturama. Povećanje sadržaja kalijuma javlja se sa povećanjem temperature. Isto važi i za fosfor i druge hranljive materije.

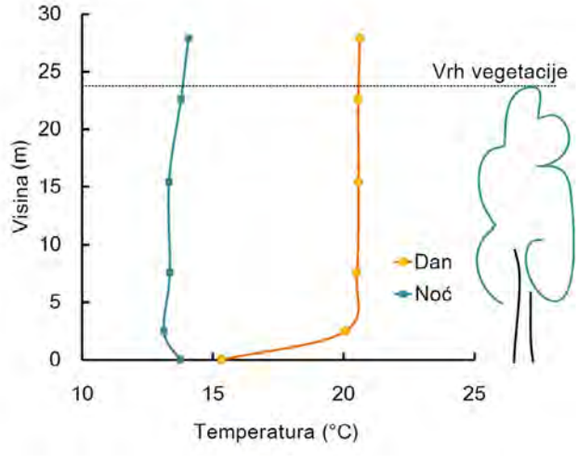
Transpiracija. Ona upravlja procesom razmene vode između unutrašnjosti biljke i atmosfere kroz stome koje kontrolišu usvajanje i transport vode i mineralnih materija, turgorski pritisak i hlađenje biljaka. Svaki korak u ovom procesu je u velikoj meri uslovljen temperaturom zemljišta ili vazduha. Međutim, najveći uticaj je povezan s otpornošću stoma i nedostatkom vode u okolnom vazduhu. Na visokim temperaturama biljke i u uslovima suvog vazduha, stome su obično zatvorenije i povećavaju svoju otpornost kako bi biljka smanjila gubitke vode. (Ova tema biće detaljnije razmatrana u glavi 4, koja je posvećena vodnom bilansu.)

3.5. Uticaj vegetacije na temperaturu zemljišta i vazduha

Vegetacija utiče na strukturu zemljišta i površinskog sloja atmosfere, kao i na energetski bilans površine zemlje, a time i na temperaturu zemljišta i vazduha. Korenov sistem biljaka menja strukturu zemljišta, a samim tim i njegove termičke i hidrauličke karakteristike. Pojava i rast vegetacije tokom sezone uvodi novi entitet u atmosferski površinski sloj – vazdušni prostor biljnog sklopa. Menjajući svakodnevno svoje morfološke i aerodinamičke karakteristike, vazdušni prostor biljnog sklopa je donja granica atmosfere, sa specifičnim energetskim i turbulentnim transferom koji se u velikoj meri razlikuje od onog koji se obavlja u ostatku atmosfere, iznad biljnog sklopa. Vazduh unutar biljnog sklopa je značajan izvor i ponor toplote, vodene pare i količine kretanja, čije prisustvo utiče na energetski i vodni bilans u atmosferi, povećava trenje podloge i potisak.

Iz aspekta temperature zemljišta i vazduha, najvažniji uticaj vazduha unutar biljnog sklopa na energetski bilans obavlja se sledećim mehanizmima:

- promenom komponenti energetskog bilansa tako što prisustvo biljnog sklopa menja fluks toplote u zemljište i intenzitet reflektovanog zračenja (albedo zavisi od fenološke faze);
- uvođenjem u energetski bilans površine, kratkotalasnog i dugotalasnog zračenja koje biljke odbijaju i apsorbuju, kao i dugotalasnog zračenja koje biljke emituju;
- razmenom fluksa osetne i latentne toplote između površine biljaka i okolnog vazduha.



Slika 3.9.

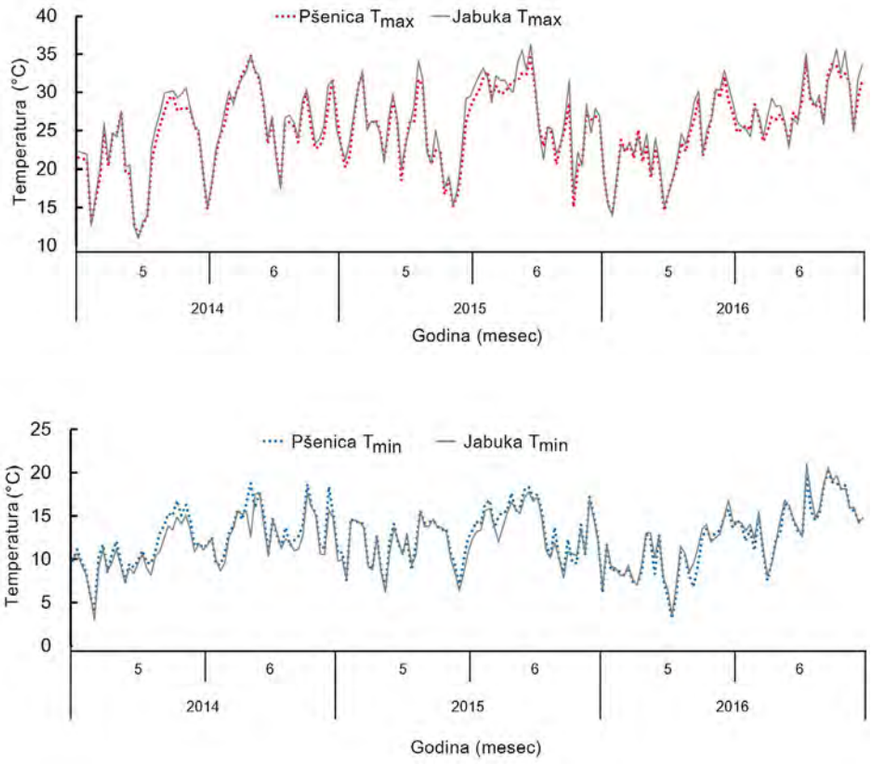
Vertikalni profil srednje časovne temperature vazduha tokom dana (6–18 sati) i noći (21–4 sata ujutro) u junu u periodu 1991–2015. na Prospekt Hil Traktu u Harvardskoj šumi, SAD (Munger and Wofsy, 2017)

Temperatura zemljišta, biljaka i vazduha unutar biljnog sklopa su rezultat energetskog bilansa na površini biljnog sklopa, vazduha unutar biljnog sklopa i površine zemlje. Elektromagnetno zračenje može prodreti kroz površinu biljnog sklopa, što nije slučaj sa zemljištem. Intenzivno oslabljen na putu do tla, samo 2–10% dolaznog Sunčevog zračenja stiže do površine zemljišta unutar sklopa i zagreva je. Značajno je da smanjeni fluks toplote u zemljište (u poređenju sa neobraslim zemljištem), u kombinaciji sa strukturom zemljišta koja se neprestano menja i uslovima vezanim za vegetaciju na površini zemlje, smanjuje temperaturu zemljišta, kao i njeno dnevno i godišnje kolebanje.

Unutar biljnog sklopa, najveći deo Sunčevog zračenja apsorbuje vegetacija, koristeći ga za zagrevanje biljaka i procese fotosinteze. Ova apsorpcija zračenja dovodi do opadanja temperature vazduha od vrha sklopa do tla. Noću, kada samo dugotalasno zračenje doprinosi energetskom bilansu, dugotalasno zračenje Zemlje obično preovladava u odnosu na atmosfersko zračenje, stvarajući temperaturni profil suprotan onom koji se sreće tokom dana. Više temperature javljaju se bliže tlu, dok na površini biljnog sklopa temperatura vazduha dostiže svoj minimum, usled intenzivnog izračivanja.

Prisustvo vegetacije smanjuje dnevno i godišnje kolebanje temperature vazduha. Smanjenje gustine i visine vegetacije povećava godišnje kolebanje temperature zemljišta, stvarajući mnogo manji uticaj na amplitudu temperature vazduha.

Međutim, izvesne razlike mogu da se uoče kada se radi o ekstremnim temperaturama. Primera radi, tokom dugogodišnjih merenja uočeno je prisustvo većih dnevnih kolebanja temperature vazduha u voćnjacima nego u usevima (slika 3.10). Razlog tome jeste manja gustina sklopa i prekrivenost tla vegetacijom koja u voćnjacima ostavlja mogućnost bolje razmene energije između tla i atmosfere, a time i intenzivnije grejanje tla i vazduha tokom letnjih meseci.



Slika 3.10.

Varijacija maksimalne i minimalne temperature vazduha u zasadu jabuke na Čeneju, Srbija i pšenice u Kaću, Srbija [izvor: PIS Vojvodine]

4. Vlažnost vazduha

Vlažnost vazduha je posledica kruženja vode u prirodi. U brojnim faznim prelazima voda se transformiše iz leda u tečnost, od tečne faze u vodenu paru i obrnuto, obezbeđujući izvore i ponore atmosferske vlage. Uloga biljaka u kruženju vode u prirodi je isto toliko važna kao i uloga vode u životnom ciklusu biljaka.

4.1. Elementi vlažnosti vazduha

Veličine koje se obično koriste za opisivanje vlažnosti vazduha su sledeće: a) pritisak vodene pare; b) pritisak zasićene vodene pare; c) deficit vodene pare; d) tačka rose; e) relativna vlažnost vazduha; f) specifična vlažnost vazduha i g) apsolutna vlažnost vazduha.

Pritisak vodene pare (e). U smeši gasova kao što je atmosfera, pritisak vodene pare je parcijalni pritisak vodene pare u vazduhu koji je u ravnotežnom stanju s ledom ili vodom. Ovaj pritisak zavisi od količine vodene pare u atmosferi, temperature i atmosferskog pritiska i izražava se u paskalima (Pa). U starim izvorima podataka pritisak je izražen u milibarima (mb) te je korisno znati da je 1 mb vredi 100 Pa.

Pritisak zasićene vodene pare (E) ili maksimalni pritisak vodene pare. Ako je količina vodene pare u vazduhu dovoljna da pokrene kondenzaciju na datoj temperaturi, onda je vazduh zasićen, a pritisak vodene pare u vazduhu dostiže svoju maksimalnu vrednost. Ova vrednost zavisi isključivo od temperature. Ukoliko je temperatura viša, vazduh može da primi više vodene pare pre nego što postane zasićen. Podrobnije o ovom fenomenu može se pronaći u pratećoj publikaciji sa materijalom za dodatno čitanje[12].

Deficit vodene pare (d). Razlika između pritisaka zasićene i nezasićene vodene pare na datoj temperaturi obično se koristi za opisivanje suvoće vazduha, tj.

[12] „Agrometeorološko modeliranje – abiotički stres i produktivnost biljaka"

toga koliko dodatne vodene pare (izraženo u jedinicama pritiska) vlažni vazduh može da usvoji pre nego što postane zasićen.

Tačka rose (T_d). Ako je vazduh zasićen vodenom parom, njegova temperatura se naziva tačka rose jer dalji pad temperature dovodi do kondenzacije i formiranja rose. Ova temperatura varira u zavisnosti od atmosferskog pritiska i vlažnosti vazduha.

Relativna vlažnost vazduha (r). Obično se koristi za opisivanje vlažnosti vazduha u odnosu na stanje zasićenja. Definiše se kao odnos pritiska vodene pare i maksimalnog pritiska vodene pare na datoj temperaturi, a izražava u procentima.

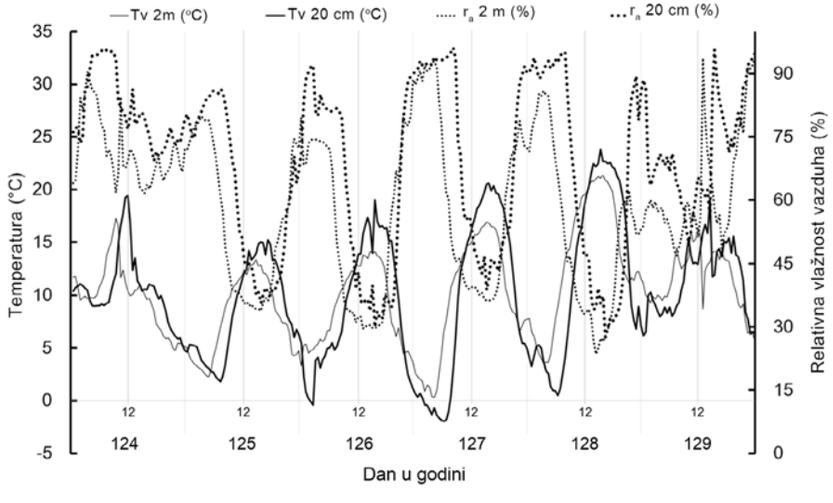
Specifična vlažnost (q) i *apsolutna vlažnost* (a) *vazduha*. Masa vodene pare u jedinici mase ili jedinici zapremine vlažnog vazduha koristi se za definisanje specifične (g kg^{-1}) ili apsolutne (kg m^{-3}) vlažnosti vazduha.

Godišnje i dnevne varijacije energetskog bilansa, kao i temperature vazduha i tla utiču na vodni ciklus, a time i na kolebanje vlažnosti vazduha. Obično se kolebanje pritiska vodene pare i relativne vlažnosti analiziraju na različitim vremenskim i prostornim razmerama.

Lokacija, u zavisnosti od toga da li je primorska ili kontinentalna, određuje dnevno kolebanje pritiska pare. Iznad slobodne vodene površine, koja je neograničeni izvor vodene pare, dnevno kolebanje pritiska pare je u skladu s kolebanjem temperature vazduha koja reguliše „dotok" vodene pare preko procesa isparavanja. Shodno tome, u primorskim uslovima (i kontinentalnim, tokom zime) vodena para u vazduhu dostiže maksimalni pritisak u 14 č., a minimalan pri izlasku sunca. Tokom leta, duboko u kontinentu na srednjim geografskim širinama, dnevno kolebanje pritiska vodene pare ima dva minimuma (u 4. i 15 č.) i dva maksimuma (u 9 i 21 č.). Šta dovodi do toga? Ujutru, neposredno pre izlaska sunca (4 č.), energetski bilans Zemljine površine i temperatura vazduha su na dnevnom minimumu, što vodi do minimalnog isparavanja i minimalnog „dotoka" vodene pare u atmosferu. Kako se nakon izlaska sunca povećava energija koja stiže do površine Zemlje, povećavaju se i intenzitet isparavanja i količina vodene pare u vazduhu iznad površine koja isparava. Tokom prvih nekoliko sati posle izlaska sunca, kada je vertikalni transfer u atmosferi još uvek prilično slab, akumulacija vodene pare u prizemnom sloju vazduha se nastavlja i pritisak vodene pare se povećava do (jedne) svoje maksimalne dnevne vrednosti koju dostiže obično oko 9 č. Tokom dana, temperatura zemljišta i vazduha raste uzrokujući vertikalni (turbulentni) transfer vodene pare od tla ka višim slojevima atmosfere. Ovime se smanjuje njena količina u površinskom sloju atmosfere sve do (jedne) minimalne vrednosti u rano popodne (15 č.), što se poklapa s maksimumom turbulentnog transporta. Kako se vertikalni transport smanjuje kada sunce počne da zalazi, akumulacija vodene pare u površinskom sloju vazduha ponovo se intenzivira, stvarajući drugi maksimum pritisak vodene pare (21 č.) u toku dana.

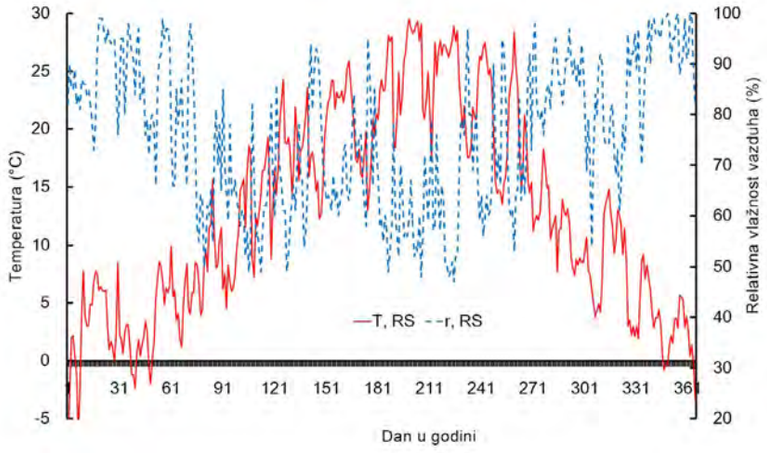
Zanimljivo je da sadržaj vodene pare u vazduhu dostiže svoj maksimum iako se intenzitet isparavanja smanjuje zbog smanjenja intenziteta dolaznog zračenja i temperature zemljišta i vazduha. Očigledno je da smanjeno odvođenje vodene pare nadmašuje efekat smanjenog dovođenja. Na godišnjem nivou, pritisak vodene pare je u skladu s kolebanjem temperature vazduha.

Dnevno kolebanje relativne vlažnosti vazduha je direktna posledica načina na koji je relativna vlažnost definisana i činjenice da pritisak zasićene vodene pare zavisi isključivo od temperature vazduha. S obzirom da je relativna vlažnost vazduha obrnuto proporcionalna pritisku zasićene vodene pare, i da je uvek veća od pritiska vodene pare, jasno je da će dnevno (slika 4.1) i godišnje (slika 4.2) kolebanje relativne vlažnosti uvek biti obrnuto proporcionalno kolebanju temperature. Slika 4.1 ilustruje neke od argumenata koji su izneseni prilikom objašnjenja dnevnog kolebanja pritiska vodene pare. Tokom noći razlike u vlažnosti vazduha unutar i iznad biljnog sklopa nisu značajne. Nakon izlaska sunca relativna vlažnost vazduha na 2 m visine



Slika 4.1.

Dnevno kolebanje temperature i relativne vlažnosti vazduha unutar i iznad travnatog sklopa tokom maja 2011. u Gros-Enzersdorfu, Austrija [izvor: BOKU-Met]



Slika 4.2.

Godišnje kolebanje temperature i relativne vlažnosti vazduha tokom 2015. na Rimskim šančevima, Srbija [izvor: Republički Hidrometeorološki zavod Srbije]

počinje da opada zbog porasta temperature; nasuprot ovome, na 20 cm od tla relativna vlažnost vazduha nastavlja da raste iako je temperatura i na ovoj visini počela da raste. Ovaj efekat je posledica intenzivnog isparavanja s površine tla (i mogućeg formiranja rose) koje može značajno da poveća vlažnost vazduha u biljnom sklopu ujutru, prevazilazeći na taj način uticaj temperature na relativnu vlažnost vazduha.

Globalna raspodela vlažnosti vazduha je određena globalnim zagrevanjem Zemlje i atmosferskom cirkulacijom. Zbog visokog intenziteta isparavanja na malim geografskim širinama blizu ekvatora, relativna vlažnost vazduha je tokom godine visoka, a smanjuje se do 30° geografske širine prema severu i jugu. Na polovima, zbog niskih temperatura, maksimalni pritisak vodene pare je veoma nizak i zato je relativna vlažnost visoka.

4.2. Procesi koji čine vodni ciklus

Molekul vode je troatomni polarni molekul. Da li će se naći u obliku leda, tečne vode ili pare, zavisi od ravnoteže privlačnih sila među molekulima i njihove kinetičke energije. Privlačne međumolekularne sile nastoje da drže molekule na okupu, kao što je to slučaj kod leda. Međutim, porast kinetičke energije (direktno proporcionalan temperaturi) omogućuje molekulima da se kreću većim brzinama, da se udaljavaju jedan od drugog i prelaze iz čvrste u tečnu ili gasovitu fazu.

Isparavanje je fizički proces u kom molekuli tečnosti uspevaju da savladaju privlačne međumolekularne sile i počinju da se slobodno kreću u prostoru iznad površine tečnosti. Isparavanje se stalno odvija na temperaturama iznad apsolutne nule (0 °K = -273.15 °C). Intenzitet ovoga procesa može biti manji ili veći u zavisnosti od raspoložive kinetičke energije, tj. temperature tečnosti. Energija potrebna za isparavanje kilograma vode pri konstantnoj temperaturi naziva se latentna toplota isparavanja, koja u slučaju vode varira od 2264,76 kJ kg^{-1} (na 100 °C) do 2500 kJ kg^{-1} (na 0 °C). Intenzitet isparavanja vode često je povezan sa deficitom vodene pare, odnosno sa sposobnošću okolnog vazduha da prihvati dodatne molekule vode. Opšti je zaključak da isparavanja nema u slučaju kada je vazduh zasićen, a deficit vodene pare biva jednak nuli - što nije sasvim tačno. Naime, u slučaju kada je vazduh iznad površine tečnosti zasićen, molekuli se ipak mogu odvojiti od površine tečnosti i ispariti, ali će neki drugi molekuli, čija je energija niža i koji se nalaze blizu površine tečnosti, biti zahvaćeni površinskim molekulima i transformisani u tečnost. Tako dolazi do *kondenzacije*. To znači da se isparavanje i kondenzacija dešavaju istovremeno, a razlika između broja molekula koji napuštaju i onih koji se vraćaju u tečnost određuje da li će se proces smatrati isparavanjem ili kondenzacijom.

Pri konstantnom pritisku i zapremini verovatnoća molekularnih sudara i zahvata molekula drugim molekulima gasa se povećava kako se prosečna kinetička energija (temperatura) smanjuje. To objašnjava zašto maksimalni pritisak pare, tj. koncentracija molekula potrebnih za kondenzaciju na određenoj temperaturi, opada s temperaturom i zavisi isključivo od nje. Nasuprot tome, pri konstantnoj temperaturi, rast atmosferskog pritiska smanjuje srednju dužinu slobodnog puta molekula i povećava verovatnoću sudara, odnosno intenzitet kondenzacije. Naravno, isti efekat se javlja i ako se pri konstantnoj temperaturi vazduha i konstantnom atmosferskom pritisku raste sadržaj vodene pare.

Zavisno od mehanizma koji dovodi do transformacije vodene pare u tečnost, kondenzacija može da se odvija kao homogena ili heterogena. Homogena kondenzacija se javlja u čistom, superzasićenom vazduhu. Heterogena kondenzacija, koja se i najčešće sreće u atmosferi, počinje na malim česticama (na primer prašina, čađ, morska so, vulkanski pepeo, fitoplanktoni, aerosoli), obično prečnika 0,2 mm, koje se nazivaju kondenzaciona jezgra. Ova jezgra kondenzacije imaju različitu strukturu, ali su uvek higroskopna, što znači da mogu da vezuju vlagu iz vazduha pri uslovima koji su značajno ispod saturacionih. Kapljice vode formirane na jezgrima kondenzacije igraju ključnu ulogu u stvaranju magle u uslovima kada je relativna vlažnost vazduha manja od 70%.

Topljenje. Čvrsto stanje supstance karakterišu međumolekularne sile koje su mnogo snažnije od kinetičke energije molekula, raspoložive za obavljanje rada na savladavanju ovih sila. Te sile održavaju fiksni oblik i zapreminu čvrstih tela. To-

pljenje je fizički proces pri kome se energija dovedena telu troši na savladavanje međumolekularnih sila i prelazak tela u tečno stanje. Obrnuti proces je *mržnjenje*, kada se, kao posledica odvođenja energije iz tečnosti, kinetička energija molekula smanjuje, a privlačne međumolekularne sile postaju dominantne, stvarajući čvrsto stanje. Kada telo direktno iz čvrstog agregatnog stanja pređe u gasovito, ovaj fizički proces naziva se *sublimacija*. Isti izraz, međutim, može se naći u literaturi i za suprotan proces.

4.3. Isparavanje i kondenzacija u atmosferi

Zemljina površina je stalni izvor i ponor energije i vlage za atmosferu. Isparavanje sa slobodne vodene površine je posledica neto zračenja na površini, temperature i vlažnost vazduha. Prisustvo vetra smanjuje vlažnost vazduha i intenzivira uklanjanje molekula vode s površine, tj. povećava intenzitet isparavanja.

Na isparavanje s golog zemljišta utiču isti meteorološki uslovi koji utiču na isparavanja sa slobodne vodene površine, ali i karakteristike zemljišta kao što su sadržaj vlage, vrsta i struktura, zaslanjenost, kao i prisustvo i nivo podzemnih voda. Ako je zemljište zasićeno vlagom, intenzitet isparavanja u datim meteorološkim uslovima je maksimalan i naziva se *potencijalno isparavanje* (evaporacija).

Vegetacija otpušta vodu u atmosferu kao rezultat dva procesa: fizičkog procesa isparavanja s površine vegetacije i fiziološkog procesa *transpiracije*, koji predstavlja difuziju vodene pare iz unutrašnjosti biljke u okolni vazduh kroz stome. Uobičajeni naziv za isparavanje vode sa površine biljke i transpiraciju iz njene unutrašnjosti jeste evapotranspiracija, koja će biti detaljnije razmotrena u narednim poglavljima. Ako je površina zemljišta potpuno pokrivena biljkama, i u zemljištu nema deficita vlage, evapotranspiracija će dositići maksimalan intenzitet pri datim meteorološkim uslovima, te se takva naziva *potencijalna evapotranspiracija*.

Kondenzacija praćena oslobađanjem latentne toplote kondenzacije je moćan izvor energije za atmosferu. Kondenzacija vodene pare u atmosferi se odvija pri sledećim uslovima:

- kada vlažni vazduh prelazi preko hladnije površine, intenzivno se hladeći u dodiru s hladnim predmetima;
- kada se vazduha hladi zbog intenzivnog izračivanja naležuće površine;
- kada se mešaju topla i hladna vazdušna masa;
- kada je vazduh prisiljen da se uzdiže, intenzivno se hladeći zbog smanjenja pritiska dok zadržava početnu količinu vodene pare i ostaje u nezasićenom stanju; u određenom momentu vazduh će se ohladiti do tačke rose za datu količinu vodene pare.

Proizvodi kondenzacije - magla. Magla je rezultat kondenzacije vodene pare u sloju vazduha neposredno iznad površine tla. Kada su male kapljice vode ili kristalići leda suspendovani u vazduhu, vidljivost je smanjena do 1000 m u slučaju slabe magle, do 180 m u slučaju umereno guste magle i do 50 m kod vrlo guste magle. Maglu nekad nazivaju i oblak (stratusni) na površini Zemlje, jer je mehanizam njenog nastajanja veoma sličan mehanizmu formiranja oblaka.

U zavisnosti od toga da li procesi koji se odvijaju dovode do kondenzacije ili uslova bliskih kondenzaciji (razlika između temperature vazduha i tačke rose je manja od 2,5 °C) mogu nastati različite vrste magli.

Advektivna magla (slika 4.3) je rezultat horizontalnog kretanja toplog i vlažnog vazduha preko mnogo hladnije površine tla ili vode, što dovodi do hlađenja tog vazduha ispod njegove tačke rose. Ova pojava se često zapaža iznad hladne vodene površine. Dodatno da primetimo, kada se hladan vazduh kreće iznad tople i vlažne (obično vodene) površine, formira se magla koja podseća na dim ili paru. U nekim delovima sveta advektivna magla je značajan izvor vode, što je dovelo do razvoja nove tehnike sakupljanja vode iz magle (engl. fog harvesting).

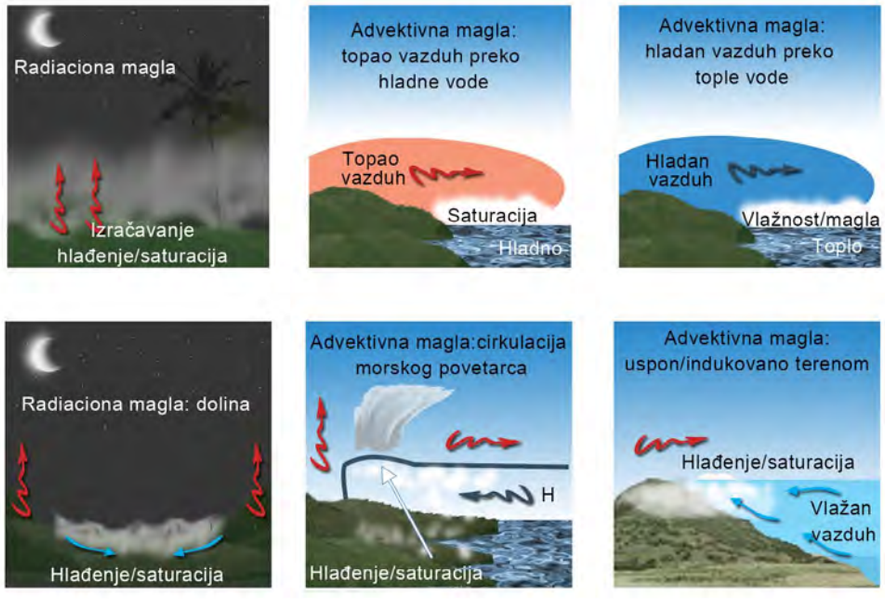
Magla isparavanja se javlja kada hladni vazduh miruje iznad toplije vodene površine. U tom slučaju voda isparava u hladan vazduh i povećava njegov sadržaj vodene pare, što dovodi do još povoljnijih uslova za kondenzaciju.

Radijaciona magla (slika 4.3) nastaje kao rezultat kondenzacije u sloju vazduha neposredno iznad površine tla usled njegovog intenzivnog noćnog hlađenja, koje obično nastaje u uslovima vedrog neba i mirnih zimskih noći. Ova vrsta magle nestaje posle izlaska sunca, kada se zemljište dovoljno zagreje. Prisustvo inverzije[13] produžava trajanje radijacione magle.

Frontalna magla se javlja usled promena atmosferskih uslova za kondenzaciju zbog prisustva frontalnih zona ili prolaska fronta. Magla koja se javlja pre nailaska toplog i posle prolaska hladnog fronta naziva se *padavinska* ili kišna magla. Ona je povezana sa slabim padavinama koje se javljaju u hladnom, stabilnom vazduhu u frontalnoj zoni, što povećava sadržaj vodene pare u vazduhu, a time i tačku rose. Tokom prolaska fronta, mešanje toplih i hladnih vazdušnih masa stvara povoljne uslove za kondenzaciju.

Magla uzdizanja se formira kada je vlažni vazduh prisiljen da se diže uz brdo ili greben. Kao rezultat takvih uslova, vazduh se hladi do tačke rose, što dovodi do pojave magle i oblaka na navetrenoj strani planine.

[13] Inverzija u troposferi ukazuje na prisustvo sloja vazduha, u ovom delu atmosfere, u kome temperatura raste sa visinom umesto da opada. U svakodnevnom životu, „inverzno" opisuje ono što je obrnuto od očekivanog i/ili uobičajenog.



Slika 4.3.

Tipovi radijacione i advektivne magle

4.4. Uticaj vlažnosti vazduha na biljke

Biljke su veoma osetljive na promene temperature i vlažnosti vazduha. Visoka vlažnost vazduha, kao, uostalom, i niska, utiče na razvoj biljaka, oprašivanje, pojavu bolesti i konačni prinos.

Visoka relativna vlažnost smanjuje intenzitet transpiracije a može je čak i zaustaviti. Naravno, najmanje smanjenje vlažnosti, uzrokovano lakim vetrom, na primer, ponovo pokreće ovaj proces. Mala transpiracija dovodi do povećanja turgora u biljnim ćelijama, što dovodi do povećanja pritiska na elastične ćelijske zidove i širenje samih ćelija. To je jedan od razloga intenzivnog rasta listova tropskih biljaka. Oplodnja je veoma osetljiva na vlagu vazduha. Visoka relativna vlažnost može smanjiti širenje polena do udaljenih lokacija. Topli i vlažni uslovi predstavljaju idealno okruženje za razvoj različitih biljnih bolesti, kao i za neke štetočine i korove.

Niska relativna vlažnost vazduha povećava stomaterni otpor, čime se smanjuje razmena gasova između biljke i njenog okruženja, smanjujući intenzitet nekih od najvažnijih fizioloških procesa, kao što su fotosinteza i transpiracija.

Takođe, niska relativna vlažnost vazduha smanjuje klijavost polena, a time i oplodnju. Niska vlažnost vazduha smanjuje čak i efekte navodnjavanja. Naime, pod istim uslovima u pogledu temperature vazduha i intenziteta FAZ dobija se niži prinos ako se voda potrebna za rast biljaka obezbeđuje navodnjavanjem, umesto padavinama. Razlog tome je vlažnost vazduha. Uticaj navodnjavanja na vlažnost zavisi od primenjene metode navodnjavanja. Recimo, u slučaju metode „kap po kap" ili „podpovršinski kap po kap" vazduh je manje vlažan nego kada ista količina vode stigne u vidu padavina umerenog intenziteta. Međutim, u slučaju orošavanja isparavanje vode sa površine lista i zemljišta dovodi do povećanja vlažnosti vazduha u odnosu na istu situaciju sa padavinama.

Suša je fenomen (ne samo vremenska pojava) koji je prouzrokovan manjkom vode (u vidu pare ili tečnosti) u vazduhu i/ili zemljištu i ima izrazit uticaj na rast biljaka. Suša se javlja nakon dužeg perioda u kome nije bilo padavina ili su one bile nedovoljne, što je dovelo do stvaranja deficita vlage u vazduhu i zemljištu i dramatičnog narušavanja vodnog bilansa.

Razmere problema, kada se radi o suši, je teško odrediti jer one zavise ne samo od trajanja, intenziteta, vremena pojave i površina zahvaćenih sušom već i od potreba za vodom koje su rezultat ljudskih aktivnosti i gajenja biljaka u posmatranom regionu (Blain, 2012).

Suša se razlikuje od drugih prirodnih nepogoda i katastrofa (poplave, tropski cikloni i zemljotresi) na mnogo načina. Pre svega, to je pojava čiji se efekti šire na mnoge grane privrede i ispoljavaju u različitim vremenskim razmerama. Efekti suše se obično sporo akumuliraju te je teško proceniti kada je zaista počela, a kada se završila jedna sušna epizoda. Ovo je jedan od zadataka sistema za monitoring suše.

U zavisnosti od karakteristika regiona (pre svega klimatskih) i prirode ljudskih aktivnosti moguće su različite definicije suše. Postoje različite klasifikacije suše zasnovane na: a) sistemu ili aktivnosti u odnosu na koji se posmatra suša (meteorološka, hidrološka, poljoprivredna, socioekonomska); b) vremenu pojave i trajanju (stalna, sezonska, povremena) i c) sredini preko koje se suša dominantno ispoljava (atmosferska i zemljišna).

Meteorološka suša se odnosi na odstupanja temperature vazduha i padavina od normalnih vrednosti (tridesetogodišnji prosek) tokom određenog perioda (mesec, godišnje doba ili godina). Međutim, izbor parametara i kriterijuma za definisanje meteorološke suše zavise od klimatskih karakteristika određenog regiona. Ako je bitno klimatsko obeležje sezonska distribucija padavina, onda su odstupanja u količini, intenzitetu i raspodeli padavina mera za deficit padavina i sušu. Međutim, u regionima u kojima su padavine redovna pojava, kao što je zapadna obala Škotske, recimo, s prosečnom godišnjom količinom padavina od 3000 mm tokom 250 kišnih dana, povećan broj uzastopnih dana bez padavina

jeste mera suše. Što se tiče intenziteta, meteorološka suša se klasifikuje prema rekordnim padavinama u posmatranom periodu te se tako razlikuju: blaga (11–25% manje od višegodišnjeg proseka), umerena (25–50% manje od višegodišnjeg proseka) i jaka (preko 50% manje od višegodišnjeg proseka).

Hidrološka suša je rezultat uticaja meteorološke suše na vodni ciklus zemljišta. Ovaj tip suše se ispoljava u vidu smanjene količine vode u rekama, vodotocima i jezerima, kao i smanjenih podzemnih voda. Javlja se s određenim vremenskim zakašnjenjem u odnosu na meteorološku sušu i utiče na proizvodnju energije i poljoprivredu. Zbog vremenskog kašnjenja, ponekad je veoma teško proceniti efekte hidrološke, za razliku od, recimo, poljoprivredne suše. Naime, dok se efekti suše na biljke vide u roku od nekoliko dana, kada su podzemne vode ili akumulacije u pitanju ponekad je potrebno da prođe nekoliko meseci da bi se uočili prvi efekti.

Poljoprivredna suša jeste situacija kada su vlažnost vazduha i zemljišta nedovoljni za zadovoljavanje tekućih potreba biljaka za vodom. Ove potrebe zavise od meteoroloških uslova, vrste i faze rasta biljke i karakteristika zemljišta (fizičke, hemijske i mikrobiološke), pa se zbog toga poljoprivredna suša treba smatrati specifičnom za biljku. (Više o poljoprivrednoj suši i različitim indeksima koji se obično koriste za opisivanje intenziteta suše može se naći u glavi 9.)

Socioekonomska suša je rezultat meteorološke, hidrološke i poljoprivredne suše (jedne od njih ili njihove kombinacije) i javlja se kada potražnja za određenim ekonomskim dobrom prevaziđe ponudu.

Prema Torntvajtu (Thornthwaite), suša se prema vremenu pojave i dužini trajanja može klasifikovati kao: a) *trajna* – javlja se u područjima sa sušnom klimom, gde je zbog nedovoljne količine padavina poljoprivredna proizvodnja zasnovana na navodnjavanju; b) *sezonska* – obično je uzrokovana velikim sezonskim varijacijama u područjima s jasno definisanim vlažnim i suvim periodima u godini (na primer, područja sa monsunskom klimom); c) *povremena* – ova vrsta suše rezultat je velike varijabilnosti u količinama i intenzitetu padavina, tipična za regione humidne i subhumidne klime; ako se podudari s vegetacionim periodom useva, može izazvati značajno smanjenje prinosa.

Takođe, suša se može klasifikovati i kao atmosferska i zemljišna. *Atmosferska suša* nastaje kada je vlažnost vazduha vrlo niska. Najčešće je posledica visokih temperatura i smanjene količine padavina, ali to nisu isključivi uzroci. U slučaju normalnog rasporeda padavina, ova vrsta suše može se pojaviti usled toplog, snažnog vetra koji povećava deficit vodene pare u vazduhu. Dobar primer ovakvog vetra je suhovej, koji obično duva u Kaspijskom regionu i Kazahstanu. To je vetar umerene brzine (5–20 m s^{-1}), visoke temperature vazduha (20–25 °C) i male relativne vlažnosti (manje od 30%). Ako se javi u toku vegetacionog perioda, može izazvati prekomernu evapotranspiraciju i značajan vodni stres u

biljkama. Ako atmosferska suša potraje dovoljno dugo, ona dovodi do velikog smanjenja sadržaja vlage u zemljištu, u početku u površinskom sloju, a kasnije prodire dublje u zemljište i dospeva do zone korena poljoprivrednih kultura – to je *zemljišna suša*.

„Vlaženje lista" je izraz koji se odnosi na prisustvo vode u tečnom stanju na površini listova. Postoje tri izvora vode na površini listova: a) zadržavanje vode od padavina (intercepcija) i rose, b) gutacija[14] i c) navodnjavanje orošavanjem. Tri veličine koje se obično koriste za opisivanje vlaženja lista su: količina zadržane vode po jedinici lisne površine, površina dela lista pokrivenog vodom i trajanje vlaženja lista. Navedene karakteristike vlaženja listova zavise uglavnom od specifičnih osobina biljke (površina lista i ugao, sposobnost površine lista da zadrži vlagu) i meteoroloških uslova, a mogu značajno uticati na vodni bilans pojedinačnih biljaka i biljnog sklopa. Maksimalna količina vode koja se može zadržati po jedinici lisne površine pre nego što počne da kaplje sa lista kreće se u zavisnosti od biljne vrste od 0,1 do 500 ml m^{-2}. Biljke mogu imati koristi i od male i od velike količine zadržane vode, tj. vlažnosti listova. Na primer, mala sposobnost zadržavanja vode poboljšava vodni bilans u suvim uslovima jer olakšava vodi da stigne do zemljišta pre nego što ispari sa površine biljke. S druge strane, u slučaju jake kiše, intercepcija može usporiti priliv vode od padavina u zemljište i obezbediti optimalan vodni bilans. Kod mnogih patogena (čađava krastavost ploda kod jabuka, kasna plamenjača krompira, rana plamenjača paradajza itd.) trajanje vlaženja lista igra ključnu ulogu u određivanju intenziteta zaraze.

S obzirom da voda isparava s površine lista kao i sa bilo koje slobodne vodene površine, temperatura i vlažnost vazduha, kao i brzina vetra najviše utiču na uklanjanje vode sa površine lista. Važno je napomenuti i da površina biljke pokrivena vodom nije dostupna za transpiraciju jer zadržana voda pokriva stome i time utiče na razmenu gasova između biljke i njene okoline.

4.5. Uticaj biljaka na vlažnost vazduha

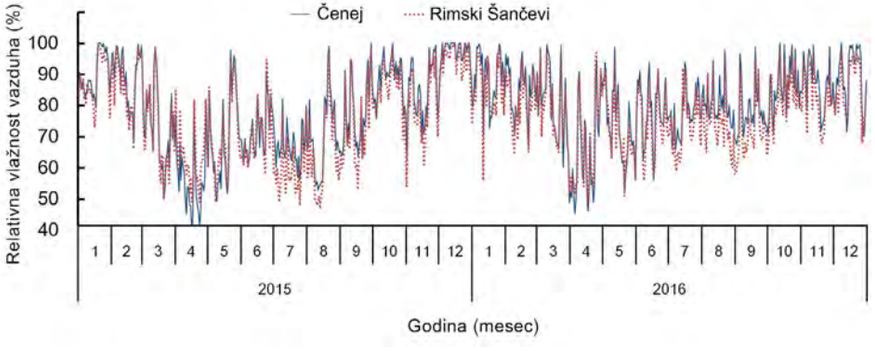
Biljke mogu direktno i indirektno uticati na vlažnost vazduha. Direktan uticaj je prisutan kada biljke deluju kao izvor vodene pare koja dolazi iz unutrašnjosti (transpiracija) ili s površine biljke (isparavanje vode zadržane na površini). Otud je relativna vlažnost merena (npr. leti) unutar biljnog sklopa veća od one merene iznad golog zemljišta ili u meteorološkom zaklonu (slika 4.4).

U poglavlju 4.2 su objašnjeni procesi transpiracije i evapotranspiracije. Ovi procesi su toliko važni i za biljke i za atmosferu da zaslužuju više pažnje. S obzirom da je u praksi prilično teško razlikovati deo fluksa vodene pare koji potiče

[14] Gutacija je odavanje vode u tečnom stanju iz unutrašnjosti biljke kada je u biljci mnogo vode, a uslovi za transpiraciju nisu povoljni (velika relativna vlažnost vazduha)

samo od transpiracije od onog koji je posledica isključivo isparavanja, u daljem tekstu će biti razmatrana samo evapotranspiracija (ET), kada se radi o vodenoj pari koja od biljnog sklopa stiže u atmosferu.

Meteorološki uslovi, karakteristike zemljišta i biljke, kao i agrotehničke mere utiču na intenzitet evapotranspiracije. U zavisnosti od nivoa složenosti, tj. broja parametara uključenih u analizu, obično se razmatraju tri vrste evapotranspiracije: a) referentna ET, b) potencijalna ET i c) stvarna ET (Allen et al., 1998).



Slika 4.4.

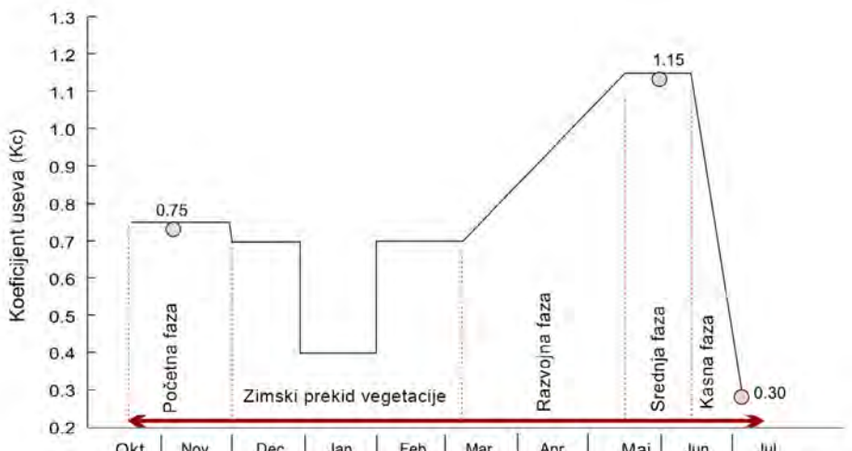
Dnevno kolebanje relativne vlažnosti vazduha u meteorološkom zaklonu na Rimskim šančevima, Srbija, i u voćnjaku jabuke na Čeneju, Srbija
[izvor: Republički hidrometeorološki zavod Srbije i PIS Vojvodine]

Referentna evapotranspiracija (ET_0) jeste ona koja se odvija sa optimalno vlažne površine zemljišta, u potpunosti pokrivene referentnom vegetacijom, za koju je odabrana niska trava. Intenzitet referentne evapotranspiracije zavisi isključivo od meteoroloških uslova.

Potencijalna evapotranspiracija (ET_c) jeste proces koji se odvija sa optimalno vlažne površine zemljišta, u potpunosti pokrivene odabranim usevom, koji je otporan na bolesti i optimalno nađubren. Pored meteoroloških uslova, intenzitet ove vrste evapotranspiracije u velikoj meri zavisi od karakteristika zemljišta (tip, struktura, zaslanjenost, plodnost) i useva (sorta, faza rasta, broj, raspodela i otvorenost stoma). Izračunavanje ET_c najčešće se zasniva na koeficijentu useva (K_c), pod pretpostavkom da se potencijalna evapotranspiracija sa bilo koje vegetacijom pokrivene površine može izraziti u odnosu na referentnu evapotranspiraciju ($ET_c = K_c \cdot ET_0$). Koeficijent useva (K_c) je vremenski zavisna promenljiva (slika 4.5) koja unosi specifične karakteristike useva u izračunavanje potencijalne evapotranspiracije i koju treba eksperimentalno odrediti za najmanje četiri najvažnija perioda

u toku sezone rasta: početni, period naglog porasta kulture, period maksimalne potrošnje i period sazrevanja (Allen et al., 1998).

Stvarna evapotranspiracija (ET_p) jeste količina vodene pare koja zaista dospe od posmatranog biljnog sklopa u atmosferu pri datim meteorološkim, zemljišnim i biljnim uslovima. Intenzitet stvarne ET određuje se primenom koeficijenta useva, pri čemu se uzimaju u obzir efekti odstupanja od potencijalne evapotranspiracije množenjem sa faktorom prilagođavanja (K_{ad}), koji je uvek manji od 1. Tipične situacije kada je važno dobro proceniti vrednost ovog parametra su sledeće: nepotpuna prekrivenost zemljišta vegetacijom, nedovoljan sadržaj vlage u zemljištu i deficit vodene pare u vazduhu.



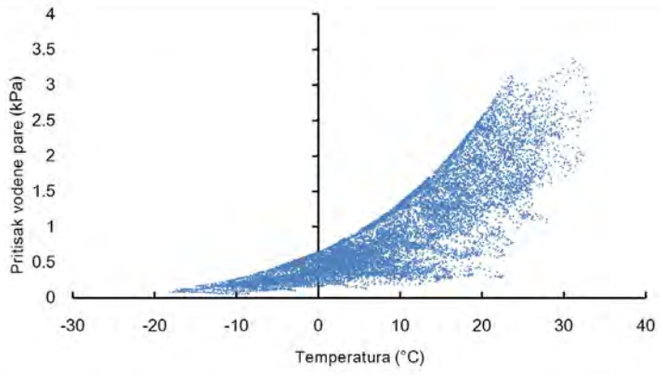
	Okt	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul
Kc	0.75	0.75	0.70	0.40	0.70	0.78	0.97	1.12	0.92	0.30
Eto (mm dan-1)	1.66	0.77	0.45	0.48	0.91	1.79	2.82	3.92	4.43	4.72
Etc (mm dan-1)	1.25	0.58	0.32	0.19	0.64	1.40	2.74	4.39	4.08	1.42

Slika 4.5.

Koeficijent useva (K_c) za ozimu pšenicu tokom vegetacionog perioda (Jaćimović, 2010)

U slučaju visokog deficita vodene pare ili male količine dostupne vlage u zemljištu biljke mogu zatvoriti stome (povećati stomaterni otpor) i smanjiti ET_p. Međutim, to nije brz proces. Ako do visokog deficita vodene pare dođe iznenada, kao u slučajevima suvog vetra *suhoveja*, stome nemaju vremena za zatvaranje i biljka brzo gubi vodu. Na svim vremenskim i prostornim razmerama vegetacija je važan izvor vodene pare za atmosferu. Ona povećava specifičnu vlažnost vazduha, ali njen uticaj na relativnu vlažnost zavisi i od temperature i kapaciteta vazduha za zadržavanje vodene pare.

Merenja pritiska vodene pare i temperature na Hemlok tornju (Prospekt Hil Trakt, Harvardska šuma, SAD) tokom 2006. (slika 4.6) ukazuju na činjenicu da postoji jasna gornja granica pritiska vodene pare na datoj temperaturi, što je zapravo definicija pritiska zasićene vodene pare i govori u korist stava (poglavlje 4.1) da maksimalni pritisak vodene pare zavisi samo od temperature. Ako se spoje najveće vrednosti pritiska vodene pare za datu temperaturu u funkciji od temperature, bila bi dobijena eksponencijalna kriva, koja opisuje zavisnost pritiska zasićene vodene pare od temperature. Matematička formulacija ove relacije je dobro poznata Klauzijus–Klapejronova (Clausius–Clapeyron) jednačina (vidi više u „Numeričkim primerima“).



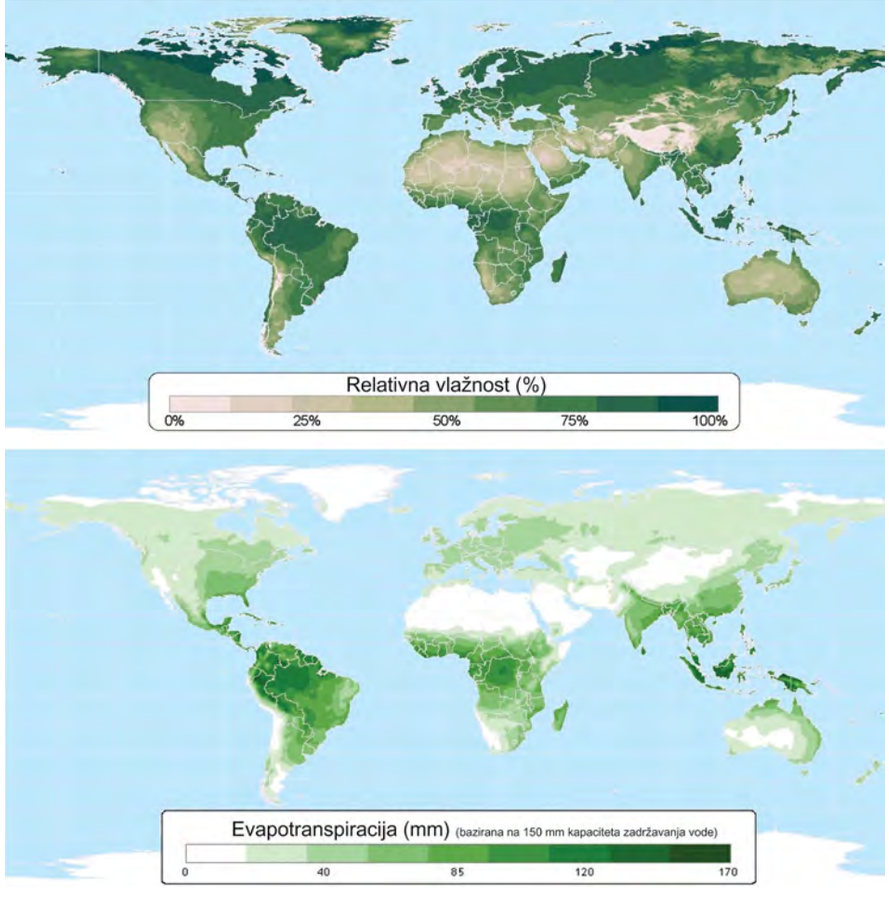
Slika 4.6.

Izmerene vrednosti pritiska vodene pare u vazduhu tokom 2006. na Hemlok tornju (Hemlock Tower), Prospekt Hil Trakt (Prospect Hill Tract), Harvardska šuma, SAD (Munger and Hadley, 2018)

Vegetacija koja zauzima velike prostorne razmere, kao što su kišne šume u Brazilu, ima preovlađujući uticaj (oko 50–75%) na godišnju relativnu vlažnost i evapotranspiraciju (slika 4.7), kao i na formiranje padavinskih oblaka (slika 4.8).

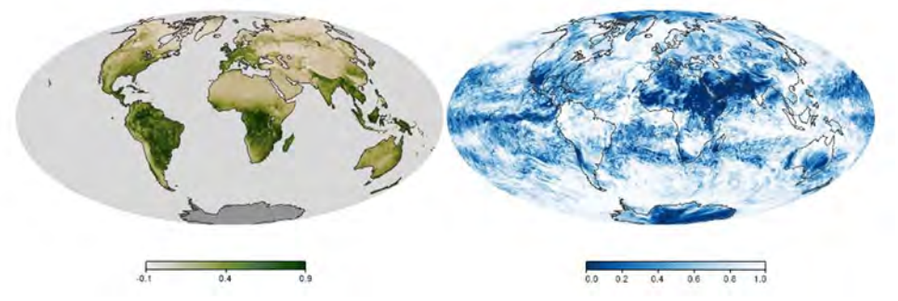
Uticaj različitih tipova biljaka na vlažnost vazduha može značajno da se razlikuje. Kada u zemljištu ima dovoljno vlage, intenzitet noćne transpiracije utiče na vlažnost vazduha i tačku rose u biljnom sklopu i okolnom vazduhu. Dobri primeri su C_3 biljke umerenog pojasa, kao što je pšenica, i C_4 biljke, kao što je kukuruz. Za pšenicu je karakteristično da tokom noći zatvara stome čime se smanjuje transpiracija. Bez advekcije vlažnog vazduha tokom noći, tačka rose se smanjuje za nekoliko stepeni celzijusa. Rosa se može formirati u usevu pšenice samo ako temperatura vazduha padne do ove temperature. Nasuprot tome, kukuruz je tropska biljka čije su stome delimično otvorene tokom noći i zbog toga se nastavlja transpiracija i povećava vlažnost vazduha u biljnom sklopu, što dovodi do toga

da je tačka rose ujutru samo 1–2 °C niža od vrednosti zabeležene u vreme zalaska sunca To stvara povoljne uslove za čestu pojavu rose u usevu kukuruza.



Slika 4.7.

Globalna raspodela godišnje relativne vlažnosti i evapotranspiracije
[izvor: Atlas biosfere, Univerzitet u Viskonsinu, SAD (Atlas of the Biosphere, University of Wisconsin), https://nelson.wisc.edu/sage/data-and-models/atlas/maps.php?catnum=3&type=Ecosystems]



Slika 4.8.

Globalna raspodela vegetacionog pokrivača (levo) i oblačnosti (desno) u februaru 2000 [izvor: Zemaljska opservatorija NASA, SAD (NASA Earth Observatory, USA), https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_NDVI_M, https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_CLD_FR]

5. Oblaci i padavine

Bilo da su tanki kao paukova mreža i visoko na nebu, ili pak olovno sivi i naizgled tako nisko da se mogu dotaći rukom, oblaci su najimpresivniji vidljivi proizvod kondenzacije vodene pare, kao i drugih procesa koji definišu njihov tip, sadržaj, visinu i veličinu. Svako prisustvo oblaka utiče na energetski bilans atmosfere i površine Zemlje. Kao sneg beli kumulusi prouzrokuju višestruku refleksiju Sunčevog zračenja, stvarajući njegov veći intenzitet u poređenju sa vrhom atmosfere.

Padavine su rezultat kondenzacije vodene pare koja se odvija u atmosferi, a njeni produkti potom stižu na površinu Zemlje u čvrstom ili tečnom agregatnom stanju. Pre nego što se upustimo u detaljniju analizu formiranja oblaka i padavina, važno je reći nešto više o adijabatskom uzdizanju vazduha i atmosferskoj stabilnosti.

5.1. Adijabatski procesi i atmosferska stabilnost

U glavi 4 smo razmatrali kako vazduh koji se diže utiče na dnevne varijacije pritiska vodene pare i formiranje magle; videli smo i kako radijaciona magla može potrajati nekoliko sati, održavajući uslove visoke vlažnosti blizu površine Zemlje. Međutim, iz svega dosad rečenog, nije sasvim jasno zašto se to dešava. Da bismo objasnili zašto se vazduh podiže u nekim prilikama, ali ne i u drugim, neophodno je upoznati atmosferske adijabatske procese i objasniti koncepte „delića vazduha" i atmosferske stabilnosti.

Delić vazduha je element njegove zapremine i dovoljno dobar reprezent u nekoj sredini da može da se upotrebi za objašnjavanje ponašanja ovog vazduha. On je dovoljno mali da se može smatrati homogenim i uniformnim u celoj svojoj zapremini, a da pri tom održava sve osnovne termodinamičke i dinamičke osobine vazduha koje reprezentuje.

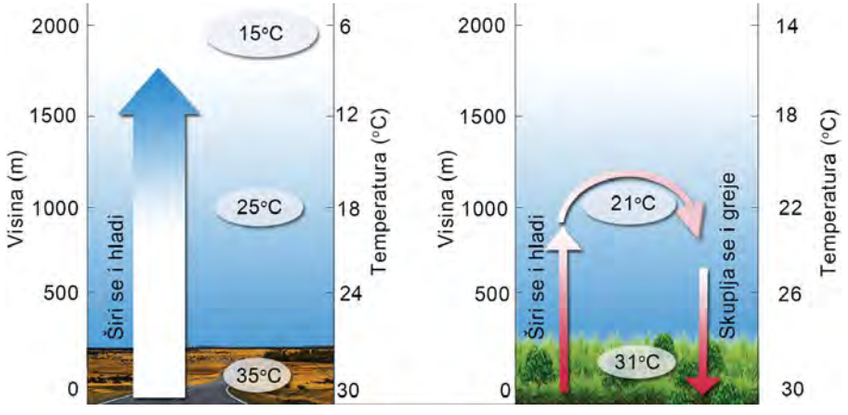
Adijabatski proces je proces koji se odvija bez razmene materije (energije i supstance) između termodinamičkog sistema i njegove okoline. U skladu sa Prvim principom termodinamike, energija dovedena u termodinamički sistem (Q) može se potrošiti na promene unutrašnje energije sistema (ΔU), tj. promene temperature i rad koji obavlja sistem (A), kao što je širenje, recimo. Ovo može da se izrazi u obliku

$$Q = \Delta U + A. \qquad (5.1)$$

U slučaju adijabatskih procesa (Q = 0 J i A = -DU), nema razmene energije s okolinom. Ako je izvršen bilo kakav rad, on je obavljen na račun smanjenja unutrašnje energije sistema, što će se ispoljiti u obliku smanjenja temperature.

U svetlu definicije adijabatskih procesa postavlja se pitanje da li se stvarni delić vazduha može smatrati adijabatskim sistemom, a njegovo kretanje adijabatskim procesom? Odgovor na ovo pitanje je potvrdan. Čak i ako nije izolovan od okolnog vazduha, ali se dovoljno brzo kreće, delić vazduha se može uzdizati uz zanemarljivu razmenu energije s okolinom.

Kako se to manifestuje u atmosferi? Pretpostavimo da se javlja sila potiska koja deluje na delić vazduha usled prisustva hladnijeg i gušćeg vazduha u njegovoj okolini. Potisak prisiljava delić vazduha da se uzdiže sve dok je topliji i ređi od okolnog vazduha. Prilikom uzdizanja, zbog sniženja atmosferskog pritiska s visinom, delić vazduha biva izložen sve manjem atmosferskom pritisku, što dovodi do njegovog širenja, a samim tim i do pada temperature. Na nižoj temperaturi početna količina vodene pare proizvešće višu relativnu vlažnost (zbog sniženja maksimalnog pritiska vodene pare s temperaturom) i delić vazduha će postajati sve zasićaniji kako se bude uzdizao sve više u atmosferi (vidi glavu 4). Sve dok je relativna vlažnost delića vazduha manja od 100%, njegovo uzdizanje se naziva *suvoadijabatsko*, dok se sniženje temperature sa visinom naziva *suvoadijabatski temperaturni gradijent* (G_s = 1 K/100 m). Ako se delić vazduha ohladi do tačke rose, dolazi do kondenzacije, a latentna toplota kondenzacije zagreva delić smanjujući njegovo hlađenje s visinom. Ovakvo uzdizanje vazduha u atmosferi naziva se *vlažnoadijabatsko*. Konkretno rečeno, *vlažnoadijabatski temperaturni gradijent* (G_w) je uvek manji od *suvoadijabatskog*, ali u velikoj meri zavisi od početnog sadržaja vodene pare u deliću vazduha. Najčešće korišćene vrednosti se nalaze u intervalu 0,4–0,8 K/100 m.



Slika 5.1.

Uzdizanje delića vazduha u statički nestabilnoj (levo) i statički stabilnoj (desno) atmosferi

Statička stabilnost bilo kog fizičkog sistema, uključujući i delić vazduha, definisana je u odnosu na statičku ravnotežu – stanje u kom su sve sile u ravnoteži. Ravnoteža može biti stabilna, kada delić teži da se vrati u početno stanje nakon prestanka dejstva sila, ili nestabilna, kada mali poremećaj može da proizvede značajne promene, tako da vraćanje u početno stanje više nije moguće.

Ako je gradijent temperature okolnog vazduha niži od suvoadijabatskog (slika 5.1), onda će delić vazduha koji je primoran da se uzdiže (npr. strmim brdom) biti stalno hladniji i gušći od okolnog vazduha i težiće da se vrati u početnu poziciju. Takva atmosfera je *apsolutno stabilna*. Mali temperaturni gradijent okolnog vazduha se javlja kada se vazduh pri površini hladi ili se vazduh iznad njega zagreva. Do hlađenja površinskog sloja vazduha najčešće dolazi zbog advekcije hladnog vazduha ili intenzivnog noćnog hlađenja. Ovi procesi mogu da stvore veoma stabilan vazduh pri tlu neposredno pre izlaska Sunca, kada temperatura dostiže svoj minimum. Pošto stabilna atmosfera pruža snažan otpor bilo kakvom vertikalnom kretanju, ona omogućava magli da se zadrži u blizini površine zemljišta u ranim jutarnjim časovima (slika 5.2). Zagrevanje gornjeg sloja vazduha je rezultat tople advekcije ili sporog spuštanja vazduha, kao i njegovog zagrevanja, pri tom (što je upravo suprotno od hlađenja zbog dizanja), što može dovesti do stvaranja inverzije. U stabilnim uslovima, inverzija se ponaša kao atmosferski plafon, sprečavajući bilo kakav vertikalni transfer (prenošenje) i zadržavajući sve produkte kondenzacije, ali i sve zagađujuće materije blizu tla.

Slika 5.2.

Stabilna atmosfera ujutru zadržava maglu blizu tla

Ako je gradijent temperature okolnog vazduha veći od suvoadijabatskog gradijenta, delić vazduha koji se uzdiže hladiće se sporije od okruženja (slika 5.1). Dakle, kada delić vazduha jednom počne da se uzdiže, on će nastaviti sa uzdizanjem u toj apsolutno *nestabilnoj atmosferi* jer je stalno topliji i lakši od okolnog vazduha. Atmosferska nestabilnost raste kako se povišava temperaturni gradijent okolnog vazduha, što je uobičajena pojava kada se vazduh pri površini zagreva ili se onaj iznad njega hladi. Temperatura površinskog vazduha raste kao rezultat tople advekcije ili dnevnog zagrevanja Zemljine površine, što uzrokuje intenzivno vertikalno mešanje atmosfere. Shodno tome se atmosferska stabilnost u toku dana menja od stabilne do nestabilne.

Stabilna atmosfera koja uspeva da zadrži vlagu, naročito ujutru pre sušnog dana, predstavlja važan izvor vlage za biljke i životinje. Međutim, u slučaju mraza, stabilnost povezana s radijacionom inverzijom dovodi do oštećenja od mraza, čija ozbiljnost zavisi od intenziteta inverzije i nivoa stabilnosti (koji određuju trajanje mraza), kao i od toga koliko je temperatura pala ispod 0 °C (što određuje intenzitet mraza).

Nestabilna atmosfera podstiče vertikalni transfer toplote i vodene pare sa zemljišta i biljnog pokrivača u atmosferu, što značajno utiče na vodni i energetski

bilans površine. Ovim može da se poveća intenzitet evapotranspiracije i razmena gasova između biljnog sklopa i površinskog sloja vazduha, čime se istovremeno povećava intenzitet svih fizioloških procesa povezanih s ovom razmenom.

5.2. Oblaci i njihovo formiranje

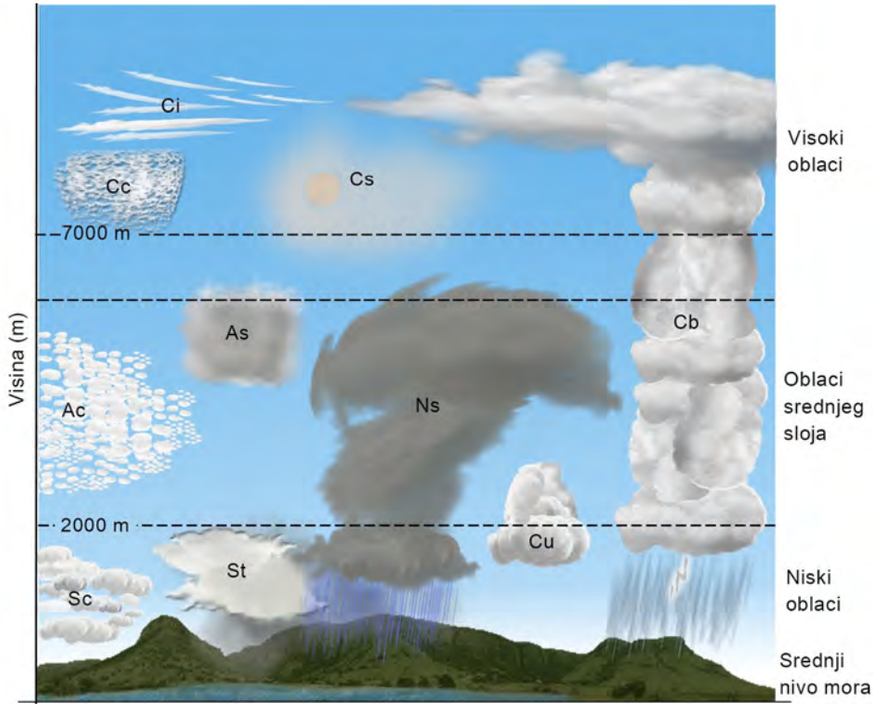
Oblaci su vidljivi produkti kondenzacije i sublimacije vodene pare u atmosferi i mogu se formirati blizu Zemlje ili na velikim nadmorskim visinama; oni mogu biti tanki, ali sa velikom horizontalnom razmerom, ili visoki do vrha planetarnog graničnog sloja atmosfere, ali u pogledu horizontalnih razmera – veličine omanje njive sa kukuruzom.

Kondenzacija vodene pare (vidi glavu 4) i formiranje oblaka u atmosferi uglavnom se javljaju u sledećim slučajevima: a) kada se topli vazduh uzdiže usled konvekcije; b) kada je topli vazduh prisiljen da se uzdiže zbog nailaska na planinske prepreke ili atmosferske frontove i c) kada se topli i hladni vazduh sudare i mešaju u atmosferi. Zavisno od toga da li se oblaci formiraju usporenim rastom u stabilnoj atmosferi ili brzom konvekcijom u nestabilnoj određuje njihov izgled i vrstu padavina koje se formiraju u njima.

Slojeviti (stratusni) oblaci se formiraju u uslovima jake statičke stabilnosti i laganog formiranja slojeva velikih horizontalnih razmera. Konvektivni oblaci su obično rezultat zagrevanja atmosfere i konvektivnog uzdizanja vlažnog vazduha od Zemlje ka vrhu atmosfere ili brzog premeštanja hladnog fronta koji prouzrokuje uzdizanje vazduha na frontu. Kombinacija ova dva tipa oblaka je moguća ako se, recimo, u slojevitim oblacima pojave konvektivni elementi usled lokalne nestabilnosti. Za razliku od velike horizontalne razmere slojevitih oblaka, konvektivne oblake karakteriše njihova vertikalna razmera. Što je intenzivnija konvekcija i što je više vodene pare uneseno u oblak, vertikalne dimenzije oblaka će biti izraženije.

S obzirom da se stalno menjaju, oblaci se javljaju u brojnim oblicima, što je dovelo do potrebe za njihovom klasifikacijom. Prvu klasifikaciju oblaka napravio je britanski farmaceut i meteorolog-amater Luk Hauard (Luke Howard), koji je objavio svoj „Esej o modifikacijama oblaka" 1803. godine. Njegova klasifikacija je zasnovana na deset klasa oblaka; ona je kasnije proširena i prihvaćena od strane Svetske meteorološke organizacije (SMO) kao osnova za deset glavnih grupa, odnosno vrsta, oblaka: cirusi (Ci), cirostratusi (Cs), cirokumulusi (Cc), kumulonimbusi (Cb), altokumulusi (Ac), altostratusi (As), nimbostratusi (Ns), stratokumulusi (Sc), stratusi (St) i kumulusi (Cu). Dalja klasifikacija je zasnovana na delu atmosfere (troposfera), odnosno visini na kojoj se niski, srednji i visoki oblaci obično pojavljuju (slika 5.3).

Imena oblaka obično dolaze od latinskih reči koje opisuju njihov izgled. Da bi se preciznije opisale karakteristike oblaka, dodaje se prefiks *alto-* (za visoke oblake) i *nimbo-* za kišne oblake.



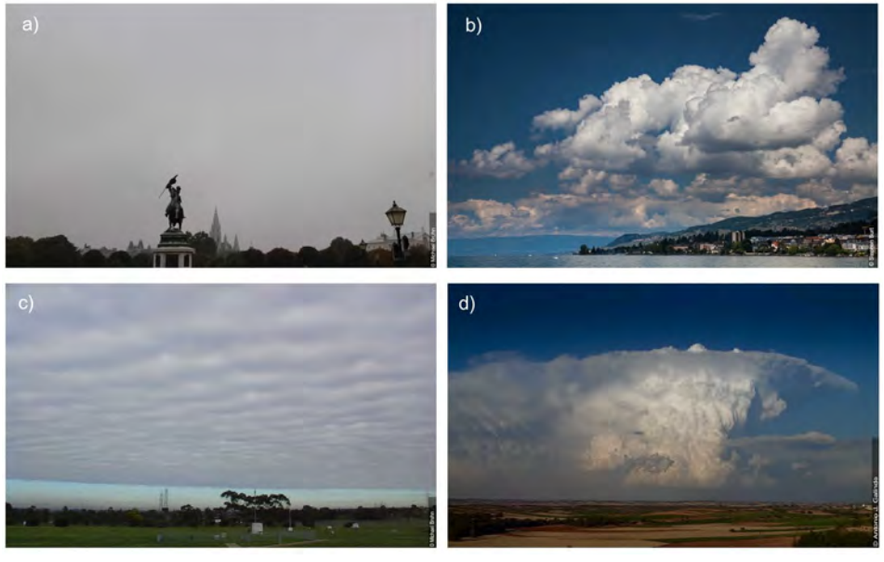
Slika 5.3.

Klasifikacija oblaka: vrsta, nivo, visina i simbol

Sadržaj oblaka zavisi od visine, mesta i mehanizama njegovog formiranja; karakteriše ga različit sadržaj ledenih kristala, snega i kišnih kapi različitih veličina, kao i razne kombinacije svih ovih elemenata. Prema temperaturi i sadržaju oblaci se definišu kao *topli* ili *hladni*. Samo ako je temperatura celokupne zapremine oblaka iznad 0 °C i ako se sastoji od tečnih kapljica, oblak se može smatrati toplim – takvi oblaci su karakteristični za tropske i suptropske oblasti. Međutim, ako vrh oblaka doseže visine na kojima su temperature daleko ispod 0 °C, njegov sadržaj je određen mešavinom ledenih kristala i tečnih kapljica. Ovakva formacija, tipična za srednje i visoke geografske širine, naziva se hladnim oblakom.

5.2.1. Niski oblaci

Ako se osnova nekog oblaka nalazi ispod 2000 m, onda se on obično klasifikuje kao niski oblak. Iako su uglavnom sastavljeni od kapljica vode, niski oblaci mogu sadržavati i deliće leda i sneg, kada su temperature dovoljno niske. Tipove niskih oblaka čine: stratusi, kumulusi, stratokumulusi i kumulonimbusi.



Slika 5.4.

Niski oblaci: a) stratusi, b) kumulusi, c) stratokumulusi i d) kumulonimbusi [izvor: Međunarodni atlas oblaka (International Cloud Atlas, WMO, 2018)]

Stratusi su niski oblaci bez jasnog oblika, a sastoje se od slojeva sive do bele boje i uniformne baze (slika 5.4.a). U zavisnosti od temperature okoline, mogu se sastojati od kapi vode, prehlađenih kapi vode ili ledenih kristala. Atmosferski uslovi pogodni za formiranje stratusnih oblaka povezani su sa: a) radijacionim hlađenjem čistog, vlažnog, atmosferskog sloja; b) toplom advekcijom i c) prisilnim uzdizanjem vlažnog vazduha u blizini atmosferskog fronta ili u područjima sa strmim brdima. Treba istaći da advekcija toplog vazduha preko hladnije površine može dovesti do formiranja magle. Vetar može značajno podići donju granicu sloja magle, što dovodi do formiranja stratusa. Oni se često javljaju po lepom vremenu, ali povremeno mogu proizvesti kišu u vidu spreja ili slab sneg.

Kumulusi, oblika karfiola, nastaju kao rezultat lokalne konvekcije toplih, vlažnih delića vazduha u uslovno nestabilnoj atmosferi (slika 5.4.b). Uobičajeni

oblik ovih oblaka obično se kombinuje sa upadljivo ravnom bazom oblaka na visinama koje nisu mnogo iznad 1000 m, dok vrhovi ovih oblaka mogu dosegnuti tropopauzu. Javljuju se pojedinačno ili u grupama i nizovima. U zavisnosti od temperature na visini vrha oblaka, mogu se sastojati od vodene pare, kapljica vode, superrashlađene vode ili kristala leda. Kumulusi su vesnici lepog vremena i ne proizvode padavine, ali se lako mogu razviti u tip *Cumulus congestus* ili čak u kumulonimbuse, a oni donose jaku kišu, jake vetrove i grmljavinu.

Stratokumulusi su oblaci od sive do tamne boje, čija je slojevita struktura isprekidana kumulusnim elementima, jer se ovi oblaci često javljuju kao prelazne forme od kumulusa ili stratusa (slika 5.4.c). Uslovi pogodni za formiranje stratokumulusa su povezani sa spuštanjem gušćeg vazduha na velikim horizontalnim razmerama i snažnom statičkom stabilnošću u donjim delovima troposfere. Dinamika oblaka, odgovorna za njihov vertikalan razvoj, je dominantno pokretana konvektivnom nestabilnošću, prouzrokovanom radijacionim hlađenjem gornje granice oblaka. Stratokumulusni oblaci obično sadrže različite oblike kondenzovane vodene pare u tečnom stanju. Led može biti prisutan ukoliko je vrh oblaka dovoljno hladan. Debljina ovih oblaka je obično 200–400 m unutar atmosferskog sloja debljine 500–2000 m. Povezani su s lepim vremenom i padavine nisu uobičajene za ove oblake. Samo izuzetno mogu se javiti slaba kiša ili sneg. Ipak, stratokumulusi često najavljuju približavanje oluje.

Kumulonimbusi – „kraljevi oblaka" – predstavljaju jednu od najimpresivnijih i najuočljivijih vremenskih pojava (slika 5.4.d). Sivi ili tamni, gusti, s izrazitom vertikalnom strukturom (toranj), ovi oblaci mogu da se pojave sami ili da formiraju niz ovakvih oblaka koji ima potencijal da razvije supercelijsku nepogodu. Prvobitno u obliku dobro razvijenih kumulusa sa intenzivnim vertikalnim razvojem od čak 93 km h^{-1}, ovi oblaci mogu da se protegnu sve do vrha troposfere. Njihova se baza obično nalazi na visinama od 200 do 4000 metara, dok vrh oblaka obično dostiže 7600 metara, a u nekim slučajevima čak i 12000 metara. Uslovi pogodni za njihovo formiranje su povezani sa jakom atmosferskom nestabilnošću uzrokovanom velikim padom temperature u donjoj troposferi. Vodena para, koja se javlja u zoni donje baze oblaka, se uzdiže zahvaćena snažnom uzlaznom strujom. Na većim visinama, u sadržaju oblaka dominiraju prehlađene kapljice i čvrsta faza vode u obliku kristala snega i leda. Kumulonimbusi su po pravilu uzrok oluje praćene snažnim vetrovima, munjama, intenzivnim padavinama, a ponekad i gradom. U nekim regionima, kao što je srednji zapad SAD, najavljuju dolazak tornada. Obično se javljaju u letnja popodneva, posle snažnog razvoja atmosferske konvekcije, koja je posledica zajedničkog efekta zagrevanja površine zemljišta sunčevim zračenjem i konvergencije vlažnog vazduha u nižim slojevima atmosfere.

5.2.2. Oblaci srednjeg sloja

Oblaci se klasifikuju kao srednji, ili oblaci srednjeg nivoa, ako je njihova baza na visinama između 2000 i 6000 metara. Sadržaj ovih oblaka čine prvenstveno vodene kapljice, ali kada su temperature dovoljno niske, mogu biti prisutni i ledeni kristali. Srednji oblaci uključuju sledeće tipove: altokumuluse, altostratuse i nimbostratuse.

Slika 5.5.

Srednji oblaci: a) altokumulusi, b) altostratusi i c) nimbostratusi
[izvor: Međunarodni atlas oblaka, WMO, 2018]

Altokumulusi (slika 5.5.a) su beli i/ili sivi oblaci i javljaju se u obliku slojeva, linija ili pramenova oblačnih delića. Oni se formiraju na nadmorskoj visini od 2000 do 7000 metara i sastoje se od prehlađenih kapljica vode (čak i do –10 °C), a ponekad i od kristala leda. Formiraju se konvekcijom u nestabilnom sloju atmosfere na velikoj visini. Ovi oblaci ne stvaraju kišu, ali mogu uticati na promene vremena. Na primer, u letnje jutro oni najavljuju visok rizik od oluje s grmljavinom u popodnevnim časovima. Ako su povezani sa Fenom, oni ukazuju na pogoršanje vremena u narednih pola dana ili sledećeg dana. Za sada, recimo samo da je Fen lokalni vetar karakterističan za region Alpa o kome će više reči biti u sekciji 6.2.3.

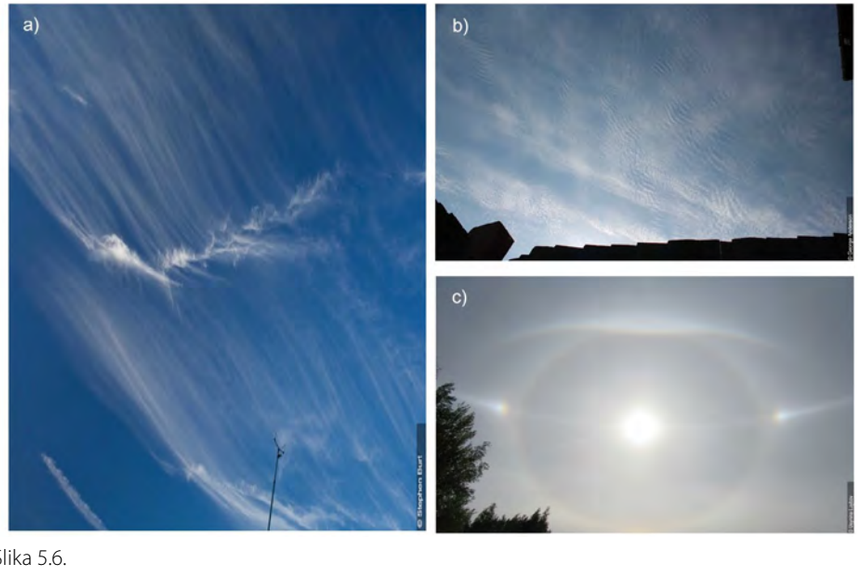
Altostratusi (slika 5.5.b) su sivi ili sivoplavi tanki slojevi oblaka, nedefinisanog oblika, koji postaju sve deblji kako im se povećavaju horizontalne razmere.

Pošto debljanje sloja nije ujednačeno po celoj njegovoj širini, u nekim su delovima dovoljno tanki da propuštaju sunčane zrake. S obzirom da se altostratusi formiraju kao rezultat spuštanja cirostratusa s većih visina, oni se sastoje od kapljica vode i kristalića leda koji često doprinosi stvaranju optičkih efekata u atmosferi (korona). Altostratusi nisu kišni oblaci, ali se često formiraju kao prethodnica toplog ili okludovanog fronta. Prolazak fronta pretvara altostratuse u kišne nimbostratuse. Zbog toga njihovo prisustvo često najavljuje promenu vremena.

Nimbostratusi (slika 5.5.c) imaju oblik i sadržaj koji odgovaraju njihovom imenu – nimbus ili „tamni oblak". To su niski, slojeviti, kišni oblaci izrazito ravne baze. Nemaju definisani oblik, sivi ili tamno sivi, oni su značajne debljine; ne dozvoljavaju prolazak sunčevih zraka (zbog toga su i tamni), a sadrže kapljice vode ili sneg. Nimbostratusi se formiraju u nižim ili srednjim slojevima atmosfere zgušnjavanjem altostratusa. Često su povezani s oblačnim sistemima ciklona srednjih (geografskih) širina koji donose padavine.

5.2.3. Visoki oblaci

Na visinama iznad 6000 metara temperature su toliko niske da se ovi oblaci uglavnom sastoje od ledenih kristala. Otuda su visoki oblaci obično tanki i beli, međutim, oni mogu uticati na energetski bilans Zemljine površine. Tipovi visokih oblaka su sledeći: cirusi, cirokumulusi i cirostratusi.



Slika 5.6.

Visoki oblaci: a) cirusi, b) cirokumulusi i c) cirostratusi
[izvor: Međunarodni atlas oblaka, WMO, 2018]

Cirusi (slika 5.6.a) su visoki, obično beli, tanki oblaci paperjastog izgleda. Oni se sastoje od ledenih kristala formiranih mržnjenjem kapljica vode. Njihovo prisustvo obično najavljuje lepo vreme, dok njihovo kretanje ukazuje na pravac vetra na visini oblaka. Iako su vrlo tanki i na velikoj visini, cirusi sa svojim kristalnim ledenim površinama (idealnim za refleksiju Sunčevog zračenja) mogu uticati na energetski bilans na površini Zemlje; njihov prolaz i/ili prisustvo može jasno da se vidi na piranometrima (vidi glavu 13).

Cirokumulusi (slika 5.6.b) su obično beli, visoki, tanki oblaci koji se javljaju u obliku dugih redova ili slojeva kondenzovane vodene pare, čiji je oblik kombinacija raznih paperjastih formi i oblika karfiola. Sastoje se od prehlađenih kapljica vode koje nastaju kao rezultat uzdizanja usled plitke konvekcije u tankom i nestabilnom sloju visoko u atmosferi. Na umerenim (geografskim) širinama obično se javljaju zimi, najavljujući lepo ali hladno vreme, dok u tropskim krajevima često najavljuju dolazak uragana.

Cirostratusi (slika 5.6.c) su veoma visoki, tanki, prozirni, slojeviti oblaci a sastoje se od ledenih kristala, koji se obično pojavljuju kao rezultat uzdizanja sloja vazduha velikih horizontalnih razmera. Ako se približava topli front, cirostratusi postaju deblji i transformišu se u niži i mnogo gušći tip oblaka. Oni pokrivaju nebo potpuno ili delimično i obično proizvode halo-efekat[15].

Zasejavanje oblaka je rasejavanje čestica u atmosferi (A_gI – srebro jodid, KI – kalijum jodid i suvi led) koje mogu delovati kao jezgra kondenzacije ili kristalizacije u oblacima, kako bi se promenio njihov izgled, tip ili intenzitet produkovanih padavina. Obično je cilj zasejavanja oblaka smanjenje zrna grada i/ili njihovo pretvaranje u kišu ili, pak, povećavanje padavina. Važno je naglasiti da zasejavanje oblaka dovodi do padavina na određenoj lokaciji samo ako su stratusi ili stratokumulusi već prisutni. Efikasnost ove tehnike u modifikovanju vremena nikada nije u potpunosti dokazana, a njene prednosti i mane su kontraverzna tema već dugi niz godina.

5.3. Rast kapi vode u oblacima

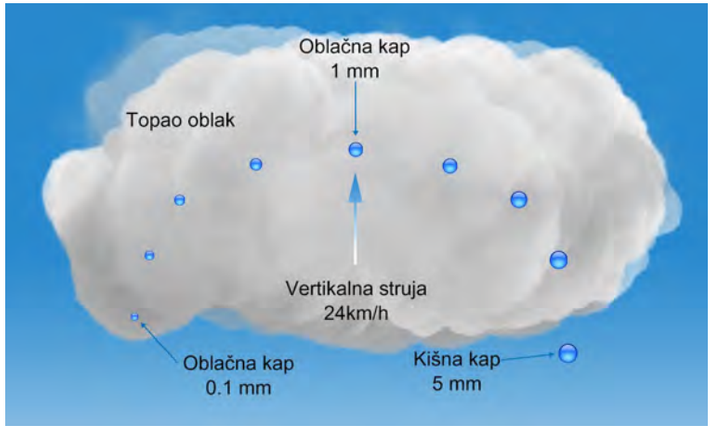
Rast kapi vode u oblacima počinje od jezgra kondenzacije (obično 0,2 μm u prečniku), a završava se ili kao oblačna kapljica (tipična = 20 μm, velika = 100 μm), ili kišna kap (2000 μm), ili ledeni kristal (pahuljica). Formiranje kapi većih od 20 μm uključuje procese difuzije, sudaranja i spajanja, kao i procese formiranja ledenih kristala.

Brzina rasta oblačne kapljice kondenzacijom u prezasićenom okruženju je spor proces – kapi je potrebno nekoliko dana da se formira – a on se dodatno

[15] Halo efekat je specifična optička pojava u atmosferi. Usled prelamanja sunčevih zraka pri prolasku kroz oblake i ostale sastojke atmosfere, posmatrač sa Zemlje vidi prstenove oko Sunca.

usporava s povećanjem radijusa kapljice. Očigledno, manje kapi rastu brže. Zato je kondenzacija dominantan mehanizam rasta u slučaju kapi manjih od 0,1 mm, kada je brzina padanja veoma mala (zbog skoro potpune ravnoteže između težine, trenja i sile potiska). Dalji rast kapi u oblaku, do veličine dovoljne da kap padne kroz donju bazu oblaka i stigne na zemlju, zavisi od temperature oblaka: u toplim oblacima (slika 5.7), tj. oblacima sa maksimalnom temperaturom iznad –15°C, određen je sudarima i spajanjem dve ili više kapi u jednu, dok su u hladnim oblacima dodatno uključeni i procesi formiranja ledenih kristala (slika 5.8).

Brzina rasta oblačne kapljice sudaranjem i spajanjem povećava se na račun: visokog sadržaja tečne vode (što povećava efikasnost sudaranja), raspon veličina kapi (što povećava efikasnost sudaranja i verovatnoću da se kapi posle sudara sjedine), velike brzina uzlazne struje i debljina oblaka (koji povećavaju dužinu puta koji kapljice prelaze pre sudara i vreme provedeno u oblaku). Zbog toga, relativno tanki stratusni oblaci, sa slabom uzlaznom strujom, mogu proizvesti samo sipeće padavine (vrlo slabu kišu), dok veliki kumulusi, s intenzivnim vertikalnim razvojem, mogu lako stvoriti kišne kapi od 5 mm u prečniku.



Slika 5.7.

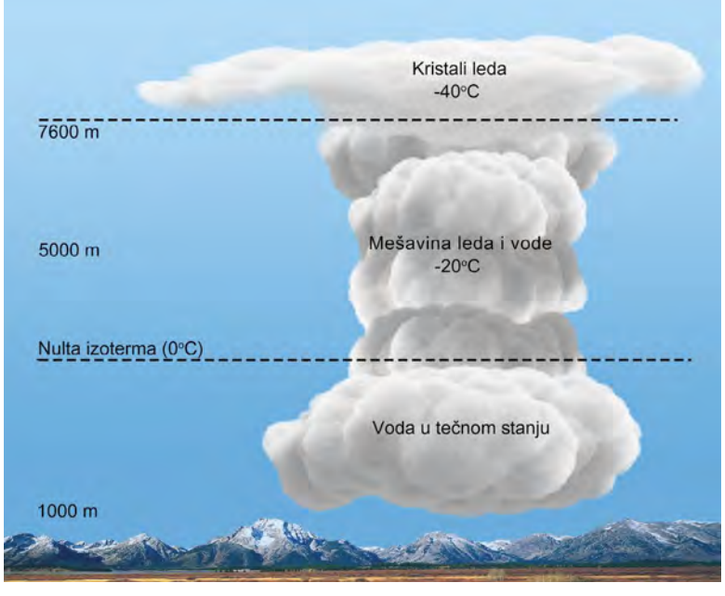
Rast kapi u toplom oblaku

Procesi stvaranja ledenih kristala sreću se u hladnim oblacima, odnosno u njihovom delu koji je na temperaturama daleko ispod 0 °C. U toplom delu hladnog oblaka sudaranje i spajanje oblačnih kapljica predstavljaju dominantne mehanizme rasta kapi.

U vazduhu koji je tik iznad nivoa mržnjenja prehlađene oblačne kapljice su i dalje u tečnom stanju. One dominiraju u smeši sa kristalima leda i još uvek se

mogu naći u velikim delovima oblaka u kojima se temperature kreću između 0 i –40 °C. Uzrok ovoga, sigurno iznenađujućeg zapažanja (zar niste uvek smatrali da na temperaturi ispod 0 °C voda mora da se smrzne?), leži u činjenici da se temperatura mržnjenja vodenih kapi smanjuje s porastom njihovih dimenzija. Zašto se ovo dešava? Jezgra kondenzacije su obično higroskopna i rastvaraju se prilikom formiranja kapi. Kada se ovo desi, rastvor će imati veću koncentraciju ukoliko je kap manja. Rastvori obično imaju nižu tačku mržnjenja nego čista voda. Otuda, što je kap manja to će biti hladnija pre nego što se spontano smrzne na –48 °C.

Kapljice vode mogu sadržati i jezgra kondenzacije u vidu kristalića leda koji imaju molekularnu strukturu vrlu sličnu vodi. Oni mogu biti deo složenog jezgra kondenzacije na kome se kapljice formiraju ili mogu biti pokupljeni iz vazduha tokom padanja kapi. Kada se ovo desi, kapljice sadrže neku vrstu "ledenog nukleusa" i dalje mržnjenje se može odigravati relativno brzo.



Slika 5.8.

Rast kapi u hladnom oblaku

S druge strane, ako postoje ledena jezgra, kristali leda se mogu formirati na temperaturama ispod temperature mržnjenja. S obzirom da je maksimalni pritisak vodene pare iznad površine vode veći nego iznad ledene površine, kon-

centracija molekula vode neposredno iznad površine kapi je veća nego iznad površine delića leda. Ova razlika u koncentracijama stvara fluks molekula vodene pare od kapljice vode ka površini ledenog kristala (od mesta veće ka mestu manje koncentracije), dovodeći do daljeg isparavanja kapi i rasta ledenih kristala tokom procesa koji se naziva Bergeronov proces formiranja ledenih kristala. Padajući, ledeni kristali se sudaraju sa prehlađenim kapljicama koje se zamrzavaju na njihovoj površini, što povećava rast kristala formiranjem novih ledenih slojeva. Tipični procesi formiranja ledenih kristala sreću se u kumulonimbusima.

5.4. Hidrometeori

Prema *Pojmovniku* Američkog meteorološkog društva (Glossary of the American Meteorological Society; AMS Glossary 2018), hidrometeor je svaki produkt kondenzacije ili depozicije vodene pare u atmosferi, bilo da je formiran u slobodnoj atmosferi, bilo na površini Zemlje, kao i svaka kapljica vode podignuta vetrom s površine. Hidrometeori (ne uključujući oblake), nastali od različitih formi vode, mogu se sastojati od:

- ansambla[16] padajućih čestica, tj. padavina (kiša, sipeće padavine, sneg, krupa, grad);
- depozicije čestica (kapljice magle, rose, inja, slane);
- ansambla čestica nanesenih vetrom (nanosi snega ili sipeće kiše);
- vrtloga čestica i
- suspenzije čestica u atmosferi (magla, ledena magla, izmaglica).

U ovom poglavlju će se posebno razmatrati padavine, depozicija čestica i hidrometeori nošeni vetrom.

5.4.1. Padavine

Padavine su produkti kondenzacije vodene pare, u tečnom ili čvrstom agregatnom stanju, koji padaju iz oblaka i stižu do tla. Prema poreklu i mehanizmu nastajanja, padavine mogu biti: a) *stratusne* i *konvektivne* i b) *ciklonske* (frontalne) i c) *orografske*.

Odnos brzine padajućih čestica i brzine vertikalnog uzdizanja vazduha utiče na mehanizam formiranja kapi, leda i snega u oblaku. Stratusne padavine se javljaju kada je brzina padanja ledenih kristala i snega relativno velika u odnosu na brzinu vertikalnog uzdizanja vazduha. U slučaju konvektivnih padavina situacija je obrnuta, što utiče na uobičajeno vreme potrebno za formiranje padavina: od 1 do 3 č., u stratusnim oblacima, i 0,5 č., u slučaju konvektivnih oblaka. Nimbostratusi su uobičajeni izvor stratusnih padavina (padavine slabog do umerenog intenziteta u vidu kiše ili snega), dok čak i stratusi i stratokumulsi mogu da proizvedu slabu ili sipeću kišu (vidi dole).

[16] „Ansambl" ukazuje na postojanje većeg ili manjeg broja objekata/subjekata (ljudi, predmeti, pojave, funkcije) koji imaju nešto zajedničko.

Frontalne (ciklonske) padavine se obično formiraju u nimbostratusima, u zoni fronta između tople i vlažne i hladne i suve vazdušne mase. Takođe, frontovi koji se brzo premeštaju mogu takođe produkovati kumulonimbusne oblake. Kada je vlažan vazduh prinuđen da se uzdiže, pri nailasku na planinske prepreke, u njemu dolazi do kondenzacije i izlučivanja padavina na navetrenoj strani planine.

Padavine se mogu klasifikovati prema obliku, karakteru, intenzitetu i tipu.

Prema *obliku*, padavine se klasifikuju kao tečne (kiša), prehlađene (ledena kiša, susnežica) i čvrste (sneg, zrnasti sneg, ljutina, krupa, grad, sugradica).

Karakter padavina može biti onaj sa prekidima (manje od jednog sata) ili neprekidan (više od jednog sata). To ukazuje ne samo na trajanje padavina već i na zahvaćeno područje.

Intenzitet padavina je odnos njihove količine (zapremina vode od padavina koja dospeva na 1 m^2) i trajanja. Za opis intenziteta padavina obično se koriste tri termina: slabe padavine (manje od 2,5 mm h^{-1}), umerene (2,5–7,6 mm h^{-1}) i jake (više od 7,6 mm h^{-1}) padavine (AMS Glossary, 2018). Pljuskovi (kiše ili snega) su padavine specifične po karakteru i intenzitetu a obično nastaju u konvektivnim oblacima. Najčešće počinju i završavaju se naglo, uz rapidno povećanje i smanjenje intenziteta.

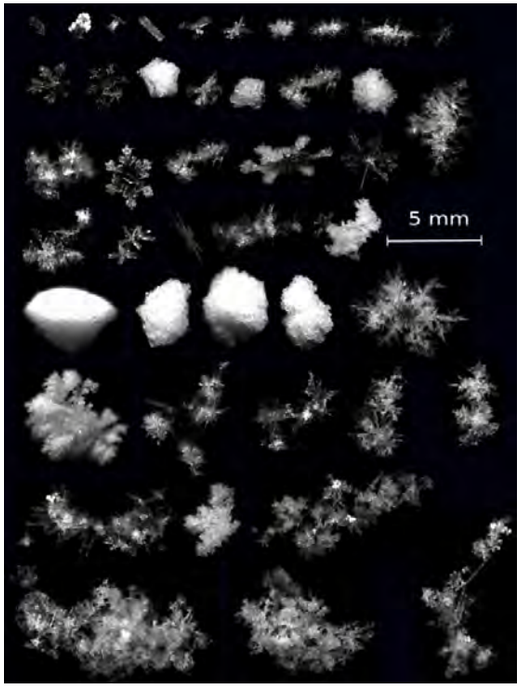
Pored brojnih već pomenutih oblika padavina, na ovom mestu će naročita pažnja biti posvećena kiši, snegu i gradu.

Kiša (slika 5.9) se sastoji od kapljica vode (prečnika većeg od 0,5 mm) koje padaju iz oblaka i čija se gustina i dimenzije (prečnik) značajno razlikuju u zavisnosti od porekla i intenziteta padavina (slabe stratusne: 0,5–2,0 mm; umerene stratusne: 1,0–2,6 mm, jake pljuskovite s grmljavinom: 1,2–4,0 mm). Oblaci iz kojih uvek pada kiša su nimbostratusi i kumulonimbusi. Intenzitet kiše varira od 1 mm h^{-1}, za slab pljusak, do 25 mm h^{-1}, u slučaju jakih pljuskova.

Slika 5.9.

Kiša

Sneg (slika 5.10) se sastoji od kristala leda (pojedinačni ili slepljeni zajedno) koji padaju iz oblaka i čiji se oblik, koncentracija i spektar dimenzija značajno razlikuju u zavisnosti od temperature i supersaturacionih uslova u kojima se razvijaju. U toku jedne jedine snežne epizode možemo videti gotovo sve tipove kristala. Na temperaturama iznad –5 °C, kristali, zamrznute kapljice i otopljeni (pa smrznuti) delovi kristala drže se zajedno formirajući tipične pahuljice. Na većim geografskim širinama (bliže polovima) sneg pada isključivo u obliku ledenih kristala. Visoki stratusi, tj. nimbostratusi, čiji se veći deo nalazi iznad nulte izoterme, odgovorni su za stvaranje snežnih padavina (niži stvaraju kišu). Definicija intenziteta padavina, koja je već spominjana, potpuno može da se primeni i na snežne padavine; međutim, postoji dodatna definicija intenziteta ovih padavina – na osnovu njihovog uticaja na vidljivost. U tom slučaju se intenzitet snega opisuje kao slab (ako je vidljivost 1 km ili više), umeren (između 0,5 i 1 km) ili jak (manje od 0,5 km).



Slika 5.10.

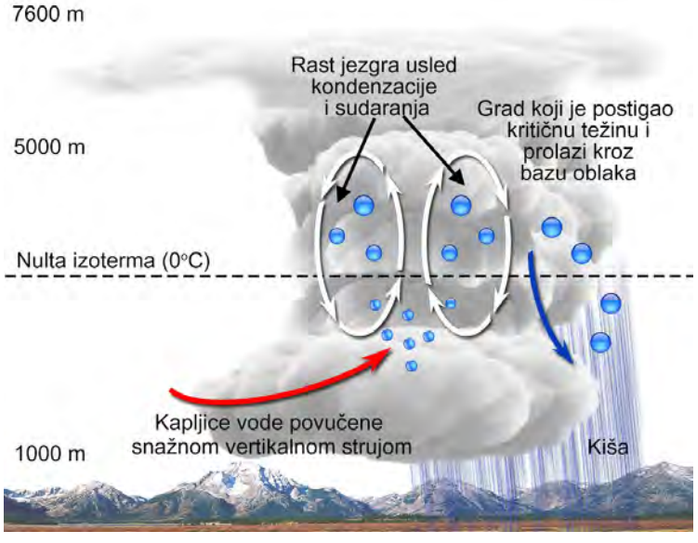
Sneg (Garrett et al., 2012)

Grad čine komadići leda koji su providni, delimično neprozirni ili potpuno neprozirni; oni imaju sferni, konusni ili nepravilan oblik, s prečnikom od 5 do 50 mm (slika 5.11). Širok dijapazon veličina i oblika grada može se naći čak i u samo jednoj padavinskoj epizodi. Svaki komad grada sastoji se od centralnog jezgra (komadić leda prečnika do 1 cm), obično okruženog s pet slojeva neprozirnog i/ili providnog leda. Okruženje koje je potrebno za formiranje grada

Slika 5.11.

Grad

su kumulonimbusi s intenzivnim vertikalnim razvojem i velikim sadržajem tečne vode: to podrazumeva da postoji snažno vertikalno uzdizanje unutar oblaka (35 m s^{-1}) i da je značajan deo oblaka daleko iznad nulte izoterme (slika 5.12). Zahvaćeno uzlaznim kretanjem, jezgro se kreće naviše i raste, usled kondenzacije na njegovoj površini i sudaranja sa oblačnim kapljicama i kapima kiše (ispod izoterme od 0 °C), snežnim pahuljama i ledom (iznad izoterme od 0 °C), sve dok njegova težina ne nadvlada silu koja dovodi do uzlaznog kretanja. Nakon toga, grad koji je nastao kreće se nadole i počinje da se topi kada pređe nultu izotermu. Kada stigne do donje baze oblaka, formirani komad grada može proći kroz nju i početi da pada ka Zemlji ako je njegova težina veća od sile uzlaznog kretanja. U protivnom, biće zahvaćen inercijom i krenuti u naredni krug kroz kumulonimbus, u kome će rasti pri uzdizanju i smanjivati se pri padanju. U svakom ciklusu grad stiže do donjih delova oblaka i formira još jedan ledeni sloj. Nakon što postigne kritičnu težinu, grad prolazi kroz bazu oblaka. Na putu ka Zemlji grad isparava i udara u tlo u vidu smanjenog komada leda ili kiše. Grad je uvek praćen padavinama velikog intenziteta, ukoliko se jave i pljuskovi, oni će biti praćeni grmljavinskom nepogodom.



Slika 5.12.

Formiranje grada

Prostorna raspodela padanja grada je često u obliku uskog i dugačkog pojasa. Pošto je povezan s kumulusnom konvekcijom, grad se obično javlja u popodnevnim satima (od 12 do 15 časova u 20% slučajeva, od 15 do 20 časova u 50% slučajeva), dok se ređe javlja u jutarnjim i večernjim satima (od 20 do 1 čas u 13% slučajeva).

Ukoliko produkti kondenzacije vodene pare u vidu kiše ili snega prođu kroz donju bazu oblaka, na putu do Zemlje oni ispare i nikada ne stignu do tla, pa se ova pojava naziva – *virga*. Virga je tipična za leto, doba u kome kišne kapi padaju kroz topao i suv vazduh u kome isparavaju i nestanu u atmosferi.

5.4.2. Hidrometeori nastali depozicijom čestica

Depozicija tečne ili smrznute vode na nekoj podlozi ili objektu može uticati na njihovu vlažnost i trenje. Ponekad se ovi produkti nazivaju i „niske padavine“ ili „padavine pri tlu“ i u njih se ubrajaju: rosa, rosulja, slana, inje i poledica. U nekim regionima Južne Amerike i Bliskog istoka sakupljanje rose i magle je važan izvor vode.

Kapljice magle mogu da se deponuju na površinama čija je temperatura iznad 0 °C.

Rosa je rezultat direktne kondenzacije vodene pare iz atmosfere na površinama čija je temperatura iznad 0 °C (slika 5.13). Količina sakupljene rose retko prelazi 0,5 mm, mada teoretski može biti i 0,8 mm. Na niskim temperaturama rosa se smrzava stvarajući *inje*.

Slika 5.13.
Rosa

Rosulja se sastoji od kapljica vode, prečnika manjeg od 0,5 mm, koje iz vrlo niskog stratusnog oblaka, kroz često prisutnu maglu, stižu do površine tla.

Slana je rezultat sublimacije vodene pare iz atmosfere na različitim površinama i ima oblik kristala (slika 5.14).

Poledica je rezultat smrzavanja prehlađene rosulje ili kiše na površinama čija je temperatura ispod 0 °C. Ovo dovodi do stvaranja ledene glazure na tlu ali i objektima i biljkama.

Slika 5.14.
Slana

5.4.3. Čestice nošene vetrom

Čestice vode, u tečnom ili čvrstom stanju, koje podiže vetar, često na malim prostornim razmerama, mogu značajno uticati na vlažnost vazduha i zemljišta, prisustvo i dubinu snega, kao i na vidljivost.

Snežni nanosi su posledica vetra koji podiže sneg sa tla (slika 5.15). Udaljenost do koje će sneg biti prenesen i visina snežnih nanosa zavise od brzine i intenziteta vetra, kao i gustine, stanja i starosti snega. Mnogo dana posle padanja snega, jak vetar može izazvati ozbiljne probleme i stvoriti značajne snežne nanose na putevima, posebno u ravnici.

Slika 5.15.
Snežni nanosi

5.5. Uticaj oblaka i padavina na biljke

Oblaci i padavine snažno utiču na energetski i vodni bilans zemljišta, vazduha i biljnog pokrivača. Stratokumulusi godišnje pokrivaju 20% površine Zemlje, više iznad okeana (23%) nego iznad kopna (12%). U slučaju stratusa, srednja godišnja oblačnost iznosi oko 10%. Iako su horizontalne razmere kumulusa obično mnogo manje od onih koje imaju stratusi, ovi oblaci mogu uticati na energetski i vodni bilans lokalno, tj. na neposrednu lokaciju ispod oblaka, intenzivnom apsorpcijom (zbog svojih značajnih vertikalnih razmera) i visokom reflektivnošću Sunčevog zračenja.

Uticaj oblaka na energetski bilans. Uticaj oblaka na energetski bilans je dvostruk: a) apsorbovanjem i reflektovanjem oblaci smanjuju intenzitet upadnog Sunčevog zračenja na njegovom putu kroz atmosferu i b) povećavaju dugotalasno zračenje u atmosferi tako što povećavaju protivzračenje atmosfere i reflektovano Zemljino izračivanje. Primetan je čak i uticaj tankih cirusa i cirostratusa na temperaturu zemljišta. Pored toga, mogu se očekivati značajne promene temperature zemljišta i vazduha u prisustvu stratusa i stratokumulusa zbog njihovih značajnih horizontalnih razmera, debljine i prosečnog vremena zadržavanja. Tokom

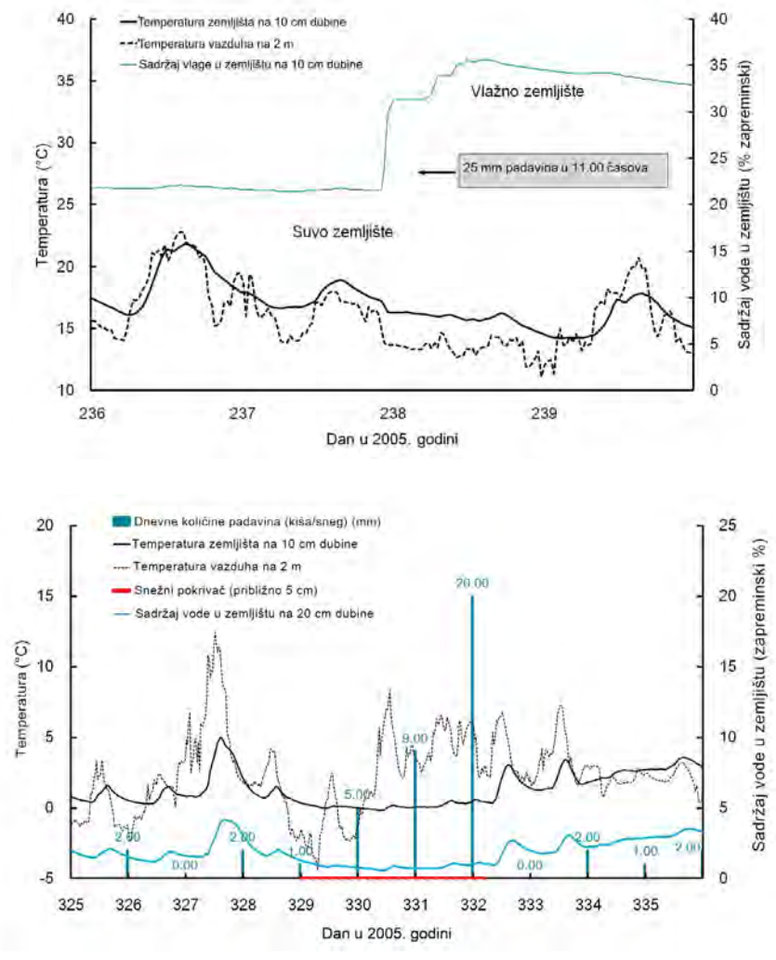
leta prisustvo ovih oblaka snižava temperaturu, pošto efekti smanjenja upadnog Sunčevog zračenja prevazilaze efekte povećanog dugotalasnog zračenja. Tokom zime, a posebno u rano proleće, kada je intenzitet upadnog Sunčevog zračenja smanjen, povećanje dugotalasnog zračenja može značajno povećati energetski bilans Zemljine površine. Poznato je da prisustvo oblaka tokom hladne mrazne noći može povećati temperaturu vazduha za nekoliko stepeni i ublažiti gubitke uzrokovane niskim temperaturama.

Prisustvo kumulusa, a naročito stratokumulusa i kumulonimbusa, može izazvati značajan pad temperature zemljišta i vazduha. Efekte visoke reflektivnosti ovih oblaka, posebno u slučaju kada su snežno beli kumulusi razasuti širom neba, ne treba potcenjivati. Ponašajući se kao savršene reflektivne površine, ovi oblaci mogu prouzrokovati značajno povećanje intenziteta Sunčevog zračenja na malom prostoru, čak premašujući solarnu konstantu (intenzitet Sunčevog zračenja na vrhu atmosfere). Ovakav kratkotrajan snop Sunčevog zračenja visokog intenziteta može izazvati ožegotine i ozbiljno oštetiti biljke.

Uticaj oblaka na vodni bilans. Čak i kada ne dođe do padavina, prisustvo oblaka može uticati na vlažnost vazduha i zemljišta. Ovo se najbolje može uočiti kroz njihov uticaj na promenu intenziteta isparavanja i evapotranspiracije kao posledicu: a) promene temperature zemljišta i vazduha usled stvaranja senke na površini zemljišta i b) povećanja vlažnosti površinskog sloja atmosfere, što je posledica smanjenog vertikalnog transporta vodene pare s površine tla u slobodnu atmosferu.

Uticaj padavina na energetski bilans. Efekat padavina na energetski bilans se manifestuje kroz: a) promene toplotnih karakteristika zemljišta, b) povećanje intenziteta isparavanja i evapotranspiracije sa zemljišta i biljnog sklopa i c) njihovu ulogu toplotnog izolatora, u slučaju snega, koji štiti zemljište i biljke.

Povećana vlažnost zemljišta, uzrokovana padavinama, povećava toplotni kapacitet i provodljivost, što značajno utiče na energetski bilans zemljišta. Smanjenje temperature nakon kiše (slika 5.16, gore) je značajnije i izraženije kod vazduha nego kod zemljišta. Ovaj efekat je posebno važan u jesen, kada vlažno zemljište akumulira više energije od suvog, i provodi je dublje u zemlju. Tokom zime i ranog proleća, kada temperatura zemljišta raste s dubinom, povećana provodljivost zemljišta povećava prenos energije prema površini, čime se povisuje temperatura površinskog sloja zemljišta i vazduha, a to smanjuje štete na biljkama, uzrokovane niskim temperaturama.

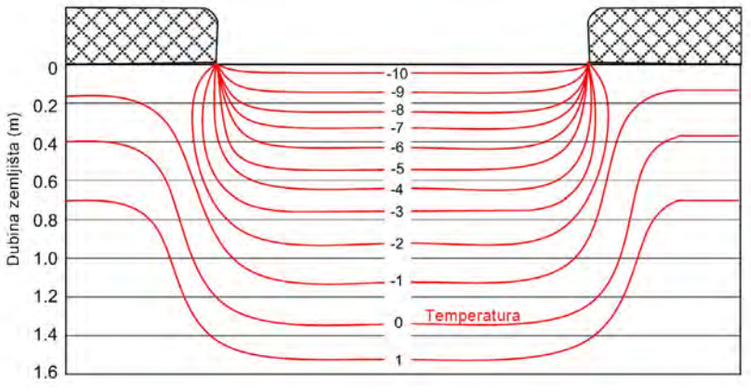


Slika 5.16.

Dnevno kolebanje temperature zemljišta pre i posle kiše (gore) i snežnih padavina (dole)

Isparavanje padavina zadržanih na površini biljke obavlja se na isti način kao isparavanje sa slobodne vodene površine (naravno, ako su tečne padavine). Energija potrebna za isparavanje se oduzima od biljke, a rezultat je snižavanje njene temperature. Povećanje vlage u zemljištu obično povećava isparavanje sa golog zemljišta i evapotranspiraciju sa površina pod vegetacijom, snižavajući temperaturu obe sredine.

Kada je prisutan na tlu ili na površini biljke, sneg može igrati ulogu izolatora tokom mraznih dana, posebno u rano proleće, sprečavajući hlađenje biljaka ispod 0 °C. Kada je tokom zime zemljište bez vegetacije, snežni pokrivač smanjenje energetske gubitke i dnevne varijacije temperature zemljišta (slika 5.16, dole). Ako zemljište nije bilo smrznuto pre nego što je pao sneg, njegova temperatura u blizini površine pod zatvorenim snežnim pokrivačem ostaje na približno 0 °C, što je važno za zaštitu ozimih useva od mraza (slika 5.17).



Slika 5.17.

Idealizovani profil temperature zemljišta sa i bez snežnog pokrivača

Uticaj padavina na vodni bilans. Padavine u tečnom stanju koje direktno ulaze u zemljište povećavaju njegov sadržaj vlage, isparavanje i površinsko oticanje. Međutim, povećanje vlage u zemljištu nije uvek proporcionalno količini vode koja stiže na površinu zemlje. U slučaju golih zemljišta, njihov tip i struktura, kao i intenzitet padavina mogu značajno uticati na tok povećavanja vlage u zemljištu.

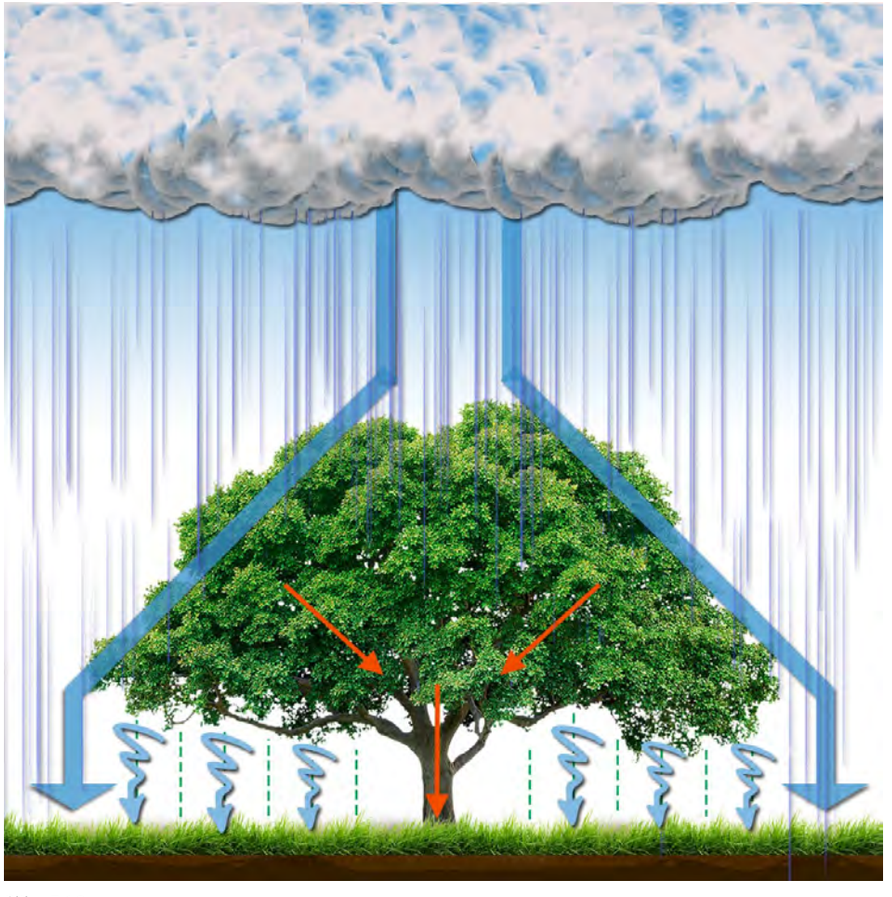
Čak i u slučaju zemljišta s velikim vodnim kapacitetom, kao što je černozem, padavine velikog intenziteta će vrlo umereno povisiti nivo vlage ukoliko je zemljište vrlo sabijeno i ako je dugo bilo suvo, s pokoricom i pukotinama na površini. Izgleda da se zbog gubitaka površinskim oticanjem i premeštanjem u dublje slojeve zemljišta, samo deo dodane vode zapravo upotrebi za povećavanje vlažnosti zemljišta. U slučaju optimalno vlažnih i dobro strukturisanih zemljišta, njihov tip i struktura, kao i faza razvoja gajenih useva takođe mogu uticati na apsorpciju vode od padavina. Na primer, u slučaju žitarica, posle bokorenja slaba kiša od 3,8 mm h^{-1} će biti apsorbovana u iznosu od 1,8 mm h^{-1}, dok se kiša visokog intenziteta od 24,3 mm h^{-1} absorbuje u količini od 10,4 mm h^{-1}. Nekoliko meseci kasnije, nakon cvetanja, isti intenziteti padavina će biti apsorbovani u iznosima od 0 mm h^{-1} i 16,6 mm h^{-1}.

Snežni pokrivač se obično topi polako, odvodeći vlagu u površinski sloj zemljišta i obezbeđujući produženo vlaženje zemljišta.

Prisustvo vegetacije može narušiti uticaj padavina na vodni bilans zemljišta zaklanjajući obraslu površinu do te mere da kiša uopšte ne može doći do zemlje, te tako biva zadržana na površini biljke – što se obično naziva *intercepcija* (zadržavanje) vode. Efekat zaklanjanja i odgovarajuća neravnomerna raspodela vlage u površinskom sloju zemljišta zavise od vrste vegetacije, faze rasta i strukture i gustine biljnog sklopa (slika 5.18). Zadržavanje vode na biljki dodatno zavisi od količine padavina. U slučaju kada je pao, recimo, 1 mm kiše, možemo smatrati da će sva kišnica biti zadržana na površini biljaka. Kako se intenzitet kiše povećava, količina vode koja stiže do zemljišta proporcionalno se povećava. Uopšteno gledano, maksimalna stopa intercepcije može biti do 50%. Listovi listopadnog drveća, na primer, mogu zadržati 20 do 30% od pale kiše. Efekat zadržavanja vode na površini biljke nije važan samo zbog smanjenja količine vode koja stiže do zemljišta tokom padavinske epizode, već i zbog slivanja vode sa listova, koje traje dugo posle prestanka padavina. Ovaj efekat može ponekad dovesti u pitanje tačnost merenja padavina unutar biljnog sklopa. Dok će deo zadržane vode ispariti, značajna količina će ipak doći do zemljišta; posebno u slučaju velikog intenziteta padavina i suvog zemljišta, zadržana voda može da obezbedi vlaženje zemljišta dugo nakon prestanka padavina.

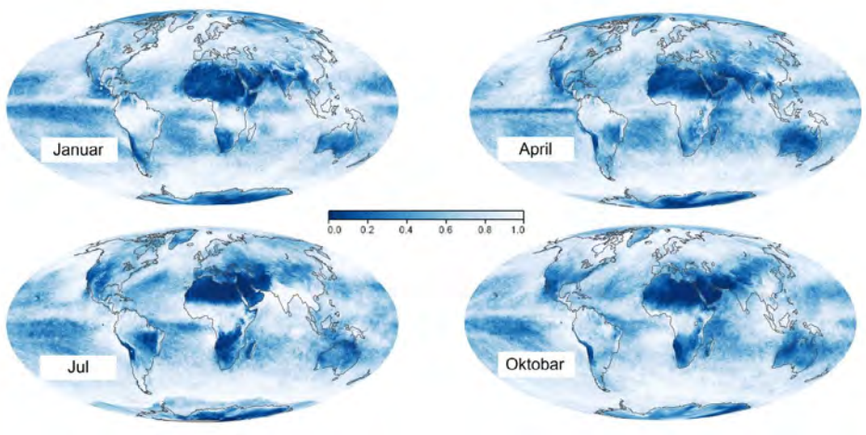
5.6. Uticaj biljaka na oblake i padavine

Prisustvo vegetacije igra važnu ulogu u energetskom i vodnom bilansu Zemljine površine, u razmerama od mikro (kao što je njiva) do planetarnih. Nedavno istraživanje je pokazalo da u delovima sveta kao što je afrički region Sahel, prisustvo vegetacije može promeniti godišnju količinu padavina do 30%. Pošto biljke pokrivaju više od 20% površine Zemlje, uloga biljnog pokrivača kao modifikatora klime je jasna, čak i ako je njegov neposredni uticaj na vremenske prilike možda manje evidentan.



Slika 5.18.

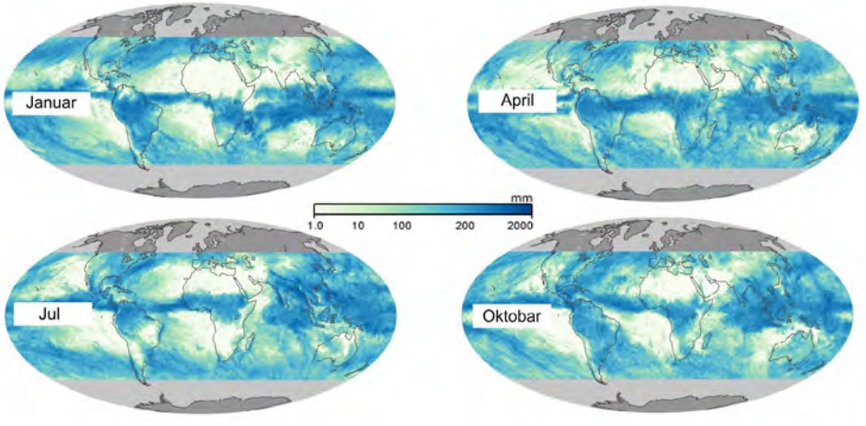
Uticaj vegetacije na raspodelu padavina na površini zemljišta



Slika 5.19.

Globalna distribucija oblačnosti za 2001
[izvor: Zemaljska opservatorija NASA, SAD (NASA Earth Observatory, USA), https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_CLD_FR]

Prisustvo biljaka menja albedo površine kao i toplotne i hidrološke karakteristike zemljišta. Biljke utiču na: a) razmenu energije između površine zemlje i atmosfere, koja je značajan pokretač atmosferske cirkulacije; b) razmenu vlage između atmosfere i površine zemlje; c) uobičajene pravce prostiranja vazdušnih masa i d) turbulentni transfer toplote, količine kretanja i vlage između vegetacije i atmosfere. Zato što menja temperaturu i vlažnost zemljišta i vazduha, intenzitet isparavanja i transpiracije, brzinu vetra i efikasnost prenosa vlage od površine u atmosferu, vegetacija značajno utiče na procese kondenzacije u atmosferi, a time i na formiranje oblaka i padavina. Uticaj vegetacije na ove meteorološke elemente razrađen je u prethodnim poglavljima, dok ćemo u sledećem poglavlju razmotriti atmosfersku cirkulaciju i uticaj vegetacije na nju.



Slika 5.20.

Srednja mesečna globalna raspodela padavina za 2001
[izvor: Zemaljska opservatorija NASA, SAD (NASA Earth Observatory, USA), https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/TRMM_3B43M]

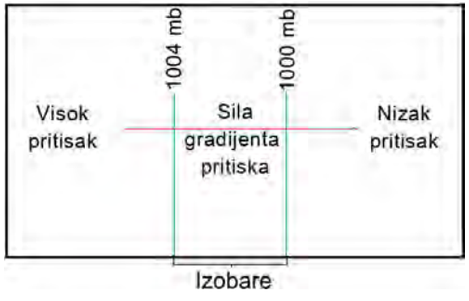
6. Atmosferska cirkulacija i vetrovi

Vetar ima mnogo oblika: od vazduha koji neprekidno cirkuliše oko Zemlje do lokalnih povetaraca koji nestaju s prvim zracima sunca. Vetrove pokreću „snage prirode", a modifikuje ih priroda terena iznad koga duvaju, prenoseći toplotu, vlagu i količinu kretanja s jednog kontinenta na drugi ili s jedne njive na drugu. Iako nevidljivi, na njihovo prisustvo nas podsećaju bezbrojni efekti, bilo da se radi o promicanju padajućeg lista, bilo o čupanju starog drveća iz korena.

Razlike u pritisku, od globalnih do lokalnih, prisiljavaju vazduh da se kreće. Tokom kretanja na njega deluju i centrifugalna i Koriolisova sila, koje su posledice rotacije Zemlje i koje doprinose formiranju atmosferske cirkulacije kakvu mi danas poznajemo. Ovo poglavlje se bavi horizontalnim kretanjem vazduha – vetrom – upravljačkom silom i modifikatorom svih atmosferskih procesa.

6.1. Sile koje dovode do atmosferskih kretanja

Sila gradijenta pritiska. Vetar je vazdušna struja koja se kreće skoro horizontalno iznad Zemljine površine, od višeg ka nižem atmosferskom pritisku. Efekte vetra je lako uočiti, ali šta stvara ovaj fenomen? Podsetimo se da je atmosferski pritisak sila kojom vazduh deluje na jediničnu horizontalnu površinu. Ako je sila koja deluje na neku zamišljenu vertikalnu površinu na jednom mestu veća nego na drugom, to znači da postoji promena ove sile duž posmatranog horizontalnog pravca i s njom povezanog pritiska.



Slika 6.1.
Sila gradijenta pritiska

Tada kažemo da postoji horizontalni gradijent (promena duž pravca) pritiska. Neto sila, koja obezbeđuje kretanje vazduha, usmerena je s mesta višeg pritiska ka mestu nižeg pritiska, što je suprotno od orijentacije gradijenta pritiska (∇p), Treba imati na umu da je, *prema definiciji*, gradijent uvek usmeren u pravcu povećanja posmatrane veličine. Sila koja dovodi do kretanja vazduha kao rezultat prisustva gradijenta pritiska naziva se *sila gradijenta pritiska* [redacted], i po jedinici mase vazduha može se izraziti u obliku:

[redacted] (6.1)

gde je r gustina vazduha. Bez obzira šta je uzrok razlike pritiska (neto neravnoteža zračenja, uzlazni ili silazni vazduh), ona je glavna upravljačka sila koja stvara vetar.

Sila trenja. U atmosferi sila trenja [redacted] stvara otpor kretanju vazduha i javlja se između slojeva vazduha ili u kontaktu sa čvrstom površinom. Ona uvek deluje u smeru suprotnom od smera kretanja vazduha. Zato se može izračunati kao

[redacted] (6.2)

gde je k koeficijent trenja, a [redacted] brzina vazduha. Pošto vazduh nije naročito viskozan, trenje koje je povezano s kretanjem na molekularnom nivou može biti od značaja samo u vrlo tankom sloju vazduha u blizini čvrste površine; on se obično naziva viskozni sloj, a ovaj vid trenja – viskozno trenje.

Centrifugalna sila. Sva tela na površini Zemlje, uključujući i atmosferu, nalaze se pod uticajem centrifugalne sile [redacted], koja je rezultat rotacije planete

i usmerena je od centra rotacije. Njen intenzitet zavisi od brzine tela i njegove udaljenosti od ose rotacije (r), što se obično izražava u obliku:

(6.3)

Kružno kretanje delića vazduha u atmosferi, često povezano sa depresijama koje prate centre niskog pritiska (kao u slučaju tornada), rezultat je ravnoteže sile gradijenta pritiska i centrifugalne sile.

Koriolisova (Coriolis) sila. Ponekad nazivana i „prividna", Koriolisova sila je posledica rotacije Zemlje i utiče samo na atmosferska kretanja čije su prostorne razmere od nekoliko stotina kilometara do onih planetarnih. Uticaj geografske širine na intenzitet Koriolisove sile je značajan. Kako bi ga direktno izrazili, nezavisno ćemo posmatrati zonalnu (u pravcu zapad–istok, F_{cx}) i meridionalnu (u pravcu sever–jug, F_{cy}) komponentu Koriolisove sile, što se može izraziti u obliku:

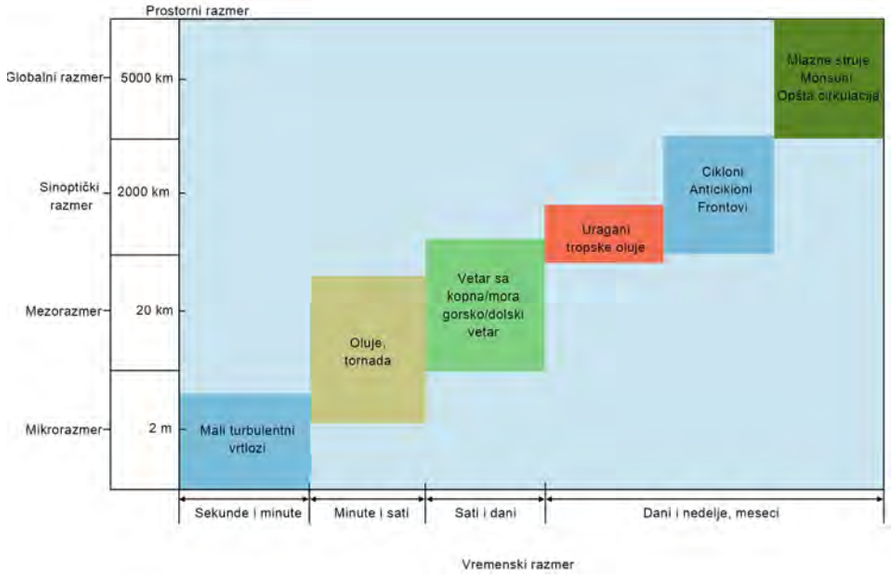
(6.4)

gde su u i ϖ zonalna i meridionalna komponenta brzine vetra, Ω je ugaona brzina Zemlje ($7{,}27 \cdot 10^{-5}$ rad s^{-1}), a φ je ugao geografske širine u odnosu na ekvator. Na osnovu definicije Koriolisove sile i jednačine (6.4), možemo zaključiti da pomenuta sila ima najveću vrednost na polovima, a smanjuje se prema Ekvatoru ($\varphi = 0$ rad). Iz tog razloga, vazduh koji se kreće sa severa na jug (od pola ka ekvatoru) skreće udesno (ka zapadu) na severnoj, a ulevo na južnoj hemisferi.

6.2. Razmere atmosferskog kretanja

Vetar je „pokretačka snaga" vremena. On upravlja cirkulacijom vazduha na obe hemisfere, pokreće vazdušne mase s jednog kontinenta na drugi, ili, jednostavno, obezbeđuje lagani vetar s planine nakon vrelog letnjeg dana. „Hijerarhija" atmosferskih kretanja – od globalnih do lokalnih razmera – i njihovo tipično trajanje određuje razmere ovih kretanja (slika 6.2). Pored toga, neka atmosferska kretanja su periodična na različitim prostornim i vremenskim razmerama i mogu da utiču na vreme i klimu čak i na kontinentalnim razmerama.

U nastavku ovog poglavlja, pažnja će biti posvećena globalnoj cirkulaciji atmosfere i, delimično, kretanjima sinoptičkih razmera. Čitalac treba da ima u vidu da će se izraz „lokalni" koristiti za vetrove koji su karakteristični za određeni region, bez namere da se pretpostave njihove (male) razmere.



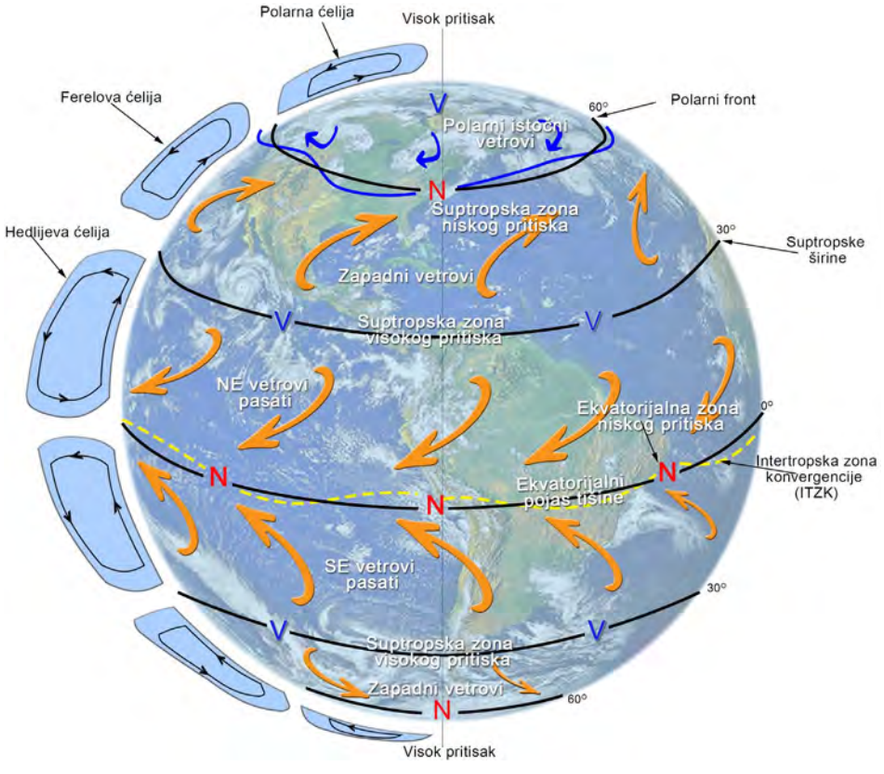
Slika 6.2.

Tipične razmere atmosferskih kretanja

6.2.1. Opšta cirkulacija atmosfere - globalni vetrovi

Vetrovi koji čine opštu cirkulaciju atmosfere duvaju preko cele hemisfere, a njihov životni vek premašuje dane, pa čak i nedelje. Ovi vetrovi i njihove tipične trajektorije povezani su s globalnom raspodelom atmosferskog pritiska na nivou mora, koja je rezultat neravnoteže u energetskom bilansu Zemlje, odnosno njenom neravnomernom zagrevanju. S druge strane, tako proizvedena globalna cirkulacija smanjuje efekte ovog energetskog debalansa, prenoseći hladni vazduh prema ekvatoru, a topli prema polovima.

Da bi se bolje razumela horizontalna raspodela atmosferskog pritiska i rezultujuća opšta cirkulacija atmosfere, poći ćemo od idealizovane raspodele pritiska na nivou mora i fenomena stalnih (preovlađujućih) vetrova (slika 6.3). Pritom, važno je imati na umu da lokalni faktori mogu značajno uticati na promenu preovlađujućih vetrova.



Slika 6.3.

Idealizovana raspodela površinskog pritiska i stalnih vetrova

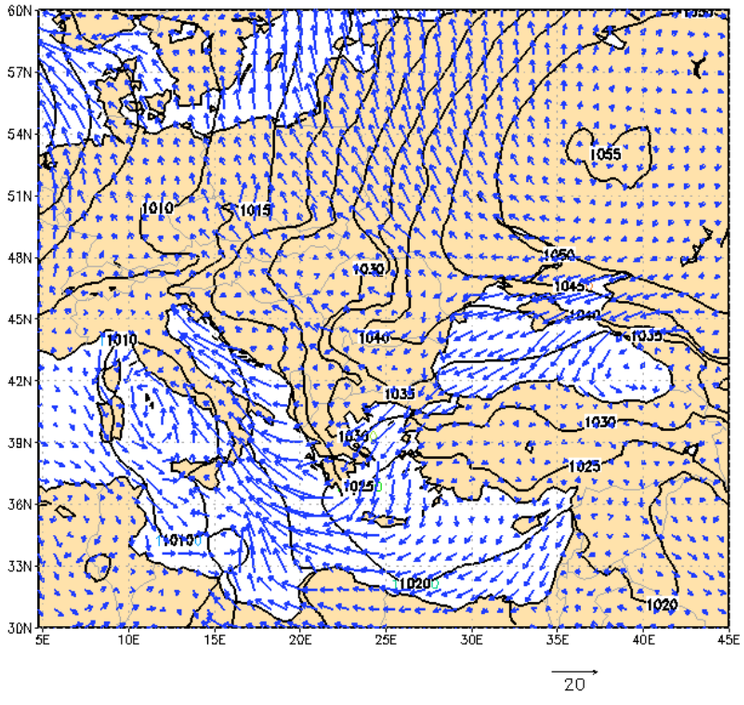
Tokom godine najveća količina Sunčevog zračenja stiže u oblasti u okolini ekvatora. Zagrevanje Zemljine površine i vazduha stvara intenzivnu termičku konvekciju koja dovodi do uzdizanja vazduha čak do tropopauze, ostavljajući područje *niskog pritiska* na površini. Tropopauza se ponaša kao barijera koja primorava vazduh da se kreće duž meridijana prema polovima do oko 30° geografske širine. Ovo dovodi do povećanja mase vazduha na suptropskim širinama i stvaranja područja *visokog pritiska* u ovom regionu.

Kakve vremenske prilike prate atmosfersku cirkulaciju koja je posledica ovakve raspodele pritiska? Uzdizanje toplog i vlažnog vazduha u ekvatorijalnoj zoni dovodi do kondenzacije vodene pare i formiranja kumulusa. Oslobođena latentna toplota kondenzacije pojačava uspostavljenu cirkulaciju formirajući u blizini ekvatora zonu intenzivne konvektivne aktivnosti praćene grmljavinom – intertropsku zonu konvergencije (ITZK). Uspostavljeni gradijent pritiska između 30° i 0° geografske širine uzrokuje vetrove u pravcu ekvatora koji, zbog Koriolisove sile, skreću ka zapadu na severnoj hemisferi i ka istoku na južnoj hemisferi. Ti vetrovi nazvani su trgovački vetrovi jer su u prošlosti oni nosili trgovačke brodove prema istočnoj obali Južne Amerike.

Nasuprot ekvatorijalnoj zoni, manjak zračenja na polovima stvara područje hladnog, gustog vazduha i *visokog pritiska* i uspostavlja cirkulaciju vazduha od polova ka srednjim širinama (50°–70° geografske širine), gde se nalazi tzv. subpolarna zona *niskog pritiska*. Kao rezultat uspostavljene raspodele površinskog pritiska, zapadni vetrovi kreću iz suptropske zone visokog pritiska i duvaju u pravcu zapad–istok na severnoj hemisferi, između 30° i 60° geografske širine. Istovremeno, polarni istočni vetrovi – suvi i hladni – duvaju između zona visokog pritiska, na Severnom i Južnom polu, i područja niskog pritiska, na srednjim geografskim širinama.

6.2.2. Vetrovi sinoptičkih razmera

Atmosferska cirkulacija sinoptičkih razmera uključuje fenomene čiji je životni vek od jednog ili dva dana do jedne nedelje. Prostorne razmere od nekoliko stotina do hiljadu kilometara karakteristične su za atmosferske pojave kao što su cikloni, anticikloni i frontovi. Ove pojave često prate uragani i tropske oluje, ali i vetrovi sinoptičkih razmera, koji su posledica specifične raspodele polja visokog i niskog pritiska. Jedan primer je dat na slici 6.4, koja ilustruje sinoptičku situaciju iznad Mediterana, jugoistočne i istočne Evrope, dana 1. februara 2014. Na sinoptičkoj karti su prikazani: polje atmosferskog pritiska, prisutni frontovi i pravac i smer duvanja vetra (plave strelice). Polje visokog pritiska iznad istočne Evrope i niskog pritiska u području zapadnog Mediterana formira veliki gradijent pritiska koji se proteže preko Balkanskog poluostrva. Ovo dovodi do uspostavljanja cirkulacije i stvaranja vetrova koji duvaju iz područja visokog ka području niskog vazdušnog pritiska. Na svom putu preko istočne Evrope vetar nailazi na Karpate. Na prelasku preko planinskog masiva brzina vetra se značajno povećava (iznad 11 m s^{-1}), te dolazi u Srbiju dolinom Dunava kao jugoistočni vetar, poznat pod nazivom košava.



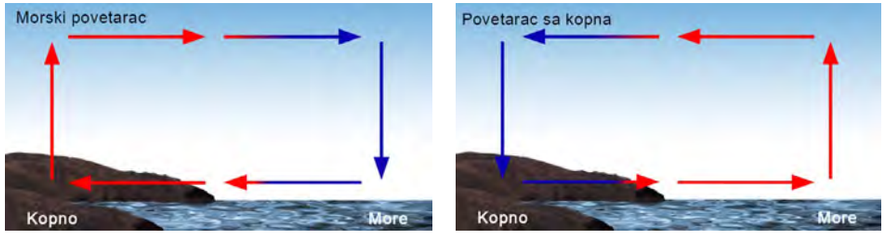
Slika 6.4.

Sinoptička situacija iznad Evrope za 1. februar 2014.

6.2.3. Lokalni vetrovi

Lokalni vetrovi su vetrovi malih do srednjih prostornih razmera (od desetak do stotinak kilometara), traju nekoliko sati ili dana i uglavnom su uzrokovani regionalnim reljefom. U zavisnosti od izvorišta, lokalni vetrovi se mogu podeliti na sledeće: vetrove s mora i s kopna, planinske i dolinske, anabatske i katabatske vetrove, monsune i fenove.

Vetar s mora i vetar s kopna (slika 6.5) nastaje kao rezultat razlike u toplotnom kapacitetu između kopna i vode a može se zapaziti u vidu vetra koji duva iz pravca velike vodene površine ka kopnu i obrnuto. Sa mnogo većim kapacitetom da apsorbuje dolazeće Sunčevo zračenje, voda se sporije greje i sporije hladi od kopna. Iz tog razloga je leti tokom dana vazduh iznad mora hladniji nego iznad kopna, a topliji je noću. Iznad hladnije površine hladniji i gušći vazduh formira veći atmosferski pritisak. Razlika u pritisku pokreće vazduh iznad mora da krene ka kopnu (*vetar s mora*) tokom dana, a od kopna ka moru (*vetar s kopna*) tokom noći.

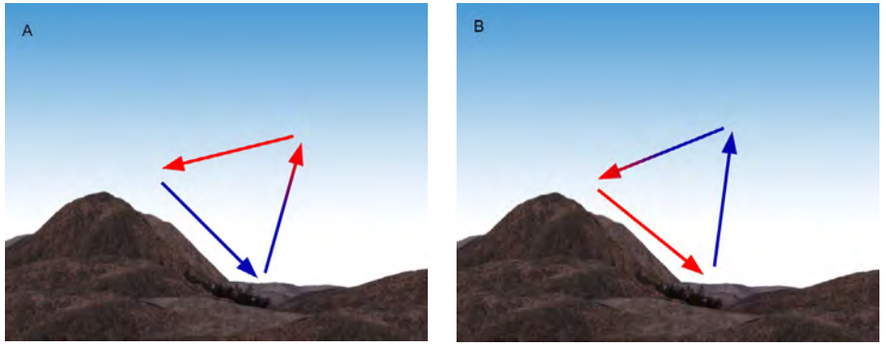


Slika 6.5.

Vetar s mora i vetar s kopna

Planinski i dolinski vetrovi se obično javljaju u brdsko-planinskim predelima (slika 6.6). Ovi vetrovi su rezultat razlike u zagrevanju između planinskih vrhova, padina i dolina tokom 24 sata. U toku dana najintenzivnije se zagrevaju planinski vrhovi, dok hladniji vazduh duže ostaje u dolinama formirajući područje visokog pritiska. Tako stvorena razlika pritisaka proizvodi vetrove koji duvaju uzbrdo i čija snaga raste od izlaska sunca do podneva: to su *dolinski vetrovi*. Nasuprot tome, *planinski vetrovi* obično duvaju tokom večeri i noću, kada planinski vrhovi postaju hladniji; tada sila gradijenta pritiska uz pomoć gravitacije stvara vetar koji duva niz padinu. Ova vrsta se naziva i drenažni vetar. Planinski i dolinski vetrovi se javljaju periodično, u skladu s dnevnim ciklusom.

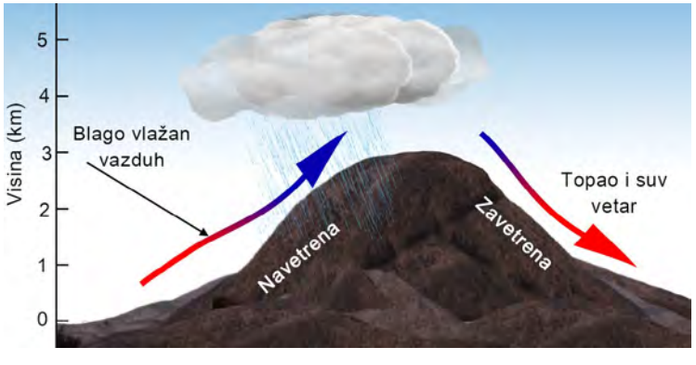
Slično prethodnim, *anabatski i katabatski vetrovi* se kreću niz i uz padine, ali su ovi izrazi rezervisani za vetrove jačeg intenziteta od planinskih i dolinskih vetrova. Na primer, katabatski vetrovi mogu dostići uraganske brzine dok duvaju niz padinu.



Slika 6.6.

Anabatski (A) i katabatski (B) vetrovi

Fen je generičko ime koje se u početku koristilo za suve, tople i često jake vetrove koji se javljaju u Alpima i duvaju niz planinske padine (slika 6.7). Danas se ovaj izraz koristi za sve vetrove koji imaju isti mehanizam nastanka. Fen se javlja kada se vazduh uzdiže uz strme padine visokih planina. Na početku vazduh se uzdiže suvoadijabatski (~1 °C / 100 m). Kada se uzdigne dovoljno visoko, hlađenje dovodi do kondenzacije i formiranje oblaka. U njima (ili bar u vazduhu u kome je otpočela kondenzacija) se dalje uzdizanje i hlađenje obavlja vlažnoadijabatski (~0.6 °C / 100 m), često praćeno padavinama i značajnim gubitkom vlage unutar vazduha koji se uzdiže na navetrenoj strani planine. Nakon prelaska planinskog vrha, ovaj mnogo suvlji vazduh se brzo spušta i usled toga zagreva: najpre sporije, vlažnoadijabatski, dok kapljice vode ne ispare i vlažnost se ne smanji ispod saturacione, a zatim brže – suvoadijabatski. Ukoliko je zbog padavina na navetrenoj strani planine vazduh izgubio vlagu, na zavetrenoj strani će donja baza biti na većoj visini. Zato će se vazduh na zavetrenoj strani duže spuštati suvoadijabatski nego na navetrenoj, što će dovesti do njegovog bržeg zagrevanja pri spuštanju nego što je bilo hlađenje pri uzdizanju. Otuda vazduh koji je bio hladan i vlažan na navetrenoj strani može biti suv i topao na istoj visini na zavetrenoj strani planine.

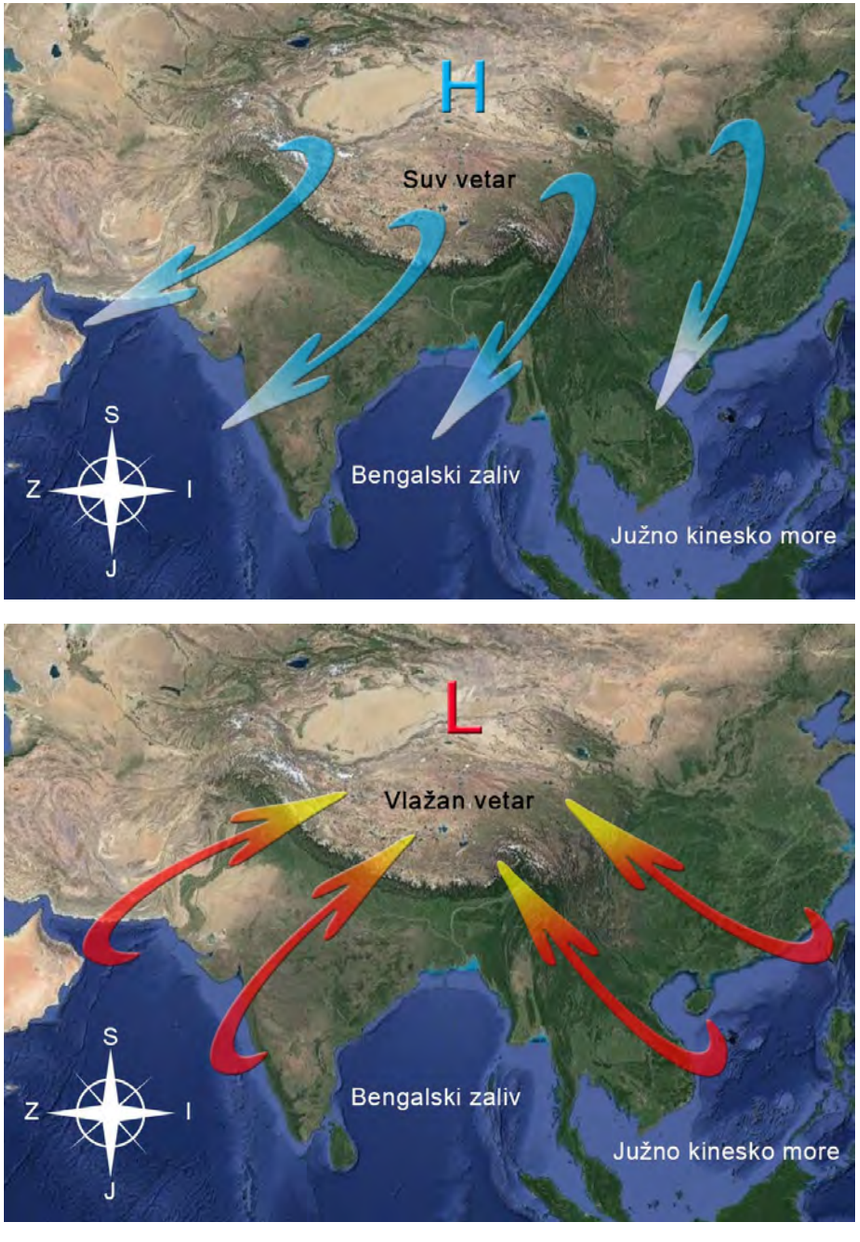


Slika 6.7.

Fen

6.2.4. Periodični vetrovi

Sezonski vetrovi su vetrovi koji menjaju pravac u zavisnosti od godišnjeg doba. Prema ovoj definiciji, vetar s kopna i vetar s mora ubrajaju se takođe u sezonske vetrove. Konkretnije rečeno, slobodna vodena površina je u toku dana hladnija od kopna samo leti. Zimi je vodena površina toplija, što znači da su raspodela pritiska i pravac vetra suprotni od onih koji se javljaju leti.



Slika 6.8.

Kretanje vetra povezano sa zimskim i letnjim monsunima

Najznačajniji sezonski vetar je *monsun*. Ovaj vetar je posledica razlika u atmosferskom pritisku između kontinenta i okeana tokom leta i zime, a „životni ciklus“ monsuna liči na vetar s mora i vetar s kopna velikih razmera. Obično se javlja u istočnoj i jugoistočnoj Aziji, ali cirkulacija slična monsunu često se može videti i u širim priobalnim područjima Australije, Afrike i Severne i Južne Amerike. Vreme pojavljivanja monsuna, njegov intenzitet i trajanje, kao i vremenskih prilika povezanih s njim – prvenstveno padavina – utiču na poljoprivredu i egzistenciju više od 900 miliona ljudi.

Područje visokog pritiska koje se tokom zime formira iznad kontinenta (slika 6.8) donosi lepo vreme istočnoj i južnoj Aziji. Takvo vreme karakteriše vedro nebo (ukoliko vazduh nije jako zagađen) i vetar – zimski monsun – koji duva sa kontinenta prema okeanu. Tokom leta područje visokog pritiska se premešta iznad hladnijeg okeana, što pokreće cirkulaciju vazduha od okeana prema kontinentu. Ova cirkulacija donosi vlagu na kontinent, što dovodi do kišnog vremena praćenog vetrom iz pravca okeana – letnjeg monsuna. Sezona letnjeg monsuna u istočnoj i južnoj Aziji obično traje od juna do septembra, ali sa samo 15 do 40 kišnih dana.

6.3. Uticaj vetra na biljke

Fiziološki i fizički procesi koji se odigravaju u biljkama i na graničnoj površini između biljke i vazduha predstavljaju sponu između nje i atmosfere. Tu vetar igra važnu ulogu, kako pozitivnu, tako i negativnu. Prisustvo vetra pospešuje turbulentni prenos između atmosfere i biljnog pokrivača i povećava mešanje površinskog sloja atmosfere. Poboljšana razmena vodene pare, ugljen-dioksida i drugih gasova između atmosfere i biljaka povećava do određene mere brzinu svih procesa koji uključuju ove gasove, prvenstveno evapotranspiraciju, disanje i fotosintezu. Direktni fiziološki uticaj vetra na biljke može se jasno videti kod ječma i pirinča, na primer, gde se proizvodnja etilena i koncentracija azota povećavaju s povećanjem brzine vetra. Pored toga, vetar može da utiče i na ravnotežu hormona kod nekih biljaka.

Snažni vetrovi i oluje uzrokuju eroziju zemljišta i značajna mehanička oštećenja biljaka – lomljenje grana i izdanaka, otkidanje cvetova i čupanje useva plitkog korena. Vetar uzrokuje advekciju toplog ili hladnog vazduha, koji je vlažniji ili suvlji od okoline, što može značajno uticati na energetski i vodni bilans zemljišta, biljaka i vazduha unutar i iznad biljnog sklopa. Vrući i suvi vetrovi mogu izazvati intenzivno isparavanje iz zemljišta i evapotranspiraciju kod biljaka, što dovodi do značajnog vodnog stresa za biljke. Ekstremni primer je *suhovej*, vetar koji je karakterističan za Kazahstan i kaspijski region. Njegova uobičajena brzina je od 5 do 20 m s^{-1}, temperatura je iznad 20 °C a karakteriše ga i niska relativna

vlažnost od 30% (ili manje), što uzrokuje trenutni stres kod biljaka. Naime, zbog naglog pojavljivanja i velike brzine vetra, stome biljaka obično ne uspeju da se zatvore, što ostavlja otvoren „komunikacioni kanal” između biljke i atmosfere, koji dozvoljava okolnom vazduhu da apsorbuje gotovo celokupnu vodu iz biljke.

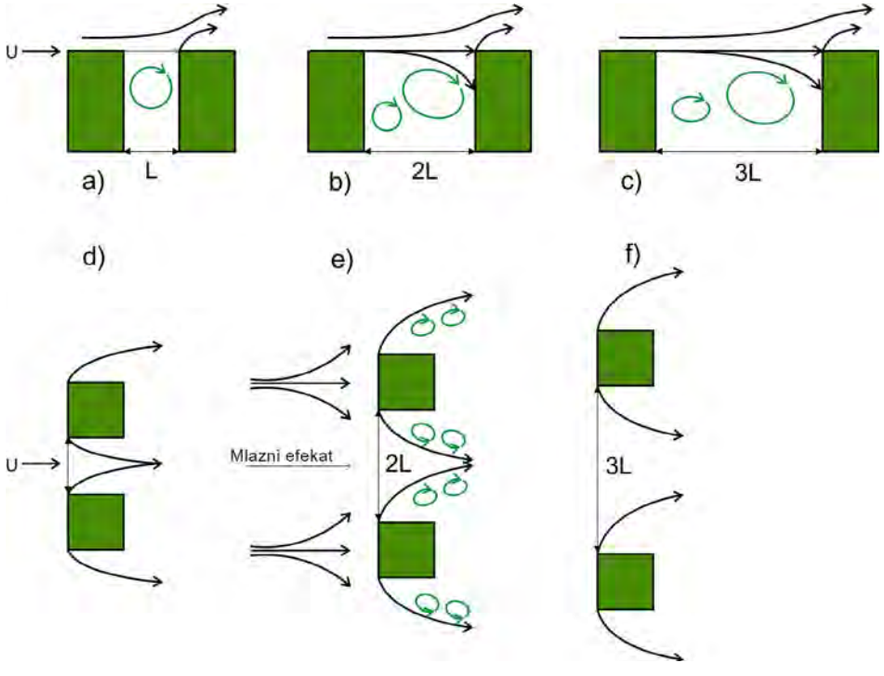
Laki do umereni vetrovi omogućavaju širenje polena i smanjuju vlagu u zemljištu, što u rano proleće može pomoći uklanjanju viška vode nastalog topljenjem snega i omogućiti pripremu polja za setvu. Ako ovi vetrovi donesu i dodatnu vlagu, oni mogu pojačati formiranje rose, što je važan element vodnog bilansa u nekim regionima.

Tokom zime i ranog proleća hladni vetrovi mogu izazvati oštećenja od mraza, naročito kada su uključeni sistemi za zaštitu od radijacionog mraza orošavanjem. U slučaju atmosferske inverzije, praćene temperaturama ispod 0 °C, topliji vetrovi je mogu narušiti i omogućiti mešanje hladnog vazduha neposredno iznad površine tla s toplijim vazduhom iznad njega.

6.4 Uticaj biljaka na vetar

Biljke se često nalaze na površini iznad koje duva vetra. Njihovo prisustvo utiče na vetar direktno, povećavajući trenje između vazduha i zemljišta, i indirektno, menjanjem energetskog bilansa površine Zemlje.

Tip, visina i gustina biljnog pokrivača određuju uticaj biljaka na kretanje vazduha. U slučaju kada je površina potpuno pokrivena vegetacijom, možemo očekivati da viša vegetacija s višim indeksom lisne površine stvara veće trenje. Tokom vegetacionog perioda rast biljaka i razvoj indeksa lisne površine smanjuju hrapavost Zemljine površine. Kada površina nije ravnomerno pokrivena vegetacijom, visina i rastojanje između biljaka mogu značajno uticati na kretanje vazduha (slika 6.10).



Slika 6.9.

Kretanje vazduha preko biljnih pokrivača različite strukture

Brzina vetra iznad horizontalne površine menja se s visinom. U slučaju golog zemljišta, obično se koristi logaritamski profil vetra kako bi se opisala promena brzine vetra s visinom:

(6.5)

gde je u(z) brzina vetra na visini z iznad zemlje, u_* je brzina trenja, z_0 je visina hrapavosti, a k je fon Karmanova (Von Kármán) konstantna, koja iznosi 0,41. Visina hrapavosti se odnosi na visinu iznad površine na kojoj molekularni transport dominira procesima razmene između zemlje i atmosfere (tabela 6.1).

Prisustvo vegetacije utiče na promenu brzine vetra s visinom, pa se za opisivanje ove promene obično koristi relacija oblika:

(6.6)

gde je d visina ravni nultog pomeranja. To je visina unutar biljnog sklopa na kojoj se turbulentni transfer smatra najintenzivnijim, odnosno na kojoj je najintenzivnija razmena energije, gasova i količine kretanja između biljnog sklopa i atmosfere. Visina hrapavosti i visina ravni nultog pomeranja su aerodinamičke karakteristike površine tla i vegetacije; one mogu da se menjaju u toku vegetacionog perioda zbog promena visine biljaka i indeksa lisne površine. Neke studije daju vrlo grubu procenu ovih parametara, i to 0,6–0,8 h za ravni nultog pomeranja i 0,1 d za dužinu hrapavosti. Međutim, novija istraživanja su pokazala da su to vrlo nesigurne pretpostavke.

Tabela 6.1.

Vrednosti visine hrapavosti za različite tipove površina

Površina	z_0(m)
More, pesak, sneg	0,0002
Beton, pustinja	0,0002 – 0,0005
Ravan snežni pokrivač	0,0001 – 0,0007
Neravan snežni pokrivač	0,001 – 0,012
Golo zemljište	0,001 – 0,004
Niska trava	0,008 – 0,03

7. Vodni bilans biljnog sklopa

Voda i sunčevo zračenje su od vitalnog značaja za rast i razvoj biljaka. Usvajanjem vode iz zemljišta, putem korenovog sistema, uspostavlja se vodni bilans u biljkama. Isparavanjem vode sa površine biljke i transpiracijom (evapotranspiracijom), biljka se hladi čime se obezbeđuje povoljan energetski bilans, odnosno optimalna temperatura biljke. Takođe, kontinuirana transpiracija omogućava biljci kontinuirano usvajanje nove količine vode. Na ovom mestu treba uočiti da smo se evapotranspiracijom bavili i prilikom analize energetskog bilansa biljnog sklopa. Dakle, energija utrošena na evapotranspiraciju (LE) i voda koju biljni sklop gubi u ovom procesu (E) daju jasnu vezu između energetskog i vodnog bilansa biljnog sklopa.

7.1. Komponente vodnog bilansa u sistemu biljka - zemljište

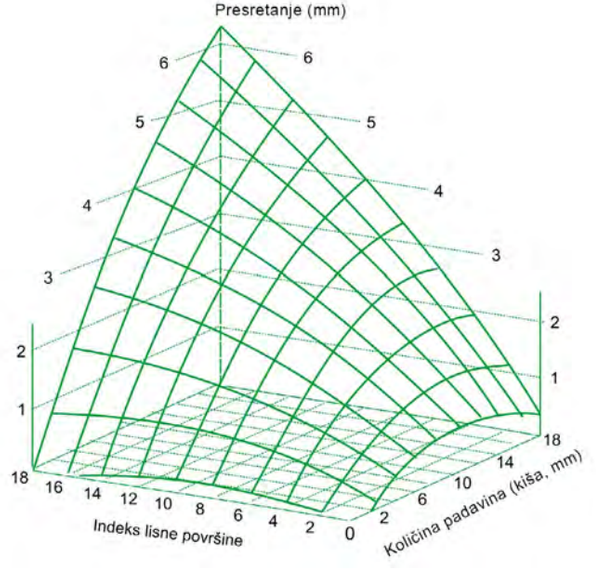
Vodni bilans (jedinične zapremine) golog zemljišta može da se napiše u obliku:

(7.1)

gde su P padavine i/ili bilo koji drugi oblik vode koja ulazi u sistem (navodnjavanje), R površinsko oticanje, D drenaža (horizontalno ili vertikalno oticanje vode iz posmatrane zapremine), K kapilarno uzdizanje vode i/ili horizintalni dotok, ΔQ_{sw} je promena vlažnosti zemljišta u posmatranom vremenskom periodu. Komponente vodnog bilansa izražene su kao fluks vode (zapremina vode koja prođe kroz jedinični poprečni presek izražena u l m^{-2}) ili kao suma flukseva vode u posmatranom vremenskom intevalu (mm dan^{-1}).

Padavine su prirodan način snabdevanja biljaka i zemljišta vodom (jedina alternativa je navodnjavanje). Međutim, u prisustvu biljnog pokrivača koji prekriva zemljište, padavine samo delimično stižu do tla (vidi poglavlje 5.5). Voda se na biljkama zadržava (intercepcija) i sa njih može ponovo da se vraća u atmosferu procesom isparavanja ili da se sliva u zemljište. Zadržavanje vode na biljkama i površinsko oticanje, ukazuje na deo vode koja stiže do biljnog sklopa ali se neće infiltrirati u zemljište. Ova količina vode u velikoj meri zavisi od stanja biljaka, strukture biljnog pokrivača i karakteristika samih padavina. Kada se radi o centralnoevropskom režimu padavina, potpuno razvijeni usevi prosečno zadržavaju 20% od ukupne količine padavina, a šume i do 80%. Zato gubitke zbog intercepcije ne bi trebalo zanemarivati prilikom obračuna vodnog bilansa zemljišta zasnovanog na izmerenim podacima o padavinama.

Količina zadržane vode se može proceniti na osnovu indeksa lisne površine i količine padavina (slika 7.1), ali ona takođe zavisi i od strukture biljnog pokrivača i neće biti ista kada se radi o šumskim sklopovima, homogenim biljnim sklopovima ili sklopovima organizovanim u redove. Relativna količina zadržane vode, tj. odnos zadržane vode i prispele količine padavina, je obično manji ukoliko je veća količina padavina. Međutim, apsolutna količina zadržane vode je manje-više konstantna za određeni biljni sklop. To znači da raspored padavina tokom kišnog perioda, koji je karakterističan za određene klimatske uslove, značajno utiče na ukupne gubitke zbog intercepcije.



Slika 7.1.

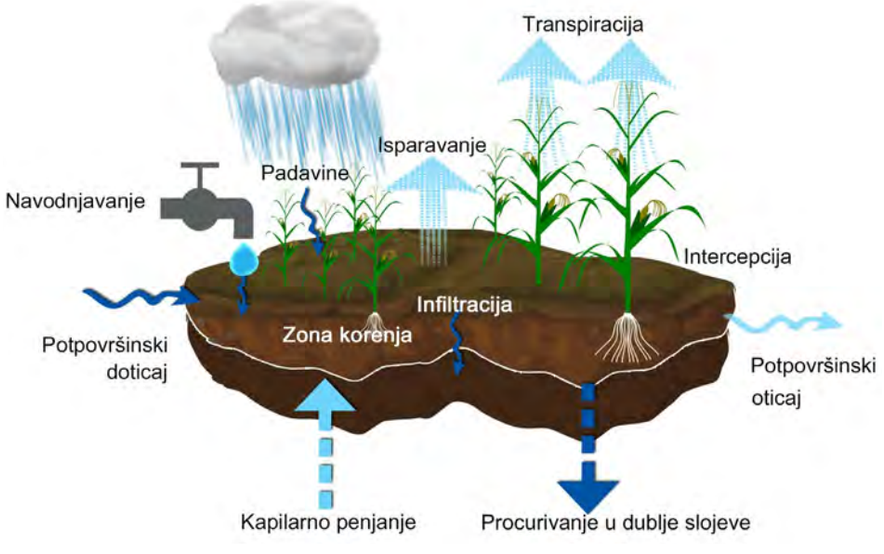
Količina zadržane voda (mm) u zavisnosti od količine padavina i indeksa lisne površine (adaptirano od Hoyningen-Huene, 1980)

Ako voda od padavina stigne na površinu zemljišta, *infiltracija* i *oticanje* zavise u velikoj meri of karakteristika zemljišta (fizičkih i hemijskih). Ključnu ulogu u određivanju iznosa infiltracije igraju raspored i veličine pora na površini zemljišta, struktura zemljišta, uključujući i aspekte kao što su biotske pore (posebno one od kišnih glista), sadržaj humusa i stabilnost pora tokom kiše. Osim toga, naprsline uzrokovane sušenjem glinovitih zemljišta mogu značajno izmeniti karakteristike infiltracije.

Vodni bilans biljnog sklopa može se povezati i sa zapreminom korena (zona korenovog sistema) useva, što uvodi dodatne komponente vodnog bilansa koje treba uzeti u obzir kao što su horizontalno i vertikalno oticanje, recimo (slika 7.2).

Iz posmatrane zapremine zemljišta (npr. zona korena) voda se može proceditи u dublje slojeve zemljišta (čak stići do nivoa podzemnih voda) ili se može dići uz pomoć kapilarnih sila u zonu korena iz dubljih i vlažnijih slojeva zemljišta ili iz podzemnih voda.

Ukupna zapremina pora određuje ukupnu količinu vode koju neko zemljište može preuzeti. Međutim, u prosečnim poljskim uslovima, zemljište je uglavnom delimično zasićeno vodom (tabela 7.1). Srednjemineralizovano zemljište (uobičajeno poljoprivredno zemljište) ima prosečan sastav kao što je prikazano u primeru u tabeli 7.1.



Slika 7.2.

Komponente vodnog bilansa sistema usev – zemljište [izvor: BOKU-Met]

Tabela 7.1.

Sastav srednjemineralizovanog zemljišta (u zapreminskim procentima)

Mineralne supstance	45 %
Zapremina vazduha	25 %
Zapremina vode	23 %
Organske supstance – od toga:	7 %
• Humus	• 85 %
• Korenje biljaka	• 15 %

Masa suvog zemljišta po jedinici zapremine može se značajno razlikovati u zavisnosti od sastava zemljišta (tabela 7.2).

Tabela 7.2.

Gustina zemljišta različitih sastava (u g cm^{-3})

Površinski sloj zemljišta (sa humusom)	0,9–1,3
Organska zemljišta	0,2–0,8
Mineralna zemljišta	1,4–1,5
Sabijena mineralna zemljišta	> 1,5

Gustina zemljišta se može izračunati na osnovu mase suvog zemljišta na 105°C u jedinici zapremine zemljišta tj. zapremini čvrste faze i pora zajedno, korišćenjem sledeće relacije:

(7.2)

gde je BD gustina zemljišta (g cm^{-3}), SM suva masa (g) i V zapremina zemljišta (cm^3) najčešće u obliku metalnih cilindara zapremine 100 cm^3.

Pore u zemljištu su značajne za brojne procese koji se odigravaju u zemljištu, a mogu biti ispunjene vodom ili vazduhom (tabela 7.1). Udeo ukupne zapremine pora u odnosu na ukupnu zapreminu zemljišta zavisi u velikoj meri od tipa zemljišta (tabela 7.3). Ako neko zemljište postane gušće (npr. zbog sabijanja), doći će do povećanja gustine i smanjenja ukupne zapremine pora (u kombinaciji sa promenom raspodele veličine pora u zemljištu). Odnos između gustine zemljišta i zapremine pora zavisi, međutim, od mineralnog sastava zemljišta i raspodele veličine pora.

Tabela 7.3.

Udeo čvrstih čestica u ukupnoj zapremini zemljišta (obrnuto u odnosu na ukupnu zapreminu pora)

Tip zemljišta	Udeo čvrstih čestica (%)
Mineralna zemljišta sa manje organskih materija (tipično za obradiva zemljišta)	50
Zemljišta sa većim sadržajem organske materije (tipično za zemljišta pod šumom, pašnjakom)	40–45
Zemljišta sa veoma velikim sadržajem organske materije (npr. močvare)	10–35
Sabijena mineralna zemljišta	60–65
Peskovita zemljišta	44–64
Praškasta zemljišta	45–70
Glinovita zemljišta	30–65

Ukupna zapremina pora u nekom zemljištu određuje koliko vode to zemljište može sadržati. Međutim, to u velikoj meri zavisi od distribucije veličine pora, koja određuje kapilarne sile, odnosno snagu kojom zemljište može držati vodu, odnosno vodni potencijal. Sve navedene karakteristike, a naročito raspodela pora po veličini, utiče direktno na skladištenje i kretanje vode u zemljištu (smer, brzina i količina u jedinici vremena), na usvajanje vode iz zemljišta od strane korena, na oticanje vode u dublje slojeve zemljišta i na infiltraciju vode u zemljište. Raspodelu veličine pora u zemljištu nije lako proceniti, npr. ceđenjem vode iz uzorka vlažnog zemljišta pri različitim nivoima vazdušnog pritiska, dobija se vrednost zapremine pora u spektru određenih veličina.

Prema vodnom potencijalu, voda u zemljištu može se podeliti na sledeći način:

- podzemna voda: voda koja se nalazi u dubljim slojevima zemljišta, gdje su sve pore popunjene vodom;
- drenažna voda: voda koja teče odozgo na dole pod uticajem gravitacije;
- pristupačna voda: deo vode koji zemljište zadržava usprkos gravitaciji i koji je dostupan biljkama;
- nepristupačnanedostupna voda: voda koja je snažno vezana za zemljište i može se odvojiti od njega isključivo isparavanjem (tj. zagrevanjem uzorka zemljišta u peći).

7.2. Faktori koji određuju kretanja vode u zemljištu

U slučaju padavina, deo vode koji ne otekne ili ne ispari će se infiltrirati u zemljište. Brzina kojom se ovaj proces odvija je stopa infiltracije sa površine zemljišta, koja je određena pre svega protokom vode u samom zemljištu. U slučaju jednostavnog (jednodimenzionalnog) modela zemljišta, infiltracija se može izračunati prema Darsijevom zakonu:

(7.3)

ili

(7.4)

gde je Q_w fluks (protok) vode ($cm^3\ cm^{-2}\ s^{-1}$), k_w je empirijska konstanta fluksa, V_w je brzina protoka ($cm\ s^{-1}$), dF je razlika u pritiscima (MPa), h_w je hidraulični pritisak, dl je debljina posmatranog sloja zemljišta (cm).

Veliki raspon vrednosti koje opisuju protok i koeficijent infiltracije zemljišta, prema Darsijevom zakonu, mogu uticati na celokupni vodni bilans zemljišta (tabela 7.4).

Tabela 7.4.

Opseg karakteristika protoka vode u zemljištima

Konstanta protoka k	Provodljivost vode u zemljištu ($cm\ dan^{-1}$)	Vreme potrebno za protok od 10 mm (=100 $m^3\ ha^{-1}$)	Klasa provodljivosti vode
10^{-1}	8640	10 s	
10^{-2}	864	1 Min. 40 s.	Visoka – brz protok
10^{-3}	86	16 Min. 40 s	
10^{-4}	8,6	2 h 46 Min.	Srednja
10^{-5}	0,86	2 days 3h 40 Min	
10^{-6}	0,086	~11 days	
10^{-7}	0,0086	~115 days	Niska – spor protok
10^{-8}	0,00086	~3 years	

7.2.1. Kapacitet zemljišta za zadržavanje vode dostupne usevima

U slučaju jakih padavina ili posle otapanja snega, potrebno je određeno vreme da se višak vode infiltrira u zemljište. Zemljište može primiti i zadržati onoliko vode koliko je sposobno da je zadrži nasuprot dejstva sile gravitacije. Ovaj nivo sadržaja vode pri određenom vodnom potencijalu zemljišta (pF 1.8–2) naziva se poljski vodni kapacitet (PVK) (tabela 7.5).

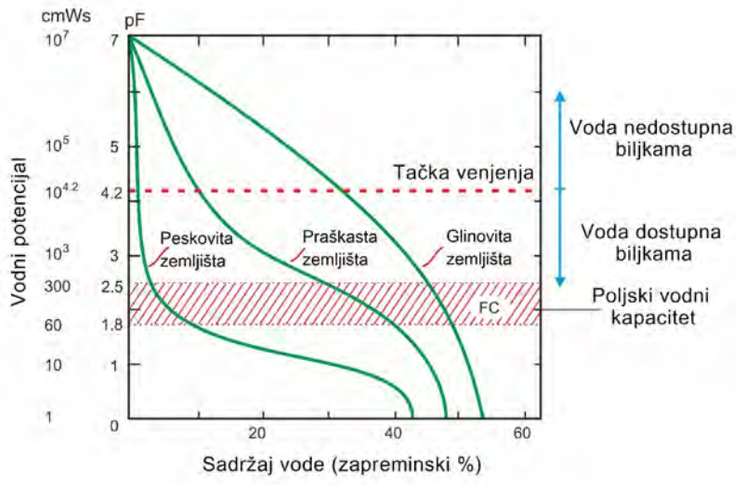
Sa druge strane, biljka može da usvaja vodu iz zemljišta samo dok postoji razlika u vodnom potencijalu između vode koju su usvojile ćelije korena i okolne vode u zemljišnim porama. Ako to nije slučaj, i kada je sadržaj vlage u zemljištu već znatno smanjen (povećani broj pora ispunjenih vazduhom), voda se više ne može premeštati ka korenu i ne može se izvući iz zemljišta, a to se zove vlažnost venuća (VV) (tabela 7.5). Koren takođe može gubiti vodu i to ako se vodni potencijal zemljišta poveća. Jedan od načina kojim se biljke štite od ovakvog gubitka vode je i smanjenje prečnika korena, čime se usporava trasport vode kroz koren.

Tabela 7.5.

Karakteristike napona vode (vodni potencijal) u zemljištu

Vodni potencijal zemljišta (u cm vodenog stuba)	pF vrednost	Vrednost u barima	Klasa
	Pri određenom sadržaju vode koji zavisi od tipa zemljišta		
15 000–10 000	4,2–4,0	15–10	Vlažnost venuća
100	2,0	0,1	Kapilarna voda
	1,8–2,0		Poljski vodni kapacitet
10	1,0	10^{-2}	Drenažna voda
1	0,0	10^{-3}	Procеđena voda

Biljka može usvajati vodu iz zemljišta od tačke poljskog vodnog kapaciteta do tačke venjenja. Količina vode između ovih granica naziva se *voda dostupna biljkama* (slika 7.3). Međutim, jasno je da se sadržaj vlage u zemljištu, poljski vodni kapacitet i tačka venjenja značajno razlikuju od jednog tipa zemljišta do drugog, što umnogome zavisi od *rasporeda veličina pora.*



Slika 7.3.

Zavisnost vodnog potencijala od sadržaja vlage u različitim tipovima zemljišta; FC poljski vodni kapacitet; cmWS centimetri vodenog stuba ; pF logaritamska vrednost cmWS (adaptirano od Scheffer und Schachtschabel,1982)

To znači da postoji određeni odnos, koji je specifičan za svaki tip zemljišta, između vodnog potencijala i sadržaja vlage u zemljištu, koji se izražava pF krivom (slika 7.3).

Sadržaj vode u zemljištu može se prikazati kao udeo mase vode u jediničnoj masi zemljišta (npr. kg kg^{-1}) ili kao udeo zapremine vode u jediničnoj zapremini zemljišta (npr. m^3 m^{-3}). Evo nekoliko metoda za određivanje sadržaja vlage u zemljištu.

Gravimetrijski metod zasniva se na merenju mase uzorka zemljišta pre i posle sušenja u peći na 105 °C i izračunavanju (masenog) sadržaja vlage u zemljištu, SWC_G korišćenjem relacije:

(7.5)

gde je m_{vl} masa vlažnog uzorka (kg), m_{su} masa uzorka posle sušenja u sušnici (kg).

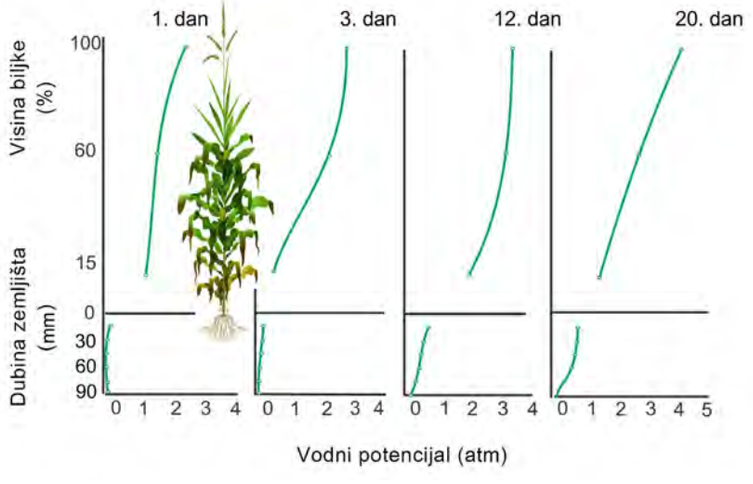
Volumetrijski metod se zasniva na merenju zapremine vode u uzorku zemljišta različitim metodama, kao što je, recimo, „Time Domain" reflektrometrija. Kada je poznata gustina zemljišta (BD) zapreminski sadržaj vlage u zemljištu (SWC_V)

može da se izračuna na osnovu masenog sadržaja vlage (SWC_G) korišćenjem relacije oblika:

(7.6)

gde je D_w gustina vode (D_w = 1000 kg m^{-3}).

Vodni potencijal ima različite vrednosti u zemljištu, usevu i atmosferi kao i unutar same biljke. Razlika potencijala između korena i listova (slika 7.4) takođe je glavna „sila" koja pokreće protok sokova kroz ksilem biljnih organa nasuprot sili teže, omogućavajući da voda prenese organske i mineralne materije delovima biljke koji rastu i razvijaju se.



Slika 7.4.

Razvoj vertikalnog gradijenta zemljišnog i biljnog vodnog potencijala u biljkama kukuruza tokom maksimalnog isparavanja prilikom razvoja suše posle navodnjavanja (adaptirano od Shinn and Lemon, 1962)

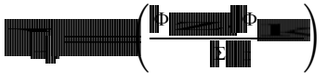
7.3. Usvajanje vode iz zemljišta preko korenovog sistema

Prilikom transporta vode iz zemljišta u atmosferu, biljka stvara „prečicu" i transportuje vodu iz zemljišta u atmosferu efikasnije nego sa golog zemljišta. U tom smislu prisustvo biljaka značajno smanjuje otpor transportu vode od zemljišta do atmosfere. To takođe dovodi do bržeg preuzimanja vode iz zemljišta, što ima praktičnu važnost u gajenju useva u sušnim područjima. Na primer, ro-

tacije useva u sušnim područjima bez mogućnosti navodnjavanja često uključuju godine bez useva (golo zemljište) kako bi se obnovile vodne rezerve zemljišta.

Usvajanje vode (i hranjivih materija) od strane korena biljke uglavnom se obavlja na nivou ćelija korenskih dlačica, koje se nalaze na vršnom delu rastućih korenova.

Generalno, potencijalno usvajanje vode od strane korena može se izračunati Gardnerovom formulom, uzimajući da su potencijalna razlika i otpor vodenog toka između korena i zemljišta kako sledi:



(7.7)

gde je W_A potencijalna količina vode koju usvaja koren, EA aktivna površina korena (u cm^2 cm^{-3}), F je hidraulički potencijal korena / zemljišta, $\sum r$ zbir otpora transportu vode u zemljištu i između zemljišta i korena.

Međutim, treba uzeti u obzir da je usvajanje vode i hranjivih materija iz zemljišta veoma dinamičan i složen proces na koji dodatno utiču faktori kao što su temperatura zemljišta, arhitektura korena, dubina korena i gustina korena u zemljištu, bolesti korena, itd.

Apsolutna količina vode dostupna biljkama može se proceniti tako što se kombinuje kapacitet zemljišta da zadrži vodu dostupnu biljkama sa dubinom ukorenjavanja karakterističnom za posmatrani tip zemljišta (tabela 7.6). Na primer, koren teško prodire kroz pesak kome nedostaju stabilne pore, što nije slučaj sa bolje strukturisanim zemljištima koja poseduju stabilne pore (koje su često rezultat biotičkih aktivnosti, kao što je aktivnost kišnih glista).

Tabela 7.6.

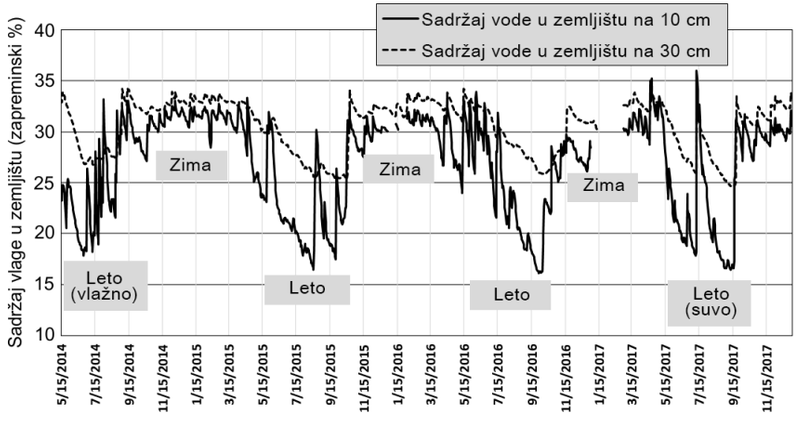
Efektivna dubina korena i pristupačne vode kao funkcija tipa zemljišta (srednje zapreminske gustine)

Tip zemljišta	Srednja efektivna dubina korena kod strnih žita (dm)	Voda u zemljištu dostupna biljkama (mm)
Krupan pesak	5	30
Pesak srednje veličine	6	55
Sitan pesak	7	80
Ilovasti pesak	7	115
Praškasti pesak	8	140
Ilovasti prah	11	220
Peskovita ilovača	9	155
Praškasta ilovača	10	190
Glinovita ilovača	10	165
Ilovasta glina	10	140

U uslovima umereno-kontinentalne klime, kada se usev nalazi u fazi rasta, njegove potrebe za vodom su u opsegu od 200 do 600 kg vode po 1 kg suve biomase. Prema tome, za optimalne prinose useva potrebno je da u periodu rasta useva količina padavina (više ili manje redovno raspoređena) bude oko 300−500 mm.

Pošto biljke svojim korenovim sistemom efikasno usvajaju vodu zadržanu u zemljištu, sadržaj vlage u glavnoj zoni korena generalno će se smanjivati tokom vegetacionog perioda preko leta (slika 7.5), često se približavajući tački venjenja tokom sušnih leta (što zavisi od toga koliko je zemljišna vlaga dostupna biljkama).

Kako se sadržaj vlage u zemljištu pod gajenom kulturom približava tački venjenja, smanjivanje vlažnosti se vremenom usporava (npr., leto 2017. na slici 7.5), jer korenu treba više vremena za usvajanje vode zbog povećanja otpora kretanju vode kroz zemljište. Ako se to desi, biljke su već pod vodnim stresom, pokazujući tipične reakcije kao što je zatvaranje stoma tokom dana ili sušenje listova.

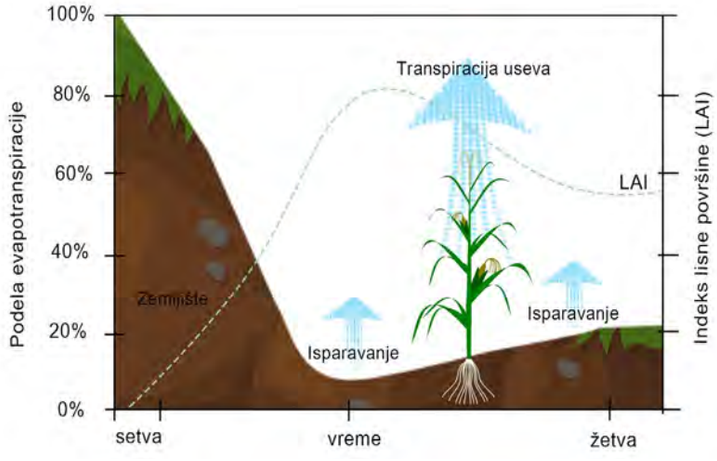


Slika 7.5.

Izmereni sadržaji vlage na dve dubine zemljišta u periodu od 4 godine (2014−2017) na jednoj centralnoevropskoj lokaciji (Maršfeld, Istočna Austrija) pod stalnom vegetacijom. Povećanja sadržaja vlage u zemljištu su uzrokovana padavinama

7.4. Isparavanje zemljišta i transpiracija (evapotranspiracija)

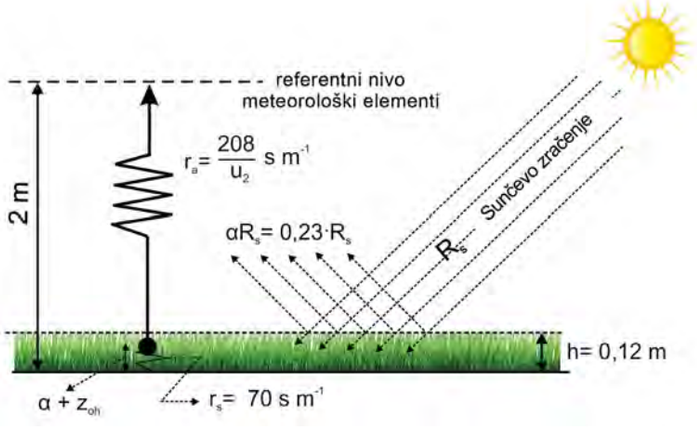
Kada se razmatra dinamično promenljivi vegetacioni pokrivač (koji raste i razvija se) u okviru izračunavanja vodnog bilansa nekog useva, pre svega je potrebno proceniti U okviru Agencije Ujedinjenih nacija za hranu i poljoprivredu (The Food and Agriculture Organization, FAO) razvijena je metodologija za simulaciju vodnog udela isparavanja zemljišta u odnosu na udeo transpiracije u ukupnoj evapotranspiraciji (Allen et al., 1998), pogodna za praktičnu upotrebu naročito kod planiranja navodnjavanja useva (slika 7.7). Metodologija se zasniva na pojednostavljenom izračunavanju stvarne evapotranspiracije useva, korišćenjem metode koju su prvobitno definisali Penman (Penman) i Montit (Monteith) (videti „Numeričke primere“). Ovaj pristup se koristi i u modelu biljne proizvodnje AQUACROP koji je dostupan na internet stranici FAO i koji je testiran za mnoge useve i regione širom sveta (http://www.fao.org/aquacrop).



Slika 7.6.

Podela evapotranspiracije na isparavanje zemljišta i transpiraciju za vegetacioni period neke jednogodišnje poljoprivrede kulture (Allen et al., 1998)

Primena metodologije započinje parametrizacijom referentne evapotranspiracije sa travnate površine (jedn. 7.8) tokom jednog dana (slika 7.7). Metod zahteva upotrebu izmerenih meteoroloških elemenata koji se mogu preuzeti sa lokalnih meteoroloških stanica.



Slika 7.7.

FAO Penman-Montitovog metod za izračunavanje referentne evapotranspiracije sa travnate površine (Allen et al., 1998)

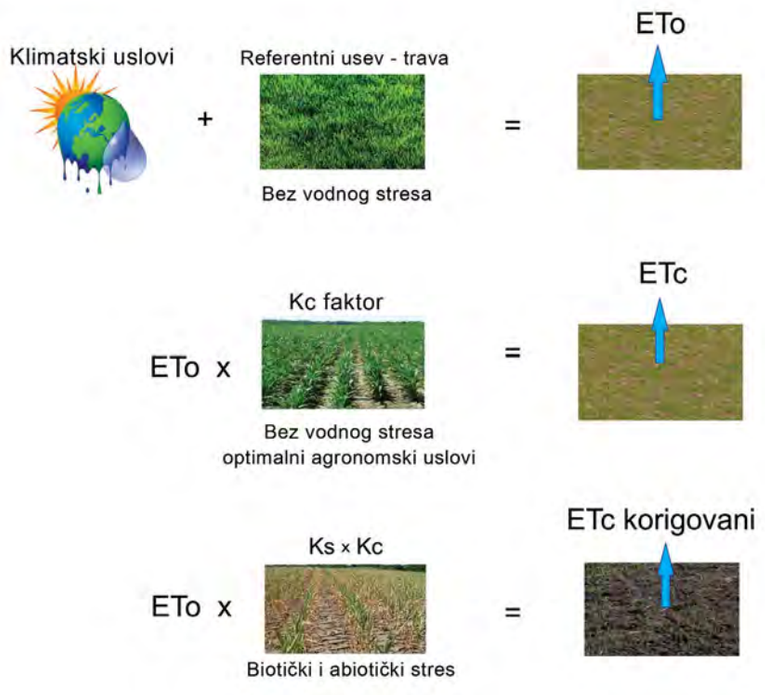
Grupa eksperata je preporučila da se kombinovani metod Penmana i Montita usvoji kao novi standard za izračunavanje referentne evapotranspiracije i dao sugestije o procedurama za izračunavanje različitih parametara. Penman i Montit definišu referentnu kulturu kao hipotetički usev sa pretpostavljenom visinom od 0,12 m, koji ima stomaterni otpor od 70 s m^{-1} i albedo od 0,23. Isparavanje sa površine ovakvog useva je vrlo slično isparavanju sa veće površine pod zelenom travom koja je ujednačene visine i koja aktivno raste i adekvatno se zaliva. Ovaj metod prevazilazi nedostatke prethodnog FAO metoda Penmana i daje vrednosti koje su u skladu sa stvarnim podacima o utrošku vode iz raznih delova sveta.

Na osnovu originalne Penman-Montitove jednačine i jednačina aerodinamičnog i površinskog otpora, FAO Penman-Montitov metod za procenu referentne evapotranspiracije (ET_o) se izražava u obliku

(7.8)

gde je ET_o izraženo u mm dan^{-1}, R_{net} je neto zračenje na površini useva (MJ m^{-2} dan^{-1}), Q_G je gustina fluksa toplote u zemljište (MJ m^{-2} dan^{-1}), T je srednja dnevna temperatura vazduha na visini od 2 m (°C), u_2 je brzina vetra na visini od 2 m (m s^{-1}), E je pritisak zasićene vodene pare (kPa), e je stvarni pritisak vodene pare (kPa), (E-e) je deficit pritiska zasićene pare (kPa), je nagib krive pritiska vodene pare (kPa °C^{-1}), g je psihrometrijska konstanta (kPa °C^{-1}). Primer računa potencijalne evapotranspiracije dat je u glavi „Numerički primeri".

U sledećem koraku (slika7.8), primenjuje se faktor K_c koji je specifičan za svaki usev, i menja se u toku vegetacionog perioda (vidi glavu 4). Ovaj faktor se koristi da se referentne vrednosti evapotranspiracije izračunate za travnatu površinu povežu sa vrednostima potencijalne evapotranspiracije ispitivanih useva. Važno je imati u vidu da su i referentna i potencijalna evapotranspiracija izračunate za uslove bez vodnog stresa, odnosno pod pretpostavkom da se proces odvija sa biljnog sklopa koji je optimalno snabdeven vodom. Zato se, u poslednjem koraku opisane metodologije, uvodi vodni stres kao faktor smanjenja evapotranspiracije. Koristeći stvarne vrednosti sadržaja vlage u zemljištu (od prethodnog dana u odnosu na dan za koji se obračun obavlja) potencijlana evapotranspiracija, izračunata u prethodnom koraku se množi sa faktorom stresa, K_s kako bi dobili vrednosti stvarne evapotranspiracije. Stvarna potrošnja vode izračunata na osnovu ovako dobijene stvarne evapotranspiracije se zatim koristi za određivanje sadržaja vlage u zemljištu u posmatranom danu.



Slika 7.8.

Referentna evapotranspiracija (ET_o), potencijalna evapotranspiracija useva (ET_c) i stvarna evapotranspiracija ($ET_{c\ korigovana}$) koje se koriste za izračunavanja vodnog bilansa (Allen et al., 1998)

7.5. Osnovni pristupi proračunu vodnog bilansa zemljišta

Postoje razni pristupi izračunavanju sadržaja vlage u različitim slojevima zemljišta koji zavise od specifične primene, kao i od raspoloživih podataka o zemljištu.

Procedura koja zahteva najmanje ulaznih podataka je pojednostavljeni, jednodimenzionalni pristup za izračunavanje bilansa vode u pojedinačnim slojevima zemljišta, koji se naziva i kaskadni model. Kaskadni pristup pretpostavlja da voda stiže u posmatrani sloj samo vertikalno, od površinskog sloja zemljišta ka dubljim slojevima. Kod ovog pristupa, definisani slojevi zemljišta se pune vodom do svog poljskog vodnog kapaciteta, a kada je neki sloj već „pun", onda voda prelazi u sledeći dublji sloj i popunjava ga do njegovog poljskog vodnog kapaciteta. Za primenu kaskadnog modela potrebno je poznavati samo sposobnost zemljišta da zadržava vodu do poljskog vodnog kapaciteta, da bi izračunali vertikalno kretanje vode u zemljištu i sa tim povezane promene sadržaja vlage u slojevima zemljišta posle kiše. Ako se ovaj pristup primeni za vremenski korak od jednog dana, on daje relativno dobre rezultate u homogenim zemljištima sa srednjim vrednostima vodopropustljivosti (tabela 7.5).

U sledećem, složenijem pristupu, koristi se vodopropustnost (prema Darsijevoj metodi) od jednog sloja do drugog. Međutim, što su slojevi zemljišta slabije definisani, to se traži više podataka za tačniji proračun, a ti podaci obično nisu dostupni za agrometeorološke potrebe. Međutim, ovaj pristup se često koristi u agrometeorološkim modelima i modelima za procenu visine prinosa ili količina vode potrebnih za navodnjavanje. Sa druge strane, u tim pristupima ponekad se uvodi vertikalni kapilarni dotok vode kada je plitak nivo podzemne vode.

Najsloženiji i fizički ispravni pristupi uzimaju u razmatranje trodimenzionalni protok vode kroz zemljište, odnosno, razlike potencijala zemljišne vlage koja uključuje dotoke i gubitke vlage u posmatranoj zapremini zemljišta i Van Genuhtenov metod koji uključuje proračun retencione krive zemljišne vlage u slučaju vlaženja i sušenja zemljišta. Samo takvi složeni pristupi koji uzimaju u obzir fizičku heterogenost zemljišta, pod uslovom da su relevantni podaci o zemljištu poznati ili procenjeni mogu sa velikom tačnošću da odrede količinu vlage u zemljištu.

PRIMENA

8. Fenologija

Zapisi o promenama u životu biljaka stari su, verovatno, koliko i pismo. Najstarija fenološka osmatranja sačuvana su u Kini i datiraju od pre 2000 godina. U Japanu se više vekova, tradicionalno, beleži vreme cvetanja trešnje. Fenološki zapisi su hronike života biljaka, ali i meteorološkog vremena. Zato predstavljaju nezamenjive izvore informacija o vremenu i klimi u prošlosti u kojoj nije bilo meteoroloških instrumenata ili organizovanih merenja, ali su ljudi beležili pojave u prirodi. Zahvaljujući ovim beleškama rekonstrukcije klime su potpunije, a istraživači imaju dodatna saznanja o „zajedničkom životu" biljaka i atmosfere koja ih okružuje.

8.1. O fenologiji i njenom značaju

Izraz „fenologija" je izvedena iz grčke reči *phainesthai* (pojaviti se). Ova oblast opisuje pojave koje se dešavaju tokom životnog ciklusa biljaka i životinja pod uticajem periodičnih promena u njihovoj okolini, posebno dužine dana, intenziteta sunčevog zračenja, temperature i padavina, koje mogu delovati u različitim kombinacijama. Temperatura je najvažniji faktor fenologije biljaka koje rastu u uslovima umerenog klimata, gde povišene temperature dovode do bržeg razvoja useva. Već je 1735. Reamur (Reaumur) pisao o visokoj korelaciji između razvoja biljaka i temperature vazduha (verovatno pod uticajem visoke korelacije između temperature i sunčevog zračenja). On je bio prvi koji je predložio metodu sume temperatura za izračunavanje fenološkog razvoja. Otada je njegovo zapažanje postalo osnova za sve kasnije fenološke modele.

Sezonske promene vremenskih uslova su primarni mehanizmi koji pokreću fenologiju biljaka i životinja (naročito insekata). Godišnja doba su manje ili više ponovljene godišnje varijacije klime, prvenstveno uzrokovane godišnjim varija-

cijama sunčeve energije koju apsorbuje površina. Drugi faktori, kao što su udaljenost od okeana, uticaj regionalnih sistema vetrova i okeanskih struja i opšta topografija takođe utiču na sezonsku klimu na regionalnom nivou.

Fenološki događaji i njihove međusezonske varijacije imaju značajan uticaj na kopnene ekosisteme i ljudska društva posredstvom menjanja globalnih ciklusa ugljenika, vode i azota, poljoprivredne proizvodnje, trajanja sezone oprašivanja ili pojave bolesti i štetočina. Fenologija useva je zato osnova za razumevanje varijacija procesa koji se dešavaju u agroekosistemima tokom jedne godine ili višegodišnjeg perioda. Shodno tome, mnogi modeli koji se primenjuju u poljoprivredi, kao što su modeli za: procenu rizika, predviđanje pojave štetočina i bolesti, prognozu prinosa ili modeli rasta i razvoja useva, moraju sadržati fenološke modele kao ključni element (vidi glavu 11).

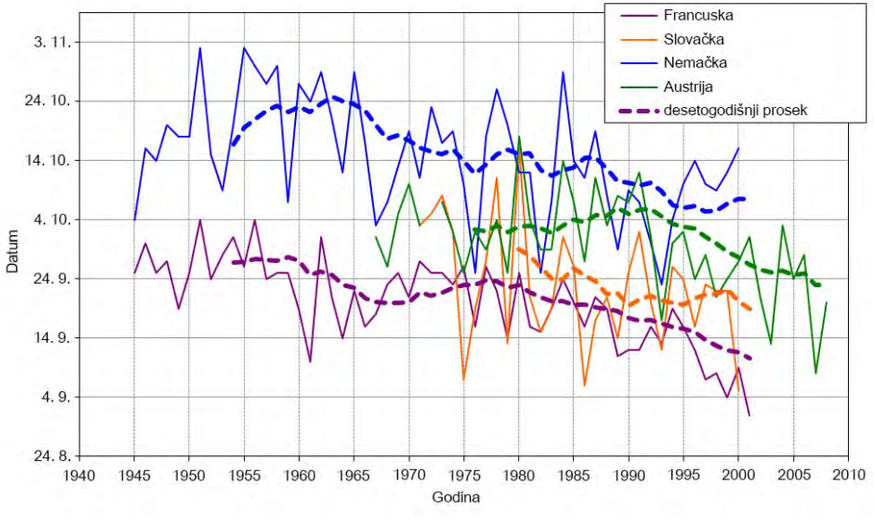
Sve vrste su reagovale na klimatske uslove okruženja tokom svoje evolucione istorije. Stoga se fenologija biljaka koristila u prošlosti kao klimatski indikator u metodama klimatskog mapiranja (npr., zbog poklapanja klimatske klase sa tipičnom vrstom vegetacije u nekom regionu). Ipak, klimatske promene iz prošlosti najčešće se opisuju kao relativno spori i postepeni procesi, što je omogućilo nesmetano evoluciono prilagođavanje ili smenu. Sada, međutim, postoji zabrinutost kako će različite vrste i ekosistemi reagovati na prisutne i intenzivne *klimatske promene*. Mnoge biljne vrste iz određenog ekosistema prilagodile su se ekološkim nišama datog okruženja zahvaljujući dugotrajnoj izloženosti određenim klimatskim uslovima. Otud upravo te biljne vrste mogu biti prilično osetljive čak i na umerene promene klime. Rastuće temperature u kombinaciji s promenljivom prostornom distribucijom padavina utiču ne samo na biljke koje prirodno rastu u datom okruženju (i na samo okruženje), već i na useve u kultivisanim ekosistemima, direktno ili indirektno.

Porast temperature i dalje promene klime već su uticale na ekosisteme na svim kontinentima. Uočene promene uključuju produžavanje vegetacionog perioda i promene uslova za prezimljavanje u umerenim klimatima. U kombinaciji sa promenama u nastupanju optimalnih uslova za rast i razvoj biljaka, regionalne promene klime i odgovarajućih ekoloških zona značajno utiču na proizvodne uslove u poljoprivredi, naročito u odnosu na geografsku širinu i nadmorsku visinu regiona.

Fenološka osmatranja različitih biljnih vrsta potvrđuju da je dinamika vegetacije primetno ubrzana zbog promena klime, tj. porasta srednjih mesečnih temperatura vazduha. Tome u prilog mogu da posluže trendovi dospevanja grožđa za berbu u različitim vinogradarskim područjima Evrope (slika 8.1). Iz osmotrenih podataka o vremenu dospevanja grožđa jasno se vidi da se tokom poslednjih šezdeset godina ovaj događaj, i pored varijacija, odigravao sve ranije.

Osmotrene promene klime izazvale su i porast interesovanja za fenološke procese kao indikatore efekata klimatskih promena.

Vreme odigravanja fenoloških događaja je od značaja za planiranje tehnologije gajenja, kao što su vreme đubrenja, vreme berbe, vreme primene mera zaštite, itd. S druge strane, na fenološki razvoj useva na određenoj lokaciji mogu uticati različite mere, npr. datum setve, žetve, navodnjavanja, obrade zemljišta, đubrenja, oplemenjivanje i selekcija itd. Fenološki podaci, isto tako, igraju ključnu ulogu pri kalibraciji i validaciji mnogih ekoloških modela i modela za simulaciju rasta i razvoja useva (engl. crop modela).



Slika 8.1.

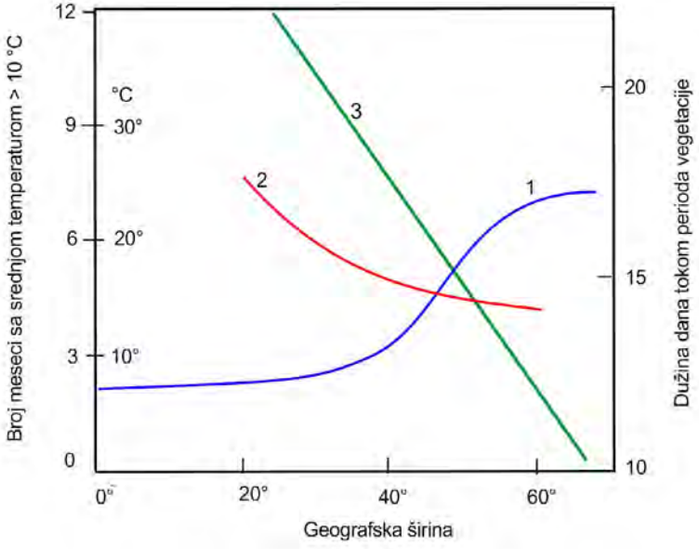
Trendovi dospevanja grožđa za berbu u različitim vinogradarskim područjima Evrope (Francuska, Nemačka, Austrija, Slovačka) potvrdjuju da je došlo do porasta temperature u toku proteklih decenija (zasnovano na Eitzinger et al., 2009)

8.2. Vegetacioni period i fenološke faze

Na različim geografskim širinama *dužina vegetacionog perioda* je tesno povezana sa temperaturom i trajanjem sunčevog sjaja. Ako srednju mesečnu temperaturu višu od 10 °C posmatramo kao indikator trajanja vegetacionog perioda, može se uočiti da se trajanje vegetacionog perioda od 12 meseci na ekvatoru, skraćuje prema polovima na samo nekoliko meseci. Za to vreme se srednja temperatura vazduha snižava od ekvatora ka većim geografskim širinama, dok se

dužina dana tokom vegetacionog perioda, posebno između 40° i 60° geografske širine - povećava[17] (slika 8.2).

Autohtone biljke su obično dobro prilagođene lokalnim klimatskim uslovima kao posledica evolucionih procesa, a njihovi sezonski zahtevi se dobro uklapaju u sezonske promene lokalne klime (npr., sezonske vrednosti sunčevog zračenja i temperature). Ako se biljke premeste u drugačiju klimu i na geografsku širinu sa drugačijim sezonskim karakteristikama, taj sklad između biljaka i okoline može se izgubiti, što znači da se lokalni uslovi više ne mogu koristiti na optimalan način. Zbog toga će biljka izgubiti svoju produktivnost i postati manje konkurentna u odnosu na prilagođene lokalne biljne vrste.



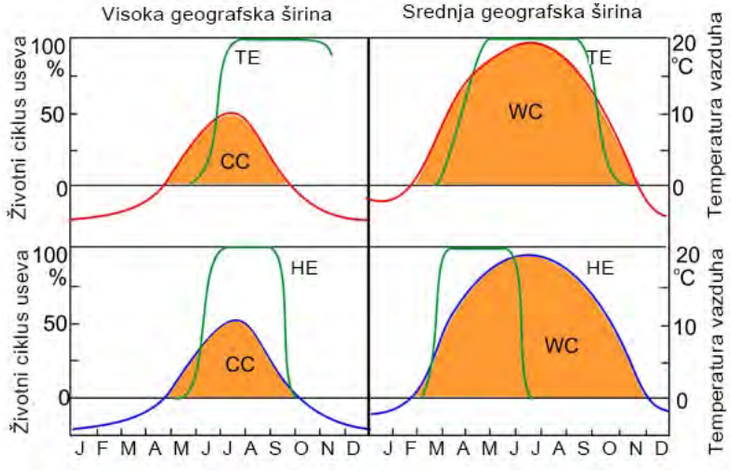
Slika 8.2.

1) Dužina dana tokom vegetacionog perioda (sati), 2) srednja mesečna temperatura i 3) dužina vegetacionog perioda (period u kome je srednja mesečna temperatura veća od 10 °C) u odnosu na geografsku širinu.

Na primer, ako se biljka prilagođena toplim krajevima na umerenim geografskim širinama premesti na hladniju lokaciju na većoj geografskoj širini, usled ograničenja u pogledu temperature i trajanja sunčevog sjaja ona bi mogla kasnije započeti svoj razvoj i ne dovršiti ga na vreme zbog suviše kratkog vegetacionog perioda (slika 8.3, gore levo). Nasuprot tome, biljke koje su prilagođene na niske

[17] Skrećemo pažnju čitaocu da se vegetacioni period poklapa sa „svetlim" delom godine na većim geografskim širinama.

temperature, prerano počinju svoj razvoj u toplijim uslovima na manjim geografskim širinama, brže se razvijaju i završavaju svoj period rasta prerano (slika 8.3, dole desno), gubeći time produktivnost (zbog kraćeg vremena dostupnog za akumulaciju biomase). Ovaj efekat je dobro poznat kod nekih žitarica kao što je ozima pšenica, koja ima najveću produktivnost u severnim evropskim klimatima, a smanjuje produktivnost na manjim geografskim širinama zbog srednjih temperatura oje su iznad optimalnih. Primeri biljaka koje se razvijaju u skladu sa uslovima sredine su topli ekotip (TE) gajen u toplijoj klimi (WC) na umerenim geografskim širinama (slika 8.3 gore desno) i hladni ekotip (HE) (prilagođen na hladnu klimu-CC) gajen na većoj geografskoj širini (slika 8.3 dole levo).



Slika 8.3.

Potrebe za toplotom različitih ekotipova useva tokom vegetacionog perioda u poređenju sa sezonskim temperaturama na većim i umerenim geografskim širinama. Zelena linija: fiziološka aktivnost useva u procentima realizacije životnog ciklusa

Sa druge strane, biljke (pa čak i sorte) čiji je fenološki razvoj dodatno određen dužinom dana (fotoperiodična reakcija biljaka kratkog i dugog dana), možda neće moći da dostignu svoju generativnu fazu pri promenjenim uslovima dužine dana, tj. u uslovima umerenog klimata (vidi glavu 1). Primeri takvih poljoprivrednih kultura su soja i različite vrste povrća kao što je zelena salata. Soja je tipična biljka kratkog dana kojoj su potrebni kratki dani da dostigne generativne faze cvetanje i formiranje semena. Zelenoj salati, međutim, potrebni su dugi dani kako bi se održavala vegetativna faza potrebna za proizvodnju listova kao finalnog proizvoda. Kulture kao što su hrast, šećerna repa ili krompir pokazuju slične reakcije na dužinu dana, koje su, međutim, specifične za svaku pojedinačnu kul-

turu i optimizovane selekcijom tih kultura za određene geografske širine. Dakle, možemo zaključiti da su promene u dinamici vegetacije uglavnom uslovljene sledećim meteorološkim elementima:

- varijacijom dužine dana, odnosno trajanja Sunčevog zračenja,
- temperaturom vazduha (uključujući i njene ekstremne vrednosti),
- padavinama i trajanjem sušnih epizoda (naročito u pogledu njihovog rasporeda).

8.2.1. Klasifikacija fenofaza

Da bi se opisale fenološke faze biljaka, razvijeno je nekoliko sistema klasifikacije koji se koriste za registrovanje fenoloških osmatranja. Samo ako postoji sistem fenološke klasifikacije, moguće je sistematski upoređivati rezultate fenoloških osmatranja za različite godine i lokalitete i nezavisno tumačiti fenološke podatke bez obzira iz kog izvora potiču.

Tokom poslednjih decenija u upotrebu je ušla proširena *BBCH*[18] *skala* (Meier, 1997). Bazirana na Zadoksovoj skali za žitarice (Zadoks et al., 1974), BBCH skala se može koristiti za uniformno kodiranje fenološki sličnih faza rasta svih mono- i dikotiledonih biljnih vrsta.

BBCH skala (tabela 8.1) koristi opštu skalu koja se može primeniti i na one biljke za koje još nije definisana posebna skala. Jasne i lako prepoznatljive spoljne morfološke karakteristike koriste se za opisivanje glavnih fenoloških faza rasta i razvoja. Sekundarne faze rasta definisane su kraćim razvojnim periodom.

Tabela 8.1.

BBCH skala za žitarice

Stadijumi	Opis
0	Klijanje/izdanak/razvitak pupoljka
1	Razvitak listova (glavni izdanak)
2	Formiranje bočnih izdanaka/bokorenje
3	Produženje članaka ili razvitak rozete/razvitak stabla (glavnog stabla)
4	Razvitak žetvenih delova biljaka ili vegetativnih organa za razmnožavanje
5	Pojava delova cveta (glavno stablo)/ klasanje
6	Cvetanje (glavno stablo)
7	Razvoj ploda
8	Sazrevanje ili zrenje plodova i semena
9	Starenje, početak mirovanja

[18] BBCH je skraćenica od „Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und CHemische Industrie" koja ukazuje na neke od učesnika u kreiranju prve skale.

Agroklimatski indeksi (vidi glavu 11) koriste se za kvantitativnu procenu: raspoloživih resursa u poljoprivredi, sa njima povezanim procenama rizika i metodama za davanje odgovarajućih upozorenja. Potrebe za resursima određene su fiziološkim procesima biljaka, koji, opet, u velikoj meri zavise od njihovog fenološkog ili razvojnog statusa.

Kao što je već pomenuto, glavni pokretači razvoja biljaka (fenologije) jesu temperatura i dužina dana, dok dostupnost fotosintetski aktivnog zračenja, vode i hraniva ograničava akumulaciju biomase biljaka (rast). Indeksi koji karakterišu razvoj biljke mogu dati indirektne informacije o uticaju klimatske varijabilnosti, kao i o uslovima za dalji rast biljke. Osnovni principi fenoloških indeksa i modela zasnivaju se na tesnoj vezi između temperature na jednoj i rasta i razvoja biljaka na drugoj strani.

Fenološki razvoj biljaka može se upoređivati kako na prostornim tako i na vremenskim razmerama. Poređenja na različitim prostornim razmerama u istom vremenskom periodu mogu pomoći da se utvrde varijacije u regionalnim klimatskim uslovima na većim ili manjim površinama (vidi glavu 12). Poređenja na različitim vremenskim razmerama[19] pružaju važne informacije o reakciji useva na promene vremena[20] što, na primer, može biti od koristi oplemenjivačima prilikom identifikacije otpornosti na abiotički stres.

Upoređivanje vremena nastupanja fenoloških faza u pojedinim godinama ili tokom višegodišnjih perioda, može objasniti prinos i kvalitet u posmatranom periodu (npr. sadržaj i kvalitet proteina kod žitarica ili godišnju varijabilnost u kvalitetu vina) ili ukazati na trendove fenoloških promena od značaja za tehnologiju proizvodnje (npr. određivanje vremena đubrenja, kontrole štetočina ili žetve).

Varijabilnost lokalne klime i sa njom povezane varijacije fenologije useva mogu biti posledica različitih faktora, uključujući i antropogene. Ovaj naziv se koristi kako bi se opisale različite ljudske aktivnosti koje mogu da dovedu do promene meteoroloških uslova, a ukoliko se ponavljaju tokom dužeg vremenskog perioda i do promene klime. Antropogeni faktori koji se vezuju za poljoprivrednu proizvodnju su najčešće: promena biljnog pokrivača (zamena šume oranicama, recimo) navodnjavanje i zasnivanje vetrozaštitnih pojaseva. Praćenje dužine vegetacionog perioda tokom više decenija, daje dobru osnovu da se bolje dokumentuju i shvate promene klime koje su sve izraženije.

8.3. Fenologija štetočina i bolesti

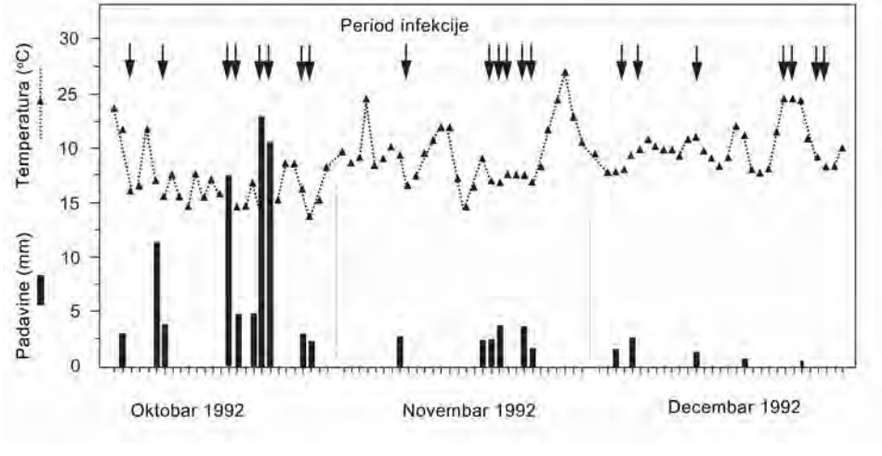
Bolesti, kao što su one uzrokovane gljivama, imaju životne cikluse koji su često usklađeni sa fenologijom domaćina, tj. fenologijom poljoprivredne kulture.

[19] U ovom kontekstu se misli na fizičko vreme.

[20] U ovom kontekstu se misli na meteorološko vreme.

Međutim, razvoj bolesti odvija se takođe i u skladu sa meteorološkim uslovima koji se obično opisuju vlažnošću i temperaturom vazduha i osunčavanjem. To je omogućilo kreiranje različitih algoritama i modela koji opisuju različite faze razvoja štetočina i bolesti i koji se široko koriste za: a) rana upozorenja na mogućnost pojave i b) kontrolu prisustva određivanjem optimalnog trenutka za primenu zaštitnih sredstava u odnosu na fazu razvića štetnog organizma i očekivane vremenske prilike (slika 8.4).

Na dinamiku populacije štetočina i insekata utiče širok spektar biotičkih i abiotičkih faktora. Tokom svojih životnih ciklusa termofilni insekti posebno snažno reaguju na zagrevanje i hlađenje. Međutim, za razliku od biljaka i prouzrokovača bolesti, insekti mogu da se kreću i pronađu pogodnije okruženje za razvoj. Recimo larve zemljišnih štetočina mogu preći u dublje slojeve zemljišta tokom zime ili hladnih vremenskih perioda u doba vegetacije. Insekti poput komaraca mogu da prežive zimu na toplim mestima, na primer u zgradama. Zbog klimatskih promena, klimatske niše se pomeraju i to omogućava novim štetočinima, onim sa većim temperaturnim zahtevima, da uspostave svoje populacije na većim geografskim širinama.

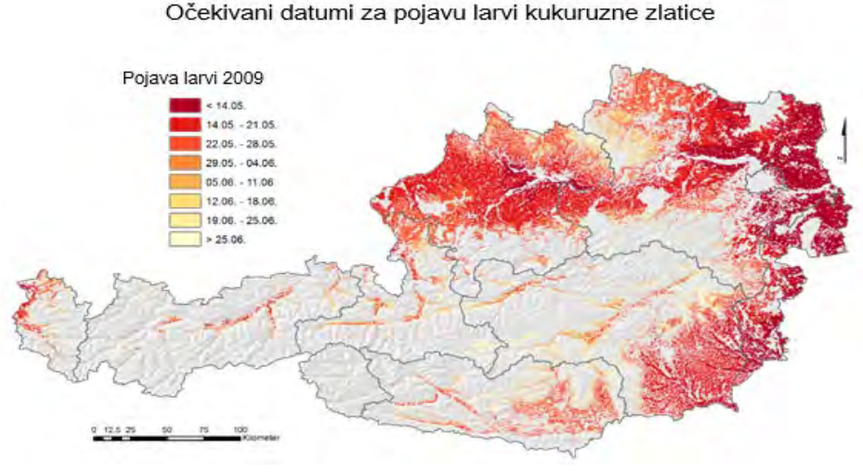


Slika 8.4.

Sistem praćenja i prognoze pojave pepelnice zasnovan na fenološkom algoritmu bolesti u kome su temperatura i padavine pokretači infekcije | [izvor: BOKU-Met]

Postoje mnogobrojni primeri štetočina koje uzrokuju značajne štete u poljoprivredi i koje snažno reaguju na promenjene temperaturne uslove, povećavajući na taj način rizike u poljoprivrednoj proizvodnji.

Na primer, kukuruzna zlatica (*Diabrotica virgifera virgifera*) jeste jedna od najopasnijih štetočina kukuruza širom sveta. Ona je slučajno unesena u Evropu 1993. godine, a u Austriji je prvi put pronađena 2002. godine. Pošto se celokupan proces razvoja jaja, larvi i lutaka odvija ispod zemlje, ova štetočina je veoma osetljiva na promene temperature zemljišta. Zbog toga je ona idealna za testiranje modela za prognozu pojave ovog štetnog organizma na osnovu temperatura zemljišta. Ove temperature mogu biti izmerene ili izračunate modelom za prognozu vremena (slika 8.5).



Slika 8.5.

Očekivani datumi za pojavu larvi kukuruzne zlatice izračunati na osnovu suma temperatura zemljišta i kalibrisani za austrijske uslove (temperatura biološkog minimuma 11,7 °C na dubini zemljišta od 6 cm i potrebna suma temperatura od 280 °C) [izvor: BOKU-Met]

8.3.1. Procena razvoja useva i štetočina na osnovu fenoloških modela

Jedan od najčešće korišćenih pristupa za izračunavanje dinamike vegetacije useva (fenologije) se zasniva na izračunavanju akumulisanih toplotnih jedinica (akumulisani stepen-dani). Prema ovom pristupu, srednje dnevne temperature vazduha iznad temperature biološkog minimuma (na kojoj počinje specifična fenološka faza) sabiraju se u toku vegetacionog perioda u cilju praćenja dinamike razvoja biljke. Za većinu useva utvrđena je temperatura biološkog minimuma između +5 °C i +10 °C. Za pojavu određenih fenoloških faza (kao što je početak cvetanja ili fiziološke zrelosti) odlučujuća je suma temperatura vazduha, iako

mogu doprineti i drugi faktori, kao što su dužina dana ili stresni faktori okoline. Osnovna jednačina za izračunavanja sume temperature je:

(8.1)

gde je GDD – suma akumulisanih stepen-dana, T_a – srednja dnevna temperatura vazduha i T_b - temperatura biološkog minimuma. Primer računanja GDD možete naći u „Numeričkim primerima".

Treba uzeti u obzir da su efekti temperature na fenološki razvoj različiti u zavisnosti od faze u kojoj se biljke nalaze – vegetativnoj ili generativnoj. Takođe postoje razlike između biljnih ekotipova i kultivisanih biljaka, što znači da se fenološki modeli moraju kalibrisati na osnovu fenoloških osmatranja i izmerenih temperatura vazduha tokom višegodišnjeg perioda, pre nego što se mogu primeniti. Navedeni metod za izračunavanje sume temperatura, ima nekoliko manjkavosti:

- temperatura biološkog minimuma za svaku fenološku fazu se mora odrediti za različite biljne vrste, sorte i hibride i testirati u različitim okruženjima;
- ne uzima u obzir: a) promene u dinamici fenologije koje su posledica varijacije temperature tokom vegetacionog perioda, b) uticaj maksimalnih i minimalnih dnevnih temperatura i dnevnog kolebanja temperature, c) sezonske efekte kao što je uticaj hladnih ili toplotnih talasa i različitih kombinacija hladnih i toplih perioda, d) druge uticaje na fenologiju useva kao što su suša ili stres zbog nedostatka hraniva;
- uticaj visokih temperatura je često precenjen i nije uzeta u obzir mogućnost da se negativna reakcija biljke na ekstremne temperature može postepeno smanjivati sa porastom temperature;

U nameri da se izbegnu neke od navedenih slabosti, razvijeno je nekoliko složenijih jednačina za izračunavanje sume temperatura (kao što je ona koja uključuje uticaj ekstremnih temperatura) kao i posebne jednačine za određene kulture kao što je vinova loza.

Poznati primer indeksa koji je razvijen za određenu kulturu je Halinov indeks (Huglin, 1978), koji razmatra sumu srednjih dnevnih i maksimalnih temperatura tokom vegetacionog perioda vinove loze, pretpostavljajući da temperatura biološkog minimuma iznosti +10 °C. Ovaj indeks može biti dobro usaglašen sa potrebama različitih sorti vinove loze. Takođe treba imati na umu da ovaj indeks ne uzima u obzir meteorološke uslove tokom perioda prezimljavanja niti rizike od izmrzavanja vinove loze. Halinov indeks se izračunava na sledeći način:

(8.2)

gde je IH vrednost Halinovog indeksa izračunata za period od 1. aprila do 30. septembra, a K je faktor geografske širine (uticaj dužine dana) (K (40°) = 1,02; K (60°) = 1,06).

8.4. Uticaj niskih temperatura na fenologiju biljaka

Tokom perioda prezimljavanja, mnoge biljke umerenih regiona imaju potrebu za niskim temperaturama. Ova potreba je rezultat složenih, genetski zasnovanih fizioloških mehanizama regulacije mirovanja (dormantnosti) tokom hladnog zimskog perioda, kada rast nije moguć, a otpornost na mraz je neophodna. Period mirovanja je često povezan sa povećanom otpornošću na mraz i niske temperature, koja je neophodna da bi biljke uspešno preživele zimu.

U zavisnosti od tipa biljaka, potrebe za niskim temperaturama povezuju se sa periodom hlađenja, odnosno jarovizacije kod višegodišnjih vrsta, kao što su voćke, ili periodom vernalizacije/jarovizacije kod jednogodišnjih ozimih kultura, kao što su žitarice.

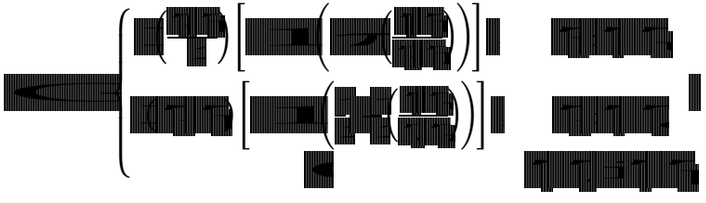
Ove potrebe za niskim temperaturama posebno su važne za određivanje vremena prekida mirovanja u proleće (početak aktivnog rasta kao što je izduživanje stabljike kod jednogodišnjih useva - žitarica, klijanje semena i pupoljenje voćaka u proleće), kao i za pokretanje cvetanja u narednoj fazi rasta i razvića. Ovde treba spomenuti da je dužina dana (fotoperiodični efekat) takođe povezana sa navedenim procesima.

Potrebe biljaka, kada se radi o niskim temperaturama, se izračunavaju ili na osnovu suma temperatura vazduha ili na osnovu trajanja perioda u kome je temperatura vazduha bila ispod granične vrednosti ili u okviru intervala graničnih vrednosti (hladne jedinice). Niske temperature vazduha koje pogoduju biljkama tokom zimskog perioda kreću se uglavnom između 0 °C i 10 °C, ali se zato potrebe za toplotom tokom perioda rasta veoma razlikuju kada se radi o različitim tipovima biljaka, ekotipovima i sortama.

Mirovanje može biti prekinuto toplim periodima tokom zime i ponovo se uspostaviti nailaskom sledećeg hladnog perioda. Međutim, kada počne pupljenje (u voćnjacima i vinogradima) ili započne aktivni rast u proleće (kod ozimih useva), mirovanje se više ne može obnoviti. Od tog momenta pa nadalje, može se primenjivati metod sume temperatura vazduha (indukcioni metod) za izračuna-

vanje vremena do početka narednih fenoloških faza, kao što je očekivano vreme cvetanja.

Fenološki modeli za voćnjake kombinuju algoritme „hlađenja i indukcije" sa različitom parametrizacijom suma hladnih (CU) i toplotnih jedinica (GDH) radi dobijanja boljeg slaganja sa osmotrenim biološkim događajima. Na osnovu podataka o časovnoj temperaturi vazduha mogu se izračunati i hladne (CU) i toplotne jedinice (GDH). Jedan primer modela za izračunavanje toplotnih jedinica potrebnih za cvetanje jabuke zasniva se na korišćenju časovnih temperatura vazduha koje se nalaze u opsegu između temperature biološkog minimuma za datu fenološku fazu (T_b) i kritične temperature (T_c) uz pretpostavku da se maksimalna akumulacija ostvaruje na optimalnoj temperaturi (T_u) (Luedeling et al., 2009):

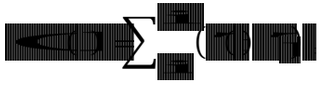


(8.3)

Na osnovu višegodišnjih osmatranja dinamike vegetacije jabuka, sorti Jonagold i Zlatni delišes, utvrđeno je da se najbolja slaganja relacije (8.3) sa osmatranjima dobijaju ako se za granične temperature koriste vrednosti T_b = 7,2 °C, T_u = 12,0 °C i T_c = 36,0 °C. Takođe, ispostavilo se da je u našim uslovima od značaja uključivanje faktora stresa kada je temperatura vazduha manja od -0,5 °C. Za Ajdared su najbolja slaganja sa osmatranjima dobijena korišćenjem F = 0,6, a za Zlatni delišes je F = 0,7 što je u skladu sa robusnom prirodom ove sorte (Lalic et al., 2020).

Hladne jedinice se, nešto grublje, mogu odrediti korišćenjem srednje časovne temperature i vrednosti datih u tabeli 8.2.

Dnevne toplotne jedinice za dan k, (GDH (k)) se računaju kao



(8.4)

gde je T(i) časovna temperatura vazduha, a T_b temperatura biološkog minimuma za datu fenološku fazu. Na osnovu dnevnih toplotnih jedinica se, recimo, izračunava suma temperature potrebnih za cvetanje (GDH(f)):

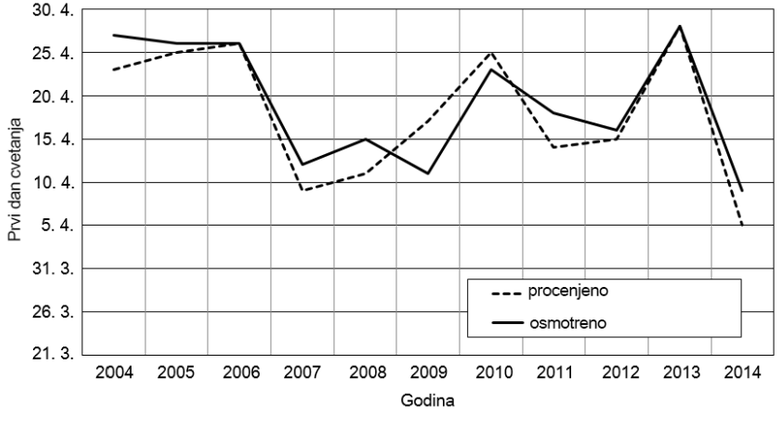
(8.5)

gde je t_1 dan kada se završila endodormancija[21], a t_2 je dan kada je počelo cvetanje (bar 10% cvetova je otvoreno). Vreme završetka endodormancije može da se odredi na osnovu osmatranja fenoloških događaja ili da se izračuna na osnovu akumulisanih hladnih jedinica. Naime, na osnovu višegodišnjeg osmatranja mirovanja moguće je odrediti temperaturu biološkog minimuma za koju se računaju hladne jedinice i sumu jedinica koja se nakupila pre nego što se biološki događaj zaista odigrao. Na osnovu ovih podataka, trajanje perioda jarovizacije se određuje računanjem sume hladnih jedinica (CUs), obično, od 1. septembra (na severnoj hemisferi) pa sve dok se nakupi suma potrebna za datu sortu.

Tabela 8.2.

Vrednosti CU kao funkcija temperature u satima (Richardson et al., 1974)

Temperatura	CU
T ≤ 1,4 °C	0,0
1,5 < T ≤ 2,4 °C	0,5
2,4 < T ≤ 9,1 °C	1,0
9,1 < T ≤ 12,4 °C	0,5
12,4 < T ≤ 15,9 °C	0,0
15,9 < T ≤ 18 °C	-0,5
T > 18 °C	-1,0



Slika 8.6.

Osmotreni i izračunati datumi cvetanja jabuke u Austriji dobijeni primenom kombinovanog UTAH modela [izvor: BOKU-Met]

[21] Endodormancija je mirovanje u razvoju biljke koje je uzrokovano procesima koji se dešavaju unutar same biljke, a ne uslovima u spoljašnjoj sredini.

Najbolji rezultati u primeni ovakvih fenoloških modela se postižu kada se parametri potrebni za izračunavanje CU i GDH odrede na osnovu osmotrenih fenoloških događaja za svaki lokalitet i sortu. Ovaj metod se, inače, naziva kalibracija modela.

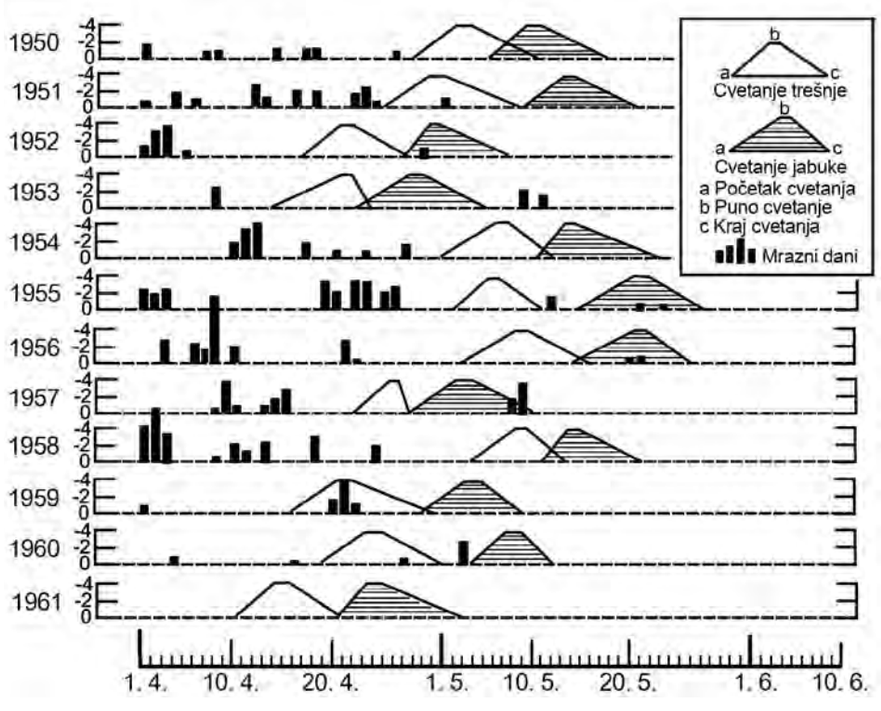
Na primer, CU i GDH su kalibrisani na osnovu osmotrenih datuma kraja mirovanja i početka cvetanja jabuka u izabranim regionima u Austriji. Potom su ovako dobijene formule korišćene za izračunavanje datuma cvetanja jabuka u pojedinim godinama kako bi bila utvrđena tačnost modela (slika 8.6).

8.5. Fenologija useva kao važan izvor podataka za upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom

Fenološki razvoj useva – naročito početak i trajanje važnih fenoloških faza kao što su: mirovanje (dormantnost), klijanje, izduživanje (elongacija) stabljike, cvetanje, nalivanje zrna i fiziološka zrelost – presudno određuju optimalni vremenski period za izvođenje agrotehničkih mera ili tehnologije proizvodnje (obrada zemljišta, zaštita od bolesti i štetočina, mere zaštite useva od abiotičkih ekstrema, đubrenje, žetva ili berba) kako bismo dobili maksimalnu količinu i kvalitet prinosa. Tako fenologija useva, u kontekstu sezonskih vremenskih uslova, ima veliki ekonomski značaj za uzgoj poljoprivrednih kultura. Na primer, vreme i trajanje različitih fenoloških faza useva, kao i prisustvo štetočina i bolesti uglavnom se razlikuju od godine do godine usled različitih vremenskih uslova. Prilagođavanje tehnologije gajenja veoma promenljivim vremenskim prilikama koje se menjaju svake godine, a sa ciljem smanjenja rizika u proizvodnji i osiguranja stabilnih i visokih prinosa gajenih kultura, glavni je izazov u poljoprivredi i proizvodnji hrane širom sveta. Primera radi, početak cvetanja i pojava prolećnog mraza su dva događaja čiji trenutak nastupanja varira iz godine u godinu. Međutim, ako se ovi događaji podudare onda će od dužine njihovog preklapanja u velikoj meri zavisiti veličina oštećenja od mraza (slika 8.7)

Predviđanje fenoloških događaja povezano je sa operacijama u polju kao što su utvrđivanje rasporeda navodnjavanja, vremena đubrenja, kontrole štetočina i vremena žetve, a sve te mere imaju važne ekonomske posledice za poljoprivredne proizvođače zbog optimizacije troškova rada i mehanizacije. Zbog toga se fenološki modeli sa prihvatljivim nivoom tačnosti (+/- 3 dana) koriste u praksi za planiranje mnogih operacija u polju.

Za specijalne namene, fenološki modeli se dalje unapređuju uključivanjem u razmatranje časovnih temperatura vazduha tokom noći, koje imaju važne fiziološke efekte (slika 8.8). Na primer, niske noćne temperature smanjuju disanje biljaka tokom perioda mraka i utiču na faktore povezane sa prinosom poljoprivrednih kultura (npr. sadržaj šećera i skroba), posebno kada su u pitanju paradajz, krompir, zelena paprika, duvan, šećerna repa i druge kulture.



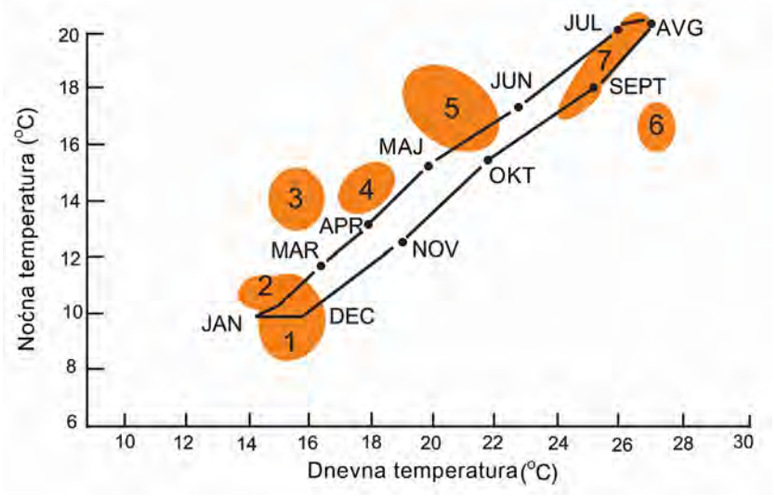
Slika 8.7.

Preklapanje poznih mrazeva i perioda cvetanja jabuka i trešanja u periodu od 1936. do 1961. godine na jednom Nemačkom lokalitetu (prilagođeno od: Schnelle, 1962)

Dnevne temperature vazduha određuju intenzitet fotosinteze i akumulaciju biomase u odnosu na optimalne temperature fizioloških procesa koje su specifične za svaku biljnu vrstu i fazu razvoja. Takođe, dnevne temperature vazduha mogu uticati na fertilnost useva tokom cvetanja, naročito u slučaju graška, jagoda, kukuruza i žitarica, kada ekstremno visoke temperature vazduha negativno utiču na oprašivanje. Sa druge strane, niske dnevne temperature mogu imati pozitivan uticaj na aromatične sastojke. Recimo, temperature niže od 10 °C pozitivno utiču na ukus jagode.

Zapravo, za svaki tip biljke može se definisati optimalna kombinacija dnevnih i noćnih temperatura u odnosu na specifične fiziološke procese u tim biljkama. Kombinovanjem klimatologije dnevnih i noćnih temperatura na specifičnim

lokacijama sa optimalnim odgovorom biljke mogu se utvrditi optimalni lokaliteti (regioni) za gajenje određene biljne vrste.

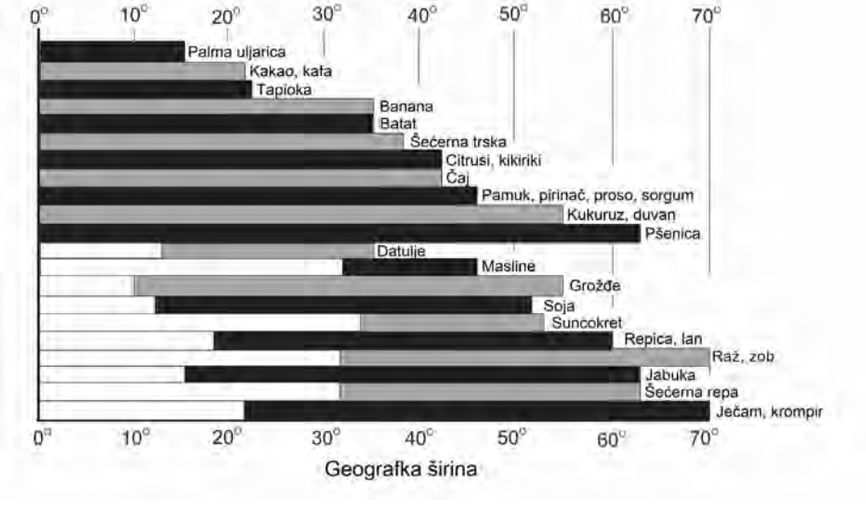


Slika 8.8.

Kombinacija optimalnih dnevnih i noćnih temperatura vazduha

Kombinovanjem klimatskih elemenata koji su najznačajniji za fenologiju useva (uključujući dužinu dana, dnevne i noćne temperature, itd.), sa uslovima rasta na globalnom nivou, može se napraviti klasifikacija geografskih širina i nadmorskih visina glavnih proizvodnih područja za taj usev (slika 8.9).

Najzad, važno je imati u vidu da i temperature zemljišta utiču na fiziološke procese u poljoprivrednim kulturama. Na primer, istraživanja su pokazala postojanje korelacije između temperature zemljišta i akumulacije suve materije (rast) kod kukuruza. Druge studije su utvrdile da temperatura zemljišta direktno utiče na fenologiju vinove loze. Uključivanje temperature zemljišta u fenološke modele moglo bi dalje povećati tačnost fenoloških predviđanja.



Slika 8.9.

Raspodela glavnih proizvodnih područja osnovnih poljoprivrednih kultura u odnosu na geografsku širinu

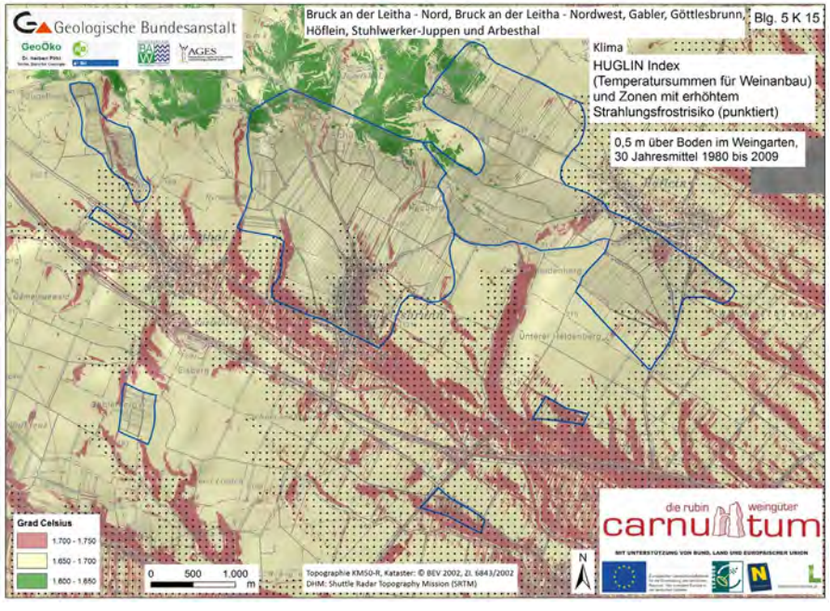
Kada se radi o fenologiji useva i srednjim temperaturama vazduha, može se prikazati zanimljiv odnos između godišnje sume temperatura vazduha, s jedne i prinosa useva na datoj geografskoj širini, s druge strane. Zahvaljujući dužem periodu rasta pirinča u umerenoj klimi (zbog nižih temperatura), njegov srednji prinos se povećava s povećanjem geografske širine (slika 8.10). Sličan efekat je već pomenut za ozimu pšenicu gajenu između srednjih i velikih geografskih širina. Međutim, na malim geografskim širinama, pirinač se može uzgajati 2–4 puta godišnje, zbog dugog vegetacionog perioda i kratkog perioda rasta kod pirinča, čime se postiže veći prinos na godišnjem nivou.

Slika 8.10.

Prosečan prinos pirinča od malih do srednjih geografskih širina

8.6. Fenologija biljaka kao agroklimatski indikator

Ako se posmatraju fenološke faze iste biljne vrste na različitim prostornim razmerama, mogu se uočiti efekti klimatskih varijacija malih razmera**,** kao što je to slučaj u područjima sa kompleksnom topografijom. Varijacije lokalne klime malih razmera usled uticaja nadmorske visine, nagiba terena i zaleđenih mikrodepresija (mesta akumulacije, džepovi) mogu se opisati na osnovu sistematskih i višegodišnjih fenoloških osmatranja. U planinskim područjima, na primer, mogu se primetiti specifični fenomeni. Normalno je da temperatura opada s porastom nadmorske visine (oko 0,5 °C/100 m), što usporava fenologiju biljaka zbog smanjene sume temperatura u posmatranom vremenskom periodu. Međutim, snižavanje temperature s porastom nadmorske visine može se obrnuti tokom inverzije, pri čemu će se unutar inverzionog sloja (vidi glavu 3), udaljavanjem od dna doline (npr., mikrodepresije, ledenog džepa) temperatura rasti s porastom nadmorske visine. Ovaj efekat može uticati na fenologiju biljaka, naročito tokom proleća. Recimo, biljke će cvetati ranije na višoj nadmorskoj visini nego na dnu doline gde su u godišnjem proseku temperature (i sume temperatura) obično više.



Slika 8.11.

Halinov indeks i područja u kojima postoji rizik za pojavu prolećnog mraza (oivičena plavim linijama) za vinogradarski region u Austriji u klimatološkom periodu 1980–2009 [izvor: BOKU-Met]

Na velikim prostornim razmerama, osmotrena varijacija fenologije specifične biljne vrste, može biti pokazatelj prostornih varijacija klime (kašnjenje fenoloških faza sa porastom geografske širine i nadmorske visine). Ovaj fenomen se, takođe, može pratiti i satelitom kada može da se opazi ozelenjavanje vegetacionog pokrivača na velikim površinama u proleće.

Kada se uspostave i kalibrišu fenološki modeli za određene biljke ili useve, može se obaviti fenološko mapiranje korišćenjem vremenskih podataka na različitim prostornim razmerama. Na primer, mogu se napraviti mape pogodnosti uslova za gajenje neke biljne vrste na osnovu sume temperatura, kao što je za grožđe korišćen Halin indeks za prostorne razmere visoke rezolucije (slika 8.11).

9. Ekstremne vremenske prilike, uticaj na poljoprivredu i mere ublažavanja

Ekstremne vremenske prilike se obično klasifikuju polazeći od fizičke prirode pojave ili, pak, njenih sociooloških i ekonomskih posledica. Ipak, može se reći da se pod ekstremnim vremenskim prilikama može smatrati događaj koji dovodi do značajnog odstupanja jednog ili više meteoroloških elemenata od njegovih normalnih vrednosti za dato područje i godišnje doba, a da pri tom to ima uticaja na živi svet ili bilo koji drugi aspekt životne sredine.

Ekstremne vremenske prilike podrazumevaju sušu, poplave i prateće pojave klizišta, ekstremne okeanske talase, toplotne i hladne talase.

Povećanje učestalosti ekstremnih vremenskih prilika je naročito važno u slučaju manje adaptivnih, nerazvijenih i zemalja u razvoju jer dodatno smanjuje njihovu sposobnost da se oporave između dva takva događaja.

9.1. Suša

Suša je prirodni fenomen koji se javlja zbog nedostatka padavina i visokih temperatura tokom dužeg vremenskog perioda - što dovodi do nedostatka vode potrebne za odvijanje određene aktivnosti i procesa i može dovesti do značajnih šteta (vidi poglavlje 4.4). Ova pojava mora biti stavljena u odgovarajući kontekst kako bi se mogla objasniti: ona je promenljiva po svom tipu, intenzitetu, trajanju, vremenu pojave i prostoru koji zahvata. Važno je da se pojam suše ne meša sa pojmom aridnosti, koja je karakteristika klime i ograničena na područja sa malom količinom padavina i učestale toplotne talase. Tipičan vremenski razmer povezan sa toplotnim talasom je sedmica, dok suša može potrajati mesecima ili čak godinama. Efekti suše mogu se takođe razlikovati i u zavisnosti od perioda kada se ona javi. Velike štete su povezane sa jakim sušama koje se javljaju kada usevi imaju veliku potrebu za vodom.

Doskora se smatralo da se suša razlikuje od ostalih ekstremnih vremenskih prilika po veličini oblasti koju uobičajeno zahvata. Međutim, to više nije slučaj. U prvim decenijama 21. veka efekti poplava i uragana zahvatali su stotine i hiljade kvadratnih kilometara i ugrožavali milione ljudskih života – baš kao i suša u prošlosti, sadašnjosti, a izgleda i budućnosti. Suša može uzrokovati veće štete od drugih prirodnih katastrofa. Iz tih razloga, kada je u pitanju suša, utvrđivanje veličine njenog uticaja i pružanje pomoći predstavljaju teže zadatke nego što je to slučaj sa bilo kojom drugom prirodnom nepogodom. Štaviše, postoji nekoliko vrsta suše, a faktori ili parametri koji definišu vrste suše razlikuju se međusobno, kao što je objašnjeno u poglavlju 4.4.

Suša je integralni deo prirodnog klimatskog ciklusa, iako ekstremne suše mogu imati katastrofalne posledice, dovodeći do prirodnih katastrofa kao što su dezertifikacija, nemogućnost gajenja useva, nedostatak hrane, neuhranjenost, glad i razne epidemije. Klimatske promene čine fenomen suše sve težim, čineći njenu pojavu sve češćom i ozbiljnijom u mnogim delovima sveta. Zbog toga je u mnogim slučajevima vrlo važno razviti adekvatne mere za upravljanje rizicima koje ta nepogoda nosi.

9.1.1. Poljoprivredna suša

Za svaku pojavu suše moguće je odrediti njen prostorni razmer, trajanje i razvoj tokom vremena. Važno je razumeti promene u varijabilnosti klime tokom višegodišnjeg perioda za svaki region posebno, odnosno trendove u pogledu prosečnih količina padavina ili drugačijeg rasporeda padavina tokom godine koji mogu dovesti do pojave suše. Osim toga, važno je uzeti u obzir kako povećanje korišćenja vode u okviru ekonomskih sektora kao što su poljoprivreda, industrija i turizam, tako i moguće posledice takvih povećanja na bilans i kvalitet vode. Istovremeno, značajno je razvijati tehnologije gajenja biljaka koje doprinose optimalnom korišćenju vode. Dok je za poljoprivrednog proizvođača trajanje i intenzitet jednog sušnog perioda najvažniji faktor, prostorni i vremenski razmer suše su ključni faktori za regionalnu politiku upravljanja vodama.

Do sada su razvijeni najrazličitiji indeksi za praćenje suše i padavina u poljoprivredne svrhe (neki od njih su objašnjeni u nastavku koji sledi).

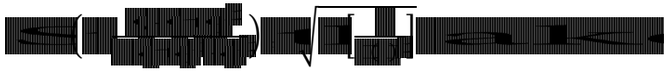
Standardizovani indeks padavina (engl. Standardized Precipitation Index, SPI) je meteorološki indikator suše koji opisuje intenzitet suše kao posledicu smanjenja padavina u odnosu na normalne (klimatološke) vrednosti. Izračunavanje SPI se zasniva na određivanju kumulativne verovatnoće padavina na određenoj lokaciji. To znači da, na osnovu istorijskih podataka o padavinama, može da se odredi verovatnoća njihove pojave na određenom lokalitetu, kao i vrednost SPI indeksa. Svetska meteorološka organizacija je 2012. predložila metodologiju za procenu intenziteta suše na osnovu vrednosti SPI indeksa (tabela 9.1).

Tabela 9.1.

Klasifikacija sušnih uslova prema SPI indeksu i verovatnoća da SPI bude u posmatranoj klasi

SPI	Klasifikacija	Verovatnoća (%)
veći od 2,00	ekstermno vlažno	2,3
od 1,50 do 1,99	vrlo vlažno	4,4
od 1,00 do 1,49	srednje vlažno	9,2
od 0 do 0,99	malo vlažno	34,1
od 0 do -0,99	malo suvo	34,1
od -1 do -1,49	srednje suvo	9,2
od -1,50 do -1,99	vrlo sušno	4,4
manji od -2,00	ekstremno sušno	2,3

Za izračunavanje SPI koriste se jednačine oblika



(9.1a)

i

(9.1b)

gde su sa P označene akumulisane padavine za dati vremenski period, H(P) je kumulativna raspodela verovatnoća posmatranih padavina, a C_0, C_1, C_2, d_0, d_1, d_2, i d_3 su konstante određene na osnovu izmerene količine padavina. SPI indeks može da se izračuna za različite vremenske periode (mesec dana, šest meseci), ali je važno imati u vidu da se za bilo koji lokalitet, ovo izračunavanje, zasniva na podacima dobijenim dugogodišnjim praćenjem padavina. Naime, višegodišnji podaci služe za izračunavanje raspodele verovatnoće padavina koja se potom preračunava i svodi na normalnu distribuciju padavina. Ova metodologija dovodi do toga da je srednja vrednost SPI indeksa za posmatranu lokaciju i izabrani period uvek jednaka nuli.

Palmerov indeks intenziteta suše (engl. Palmer Drought Severity Index, PDSI) je indikator izveden na osnovu podataka o temperaturi i padavinama (tabela 9.2). To je agrometeorološki indeks u čijoj osnovi je jednostavan model vodnog bilansa zemljišta zasnovan na razlici između vode zadržane u zemljištu i potreba za vlagom. I dok je vodu zadržanu u zemljištu moguće izračunati na osnovu poznatih vrednosti temperature i padavina, izračunavanje potreba za vlagom je značajno komplikovanije. Pored postojećih zaliha vlage, potrebno je

poznavati intenzitet evapotranspiracije i druge procese kojima se zadržava i/ili troši vlaga u zemljištu. Cilj primenjene metodologije je da se na osnovu klimatoloških podataka utvrde normalne vrednosti komponenata vodnog bilansa a da se, potom, na osnovu meteoroloških podataka utvrdi odstupanje od normalnih vrednosti i izrazi na skali od -4 (maksimalna suša) do +4 (maksimalna vlažnost). Dugogodišnja praćenja vrednosti ovog indeksa i merenja raspoložive vlage u zemljištu su pokazala da je PDSI pouzdan indikator suše kada se

Tabela 9.2.

Klasifikacija sušnih uslova prema PDSI indeksu

PDSI	Uslovi vlažnosti
4,0 i više	ekstremno vlažno
od 3,0 do 3,99	veoma vlažno
od 2,0 do 2,99	umereno vlažno
od 1,0 do 1,99	blago vlažno
od 0,5 do 0,99	početno vlažno
od 0,49 od -0,49	normalno
od -0,5 od -0,99	početno suvo
od -1,0 od -1,99	blaga suša
od -2,0 od -2,99	umerena suša
od -3,0 od -3,99	jaka suša
manje od -4,0	ekstremna suša

radi o vremenskom razmeru od nekoliko meseci, dok je manje pouzdan za analizu suše na dnevnom ili nedeljnom nivou. Takođe, značajno je imati u vidu da se prilikom izračunavanja PDSI indeksa ne uzimaju u obzir efekti prisustva snega. Izračunate vrednosti mogu biti signal da se započnu ili prekinu aktivnosti predviđene u slučaju suše. PDSI indeks i njegove varijacije često se koriste za praćenje suše i za donošenje operativnih odluka u pogledu navodnjavanja.

Indeks stanja vegetacije (engl. Vegetation Condition Index, VCI) se koristi za praćenje suše na osnovu podataka dobijenih daljinskim merenjima o kojima će više reči biti u glavi 13. Dizajniran je sa namerom da pruži detaljnije informacije o uticaju početka, trajanja i intenziteta suše na vegetaciju poredeći osmotrene promene stanja vegetacije sa istorijskim vrednostima. Za određivanje VCI indeksa koristi se *NDVI indeks (Normalised Difference Vegetation Index)* tokom poslednjih 16 dana (NDVIi) u odnosu na granične (minimalne i maksimalne) vrednosti NDVI *(*NDVImax, NDVImin*) za posmatrani* ekosistem. VCI indeks pokazuje stres nastao zbog vremenskih uslova tj. zbog suše ili prekomerne vlage koristeći relaciju oblika

(9.2)

NDVI indeks je detaljnije objašnjen u glavi 14.

Drugi indikatori koji se često koriste za praćenje suše su sadržaj vlage u zemljištu, visina i gustina snežnog pokrivača, površinski vodotokovi, nivo podzemnih voda, nivo vode u akumulacijama i jezerima, zdravstveno stanje vegetacije, kao i agrometeorološki indeksi izračunati korišćenjem kratkoročne, srednjoročne i dugoročne prognoze vremena. Daljinska merenja nude inovativne mogućnosti za praćenje suše na manjim prostornim razmerima zahvaljujući stalnom unapređivanju prostorne rezolucije ovih merenja. Tehnike daljinskih merenja su posebno pogodne za regione u kojima ne postoji odgovarajuća mreža meteoroloških stanica.

U okviru projekta COST734 obavljeno je istraživanje kako bi se ustanovilo koliko se indeksi koriste za analizu i prognozu suše i/ili vlažnosti i u kojoj meri se operativno koriste u poljoprivrednoj proizvodnji u Evropi. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 9.3.

Prema sadašnjim očekivanjima, klimatske promene bi trebalo da povećaju verovatnoću pojave i intenzitet suše u mnogim zemljama, što stvara dodatni pritisak na snabdevanje vodom i poljoprivredu (vidi glavu 12 o uticaju klimatskih promena). Gledano na globalnom nivou, suša 2012. godine pogodila je istovremeno nekoliko glavnih poljoprivrednih regiona, što je dovelo do nestabilnosti cena hrane na svetskom tržištu. U zemljama koje se već suočavaju sa nesigurnošću u obezbeđivanju hrane, skokovi cena mogu dovesti do socijalnih nemira, migracija i oskudica

Tabela 9.3.

Operativna upotreba agroklimatskih indeksa koji uključuju statističke modele za procenu dostupnosti vode i stanja suše (F - prognoza za nekoliko dana unapred, N - prognoza do 24 h, P - analiza pojava u prošlosti) (Orlandini et al., 2008)

Indeks/model	Tip upotrebe	Vremenski korak	Prostorni korak	Upotreba	Zemlja
Suša					
Sadržaj vode u zemljištu u 10 cm	F	5 dana	Regionalni	Procena regiona zahvaćenih sušom	CH
Indeks hidrometeorološke suše	N	Nedeljno	Nacionalni	Procena regiona zahvaćenih sušom	CZ
Evapotranspiracija	N, P	Dan	Nacionalni	Procena useva i regiona zahvaćenih sušom	AT
Komponente vodnog bilansa	N, P	Dan, nedelja, mesec, godina	Od lokalnog do nacionalnog nivoa	Procena useva i regiona zahvaćenih sušom	CZ, F, I, NO, PL, SI, SK, SRB
Sadržaj vode u zemljištu	P	Dan, nedelja, mesec	10×10 km do nacionalnog	Procena površina zahvaćenih sušom	DE , FI, IT, RO, SI, SRB
VHI	P, N	Mesec	Nacionalni	Procena useva i regiona zahvaćenih sušom	GR
PDSI	P	Prema zahtevu	Nacionalni	Procena regiona zahvaćenih sušom	HR, SRB, GR
Dubina podzemnih voda	P	Mesec	Regionalni	Procena regiona zahvaćenih sušom	I
Raspoloživa voda	P	Nedelja	Nacionalni	Snabdevanje vodom	CZ

Palfai indeks aridnosti	P	Godina	Nacionalni	Pro-cena regiona zahvaćenih sušom	HU, SI
Sume padavina i anomalije	P	Nedelja, me-sec, godina	Regionalni, nacionalni	Pro-cena površina zahvaćenih sušom	AT, I, PL, SI, SRB
Percentili padavina	P	Mesec	Nacionalni	Procena mesečnih padavina u odnosu na normalne vrednosti	HR
SPI	P	Mesec	Regionalni	Deficit padavina	ES, I, SI, SRB, GR
WOFOST model biljne proizvodnje	P	Dan	Regionalni	Sušni dani	NL, SK
Ekstremne padavine					
Suma padavina	F	Sat, dan	Nacionalni, regionalni, lokalni	Procena zahvaćenih regiona	All countries
Intenzitet padavina	F	Sat	Nacionalni-lokalni	Procena zahvaćenih regiona	AT, DE, PL, SK
petodnevna prog-noza verovatnoće pojave padavina od 1,0 mm+	F	Dan	Regionalni	Procena zahvaćenih regiona	CH
Dnevna prognoza 25,0 mm+ padavina	F		Nacionalni	Procena zahvaćenih regiona	GR
Klase padavinskih režima	F		Regionalni	Procena zahvaćenih regiona	RO
SPI mape	P	Dan, mesec, 60 dana, 90 dana	Regionalni, nacionalni	Procena zahvaćenih regiona	I, SI, SRB, HR
Anomalije sume padavina	P	Mesec	Regionalni	Procena zahvaćenih regiona	AT, I, SI
Palmerov Z (Palmer`s Z) indeks	P	Dekada	Nacionalni, mreža stanica	Procena zahvaćenih regiona	SRB

Povećana učestalost suše na nekom području se može lako nastaviti u budućnosti zahvaljujući ciklusu „pozitivnih povratnih sprega". Naime, vrlo suvo zemljište i smanjeni biljni pokrivač mogu dodatno umanjiti verovatnoću padavina na već sušnom području preko smanjene evapotranspiracije i samim tim smanjenog transporta vodene pare u atmosferu. U takvoj situaciji, moguća rešenja uključuju efikasnije korišćenje vode, stvaranje sorti i hibrida sa povećanom otpornošću na sušu, zasnivanje „zelene" infrastrukture (korišćenje prirodnih barijera) za upravljanje bujičnim vodama koje su posledica olujnih epizoda, kao i povećanje energetske efikasnosti u urbanim sredinama (vidi poglavlje 10.4).

9.2. Toplotni talasi

Ekstremni vremenski uslovi koji se javljaju tokom leta, koje karakterišu temperature veće od uobičajenih vrednosti i koje traju danima ili nedeljama, definišu se kao toplotni talasi.

Svetska meteorološka organizacija (engl. World Meteorological Organisation, WMO) nije formulisala standardnu definiciju toplotnog talasa. U nekoliko zemalja, definicija se zasniva na prekoračenju definisanih graničnih vrednosti temperatura koje su izvedene iz izmerenih (istorijskih) podataka za određeno područje (tabela 9.4). S obzirom da se toplotni talas definiše u skladu sa klimatskim uslovima određenog područja, nije moguće predložiti apsolutni temperaturni prag koji bi važio za sve geografske širine.

Jedan aspekt ekstremno visokih temperatura, koji se često zanemaruje, je njihov uticaj na potrebe za atmosferskom vodenom parom. U glavi 4 je objašnjen uticaj temperature na maksimalni pritisak vodene pare u vazduhu i činjenicu da se sa temperaturom ovaj pritisak povećava. To znači da će, pri istoj količini vodene pare u vazduhu, deficit vlage biti veći na većoj temperaturi. Povećanje potrebe za vodenom parom dovodi do povećane transpiracije sve dok ima dovoljno vode na raspolaganju. Kada se javi nedostatak vode dolazi do smanjenja stomaterne provodnosti i smanjenog isparavanja. Ovo ima za posledicu povećanje temperature lista što, opet, dovodi do smanjenja intenziteta fotosinteze. Ako su usevi izloženi ekstremno visokim temperaturama, može brzo doći do vodnog stresa zbog visokog deficita vlage u vazduhu i ograničene sposobnosti useva da usvaja vodu iz zemljišta. Ako vodni deficit traje tokom ograničenog vremenskog perioda, usevi mogu da se vrate u normalno stanje. Međutim, ako vodni stres postane hroničan, usevi će pretrpeti značajna oštećenja (IPCC 2007). Visoke temperature, takođe, dovode do toga da se suša razvija brže i postaje intenzivnija zbog intenzivnog isparavanja i sa njim povezanog povećanja intenziteta stvarne evapotranspiracije.

Tabela 9.4.

Operativna upotreba indeksa za visoke temperature u poljoprivredne svrhe u Evropi (Orlandini et al., 2008)

Indeks/model	Upotreba	Vremenski korak	Prostorni korak, nivo	Upotreba	Zemlja
Temperaturni stres					
Temperaturni indeks	F	dan	region-alno	dani sa temperaturnim stresom	HU
Maksimalna temperatura površine zemljišta, viših delova biljnog sklopa i ispod plastičnog pokrova	P	mesec, vegetacioni period	nacional-na mreža stanica	indikator temperaturnog stresa za useve	AT, DE
Suma temperatura	P	prema potrebi	nacionalni	određivanje zahvaćenih regiona	HR, SI
Temperaturni percentili	P	mesec	nacionalni	određivanje srednjih mesečnih vrednosti i odnos sa normalnim vrednostima	HR
Suma dnevnih maksi-malnih temperatura koje prevazilaze 32 °C	P		nacionalni	dani sa temperaturnim stresom	RO
Broj dana sa maksimal-nom dnevnom tempera-turom iznad 30 i 35 °C	P	mesec	nacional-na mreža stanica	broj dana sa temperaturnim stresom	AT, HR, SI, SRB
Odstupanje dnevne maksimalne temperature od klimatološke normalne vrednosti	P	dan, dekada, mesec	nacional-na mreža stanica	broj dana sa temperaturnim stresom	AT, I, SRB

Temperatura i toplota spadaju u primarne faktore koji utiču na život i rast biljaka. U svakoj fazi rasta, temperatura i toplota igraju ključnu ulogu tokom celokupnog perioda i utiču na razne aspekte rasta biljaka u zavisnosti od godišnjeg doba i fenološke faze. Tako se, recimo, na osnovu termičkih zahteva, biljke iz familije trava mogu podeliti na trave iz hladnije i trave iz toplije klime. Temperaturni trendovi tokom godine su osnovni uslov za setvu i organizovanje drugih poljoprivrednih radova. Da bi se izbegle, umanjile ili bar predvidele štete na usevima i smanjenje prinosa, usled previsokih temperatura, utvrđeni su odgovarajući temperaturni opsezi:

- optimalne temperature – predstavljaju opseg temperatura u kojem je rast biljaka najintenzivniji;
- temperaturni pragovi (minimalne i maksimalne temperature) su temperature ispod i iznad kojih se rast biljke zaustavlja, a zatim ponovo započinje kada se vrednost temperature vazduha „nađe“ između gornjeg i donjeg temperaturnog praga;
- kritične maksimalne i minimalne temperature predstavljaju granične vrednosti temperature koje limitiraju preživljavanje biljaka.

Generalno gledano, povišene temperature povećavaju intenzitet dinamike vegetacije, tj. brzinu rasta. Biljkama obično odgovara viša optimalna temperatura za vegetativni nego za reproduktivni razvoj. Međutim, sa fiziološke tačke gledišta, povećanje temperature vazduha iznad kritičnih vrednosti može dovesti do povratnih ili nepovratnih promena u metabolizmu biljaka koje se odnose na: a) usporen ili umanjen rast biljke i ometanje fotosinteze, b) nekontrolisano povećanje disanja, c) akumulaciju toksina, d) ometanje proizvodnje proteina, e) proteolizu, f) degradaciju ćelijske membrane, g) fiziološke promene biljaka i h) sušenje listova. Međutim, prilično je teško razlikovati oštećenja koja uzrokuje previsoka temperatura od oštećenja uzrokovanih nedostatkom vode ili visokim intenzitetom zračenja. Ipak, simptomi temperaturnog stresa obuhvataju i nekontrolisano opadanje listova, ožegotine na listovima, nekrozu i metaboličku neuravnoteženost (Baisi et al., 1999; Ceccon et al., 2017). Listovi i izdanci su najosetljiviji delovi biljaka (kako za zeljaste tako i za višegodišnje biljke) zbog njihove intenzivne transpiracije i visokog sadržaja vode. Intenzivno sušenje delova biljke zbog temperaturnog stresa, smanjena metabolička aktivnost i, u najtežim slučajevima - apopleksija[22], mogu dovesti do venjenja biljaka. Listovi menjaju boju i postaju hlorotični[23]. Ako se stres produži, nekroza može zahvatiti svo lišće. U uslovima ekstremnog stresa, mogu se pojaviti ožegotine kao posledica nekroze, a zahvaćeni listovi otpadaju posle nekoliko dana. Ožegotine na listovima obično uzrokuje kombinacija visoke transpiracije, nesposobnost korenovog sistema da obezbedi dovoljne količine vode i visoke temperature. Plodovi biljaka su takođe osetljivi na visoku temperaturu i veliki intenzitet sunčevog zračenja. U takvim slučajevima, plodovi pokazuju opekotine na pokožici, posebno one vrste plodova koje imaju tanku pokožicu (paradajz, grožđe, jabuke, kruške i breskve).

Ako su biljke izložene visokim temperaturama tokom ranih faza rasta, mogu se desiti i dodatna odložena oštećenja. U ovim slučajevima stabljike se nekon-

[22] Apopleksija je termin koji uopšteno ukazuje na izenanadan otkaz neke od vitalnih funkcija živog organizma. Kod biljaka se najčešće koristi za opisivanje iznenadnog sušenja delova ili cele biljke koje može biti izazvano stresom (previsoka tempertura, recimo) ili nekim izazivačima biljnih bolesti.

[23] Hlorotičan je onaj koji gubi boju; kod biljaka se ovaj pojam vezuje za poremećaje i bolesti koji dovode do gubitka zelenila listova.

trolisano izdužuju, cvetanje je prerano i proređeno, dok plodovi stvaraju žilavu pokožicu, a njihov prinos je smanjen. U tom smislu, ekstremni događaji koji se javljaju tokom letnjeg perioda imaju dramatičan uticaj na produktivnost biljaka. Ovo se dešava uglavnom zbog oštećenja tokom reproduktivne faze koja utiču na proizvodnju polena, oplodnju i formiranje zrna ili ploda.

Posebno treba istaći da je oprašivanje faza koja je najosjetljivija na ekstremne temperature i da su za oprašivanje kritične temperature niže u poređenju sa drugim fazama, odnosno fiziološkim procesima. Niža kritična temperatura u toku oprašivanja karakteristična je za sve biljne vrste. Dugotrajna izloženost ekstremnim temperaturama tokom faze oprašivanja i formiranja zrna ili ploda značajno smanjuje potencijal prinosa biljke.

U kontekstu klimatskih promena, očekuje se da će pojava ekstremno visokih temperatura postati intenzivnija i češća i da će trajati duže u odnosu na učestalost pojave tokom poslednjin nekoliko decenija (vidi glavu 12). Ekstremne temperature su opasnije za jednogodišnje useve, koji imaju kraću sezonu rasta i brži vegetativni razvoj, nego za višegodišnje useve.

9.2.1. Metodi zaštite od toplotnih talasa

Kratki periodi visokih temperatura mogu imati štetan uticaj na prinos useva (niži prinos zrna, sterilnost, smanjenje kvaliteta zrna, itd.). Zbog toga su neophodne promene u agronomskoj praksi, da bi se osigurala adaptabilnost useva i očuvao njihov potencijal za prinos. Metodi zaštite mogu se definisati kao indirektni i direktni.

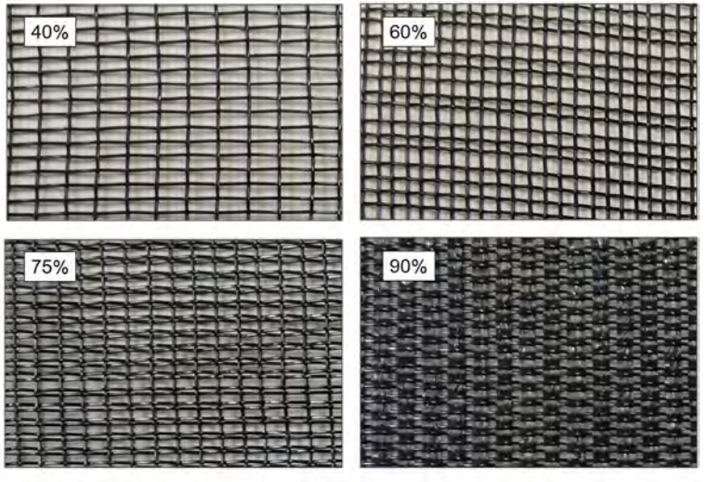
Indirektni metodi su sledeći:

- korišćenje biljnih vrsta koje imaju visoku morfološku i fiziološku tolerantnost prema visokim temperaturama;
- rana setva i korišćenje genotipova kratke vegetacije da bi se izbegle kritične letnje temperature.

Direktne mere:

- izbor proizvodnih parcela na osnovu izloženosti i nagiba;
- međuredna setva useva koji prave senku (široko se koriste u tropskim i suptropskim područjima);
- agrošumski sistemi (takođe vidi poglavlje 10.4)
- korišćenje specijalnih pokrova (npr. plastičnih mreža za senčenje, drvenih zaklona) da bi se smanjila izloženost sunčevom zračenju;
- vetrobrani za smanjenje uticaja dominantnih vetrova;
- hlađenje površinskog sloja zemljišta navodnjavanjem (hlađenje isparavanjem);

- sistemi za hlađenje staklenih bašta (prirodna i veštačka ventilacija, mreže ili boje za senčenje, reflektivni paneli, sistemi za pravljenje veštačke magle).



Slika 9.1.

Mreža za senčenje sa različitim procentom propuštanja sunčevog zračenja

Pokrivači za senčenje koriste se u svrhu smanjenja uticaja direktnog Sunčevog zračenja na različitim visinama, a primenjuju se na otvorenim poljima i u plastenicima (slika 9.1). Oni smanjuju apsorpciju energije na listovima, a time i zagrevanje celokupnog biljnog pokrivača. Koriste se razne strategije pokrivanja, u zavisnosti od zahteva useva i klimatskih uslova. Mreže za senčenje su najčešće korišćeni pokrivači: prema dimenzijama mrežnih otvora, mogu se postići različiti nivoi zasenjivanja (pokrivenost od 30, 50, 70 i 90%). Generalno, mreže za senčenje su crne ili zelene, mada se mogu koristiti i bele mreže za povećanje refleksije Sunčevog zračenja. Na otvorenom polju potrebno je postaviti šipke i nosače mreža.

Protivgradne mreže imaju sličnu strukturu i mogu se koristiti u obe svrhe. Snižavanje temperature se takođe može postići hlađenjem u procesu isparavanja uz pomoć sistema za navodnjavanje (idealno kombinovano sa samim navodnjavanjem). Navodnjavanje prskalicama predstavlja najefikasniju strategiju za snižavanje temperature u usevu i koristi se tokom toplotnih talasa ili tokom fenoloških faza osetljivih na visoke temperature (pre cvetanja, cvetanje, sazrevanje zrna). Pri visokim temperaturama i visokim nivoima evapotranspiracije, navodnjava-

nje obezbeđuje vodu koja povećava vlažnost vazduha i usporava transpiraciju. Sa druge strane, ova strategija povećava ukupnu evapotranspiraciju i potražnju vode za navodnjavanje. Iz tog razloga, korišćenje sistema za navodnjavanje u svrhu hlađenja je preporučljivo samo kada talas ekstremne toplote preti da izazove velika oštećenja na usevu.

Orošavanje se široko koristi na sportskim terenima i ukrasnim travnjacima. U ovom pristupu koristi se fino raspršena voda tokom najtoplijeg dela dana kako bi se smanjila temperatura biljaka i očistili listovi od izlučenih materija (aminokiselina i ugljenih hidrata) koje biljke pojačano izlučuju kada su izložene stresu. Pored toga, smanjenje količine izlučenih materija na listovima smanjuje rizik od napada gljiva (*Pythium* spp.) koje se razmnožavaju uz pomoć tih supstanci.

Biljke koje su izložene dugotrajnim stresnim temperaturama mogu razviti neke vrste otpornosti na visoke temperature. Te vrste otpornosti najčešće su posledica ekofiziološke adaptacije biljaka koja uključuje morfološku strukturu ćelija i druge fiziološke modifikacije kao što su:

- povećanje koncentracije citoplazme, čija posledica je podizanje temperature ključanja;
- modifikacija hemijskih veza vode u ćelijama;
- smanjenje veličine listova;
- stvaranje posebnih organa za čuvanje vode.

Ove strategije prilagođavanja omogućavaju biljkama da smanje uticaj temperaturnog stresa. Međutim, u zavisnosti od vrste useva, određeni štetni procesi i dalje mogu da se razviju kada temperature pređu određeni nivo. Tabela 9.5 daje pregled kritičnih maksimalnih temperatura glavnih poljoprivrednih kultura.

Tabela 9.5.

Kritične maksimalne temperature glavnih poljoprivrednih kultura (Luo, 2011)

Usev	T_{mi} (°C)
Pšenica	47,5
Ječam	35,0
Pirinač	40,0
Kukuruz	35,0
Šećerna trska	44,0
Paradajz	35,0
Soja	39,0
Pamuk	35,0

9.3. Mraz

9.3.1. Vrste mraza i oštećenja koja izaziva

Mraz je pojava koja nastaje kada temperatura vazduha padne ispod tačke mržnjenja (0 °C) na visini između 1,25 m i 2,0 m iznad površine zemljišta, u meteorološkom zaklonu. Intenzitet mraza može jako varirati na malom prostoru usled malih razlika u vlažnosti vazduha i zemljišta, ili zbog postojanja mikrodepresija. U tabeli 9.6 prikazane su vrednosti ekstremnih temperatura vazduha koje su izmerene u periodu od 5. 4. 2003. do 10. 4. 2003. na meteorološkoj stanici Rimski šančevi (Srbija) i na automatskoj meteorološkoj stanici postavljenoj u voćnjaku na Rimskim šančevima udaljenom 5 km od meteorološke stanice. Senzor za merenje temperature vazduha u voćnjaku je postavljen na visini krošnje (oko 1,5 m od tla). Izmereni podaci jasno pokazuju koliko je trajanje i intenzitet mraza u voćnjaku bio veći nego na meteorološkoj stanici. Pritom treba imati u vidu da pored *objektivnih temperatura vazduha* (izmerenih u zaklonu), za biljku mogu biti od značaja i *subjektive temperature vazduha* koje mogu biti niže od objektivnih ako postoji dodatno hlađenje zbog duvanja vetra.

Tabela 9.6.

Maksimalne (T_{max}) i minimalne (T_{min}) temperature vazduha izmerene na meteorološkoj stanici Rimski šančevi (Srbija) i na automatskoj meteorološkoj stanici postavljenoj u voćnjaku na Rimskim šančevima

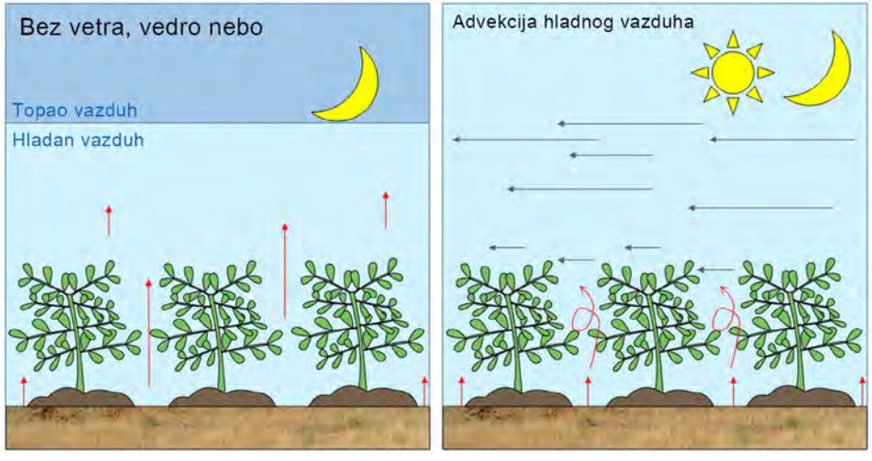
Datum	T_{max} (°C)		T_{min} (°C)	
	Stanica	Voćnjak	Stanica	Voćnjak
5. 4. 2003.	12,2	12,8	-2,2	-5,3
6. 4. 2003.	7,9	6,8	-1,4	-1,9
7. 4. 2003.	5,6	7,0	-6,2	-7,8
8. 4. 2003.	5,5	5,3	-4,2	-6,0
9. 4. 2003.	12,4	14,1	-5,6	-9,3
10. 4. 2003.	18,0	18,2	1,1	-2,5

U zavisnosti od fizičkog mehanizma koji dovodi do pojave mraza razlikuju se radijacioni i advektivni mraz (ili njihova kombinacija). Radijacioni mraz se razvija noću i rezultat je intenzivnog, dugotalasnog radijacionog hlađenja (izračivanja) u mirnim, vedrim i suvim atmosferskim uslovima. Jake površinske inverzije javljaju se u mirnoj atmosferi koja se povezuje sa radijacionim mrazom. Advektivni mraz je rezultat snažnog prodora hladnog vazduha, čija je temperatura ispod 0 °C i umerenih do jakih vetrova. Ponekad se ove dve vrste mraza mešaju:

na primer, neki region može doći pod uticaj hladne vazdušne mase (advektini mraz), praćen sa nekoliko dana mirnih uslova i vedrog neba (radijacioni mraz).

Radijacioni mraz. Radijacioni mraz je prouzrokovan gubitkom toplote sa površine zemljišta preko noći, putem zračenja. Ova vrsta mraza traje uglavnom nekoliko sati, a zatim sledi sunčano jutro i vedro nebo. Iako su u toku dana, u periodu javljanja mraza, temperature vazduha iznad 0 °C, noću, počevši od momenta kada sunce zađe, one uglavnom padaju ispod 0 °C. Ova vrsta mraza javlja se zimi ili u proleće. Radijacioni mraz se često javlja posle prolaza fronta suvog i hladnog vazduha, koji prethodi dolasku hladne vazdušne mase. U takvim uslovima, temperatura vazduha se povećava sa visinom u mikro sloju u blizini površine zemljišta. Što se tiče zaštite useva od izmrzavanja, temperaturna inverzija se smatra jakom kada temperatura iznosi –10 °C na 12–15 m iznad zemlje. U suprotnom, tj. kada je razlika u temperaturi manja od –15°C, inverzija se smatra slabom. Dešava se često u slučaju radijacionog mraza da do najvećeg pada temperature dolazi u vreme zalaska sunca. Bilans neto zračenja se brzo menja od pozitivnog do negativnog, što je posledica smanjenja intenziteta Sunčevog zračenja od njegove najveće vrednosti u podne do nule pri zalasku sunca, uz dugotalasno zračenje Zemlje koje je uvek negativno. Ako je vazduh oko, recimo, lista suv i stabilan i ako nema vetra, list gubi toplotu koja odlazi u više slojeve atmosfere brže nego što može usvajati toplotu iz okolnog vazduha. U ovim uslovima list može da dostigne 0 °C čak i ako je temperatura vazduha i dalje malo iznad 0 °C (2–3 °C). Kako mraz nailazi brzo, on može biti rizičan za biljke iako nije smrtonosan: ivice listova postaju smeđe i smežurane, što često podseća na oštećenja od herbicida (Snyder and de Melo-Abreu, 2005) (slika 9.2a).

Advektivni mraz. Za ovu vrsta mraza je karakteristično da hladan vazduh zamenjuje topli na određenom području. On je povezan sa vedrim noćnim uslovima, umerenim do jakim vetrovima, odsustvom temperaturne inverzije i niskom vlagom. Pošto nema inverzije, teško je zaštititi useve od ove vrste mraza. Advektivni mraz može se javiti u uslovima mediteranske klime, a uobičajena je i u istočnim delovima Severne Amerike, npr. na Floridi, suptropskom području u koje povremeno nadiru hladne kontinentalne vazdušne mase iz arktičkih regiona (Snyder and de Melo-Abreu, 2005) (slika 9.2b). Takođe, u kasnu jesen, zimu i rano proleće advektivni mraz može da se javi i u našim krajevima.



Slika 9.2.

Radijacioni (a, levo) i advektivni (b, desno) mraz

Oštećenja od mraza, njihov oblik i razmer u najvećoj meri zavisi od intenziteta mraza, vrste biljke i faze njenog razvića. Različite biljne vrste ili sorte trpe različite stepene oštećenja od mraza pri istoj temperaturi i u istoj fenološkoj fazi, a u zavisnosti od prethodnih vremenskih uslova kao i „kaljenja", što je način na koji se biljka prilagođava niskim temperaturama. Mladi izdanci se lakše oštećuju od starije biljke, zato što su njihovi ćelijski zidovi znatno tanji i sadrže više vode. Mala oštećenja od mraza se manifestuju kao mali žuto-beličasti delovi na mladom lišću, koji će na kraju potamneti i otpasti. Jaki mrazevi mogu izazvati očigledna oštećenja, a izdanci i cvetovi mogu otpasti već sat vremena posle zamrzavanja. Plod može istruliti i otpasti za nekoliko dana.

Tabela 9.7.

Kritične temperature za različite fenološke faze

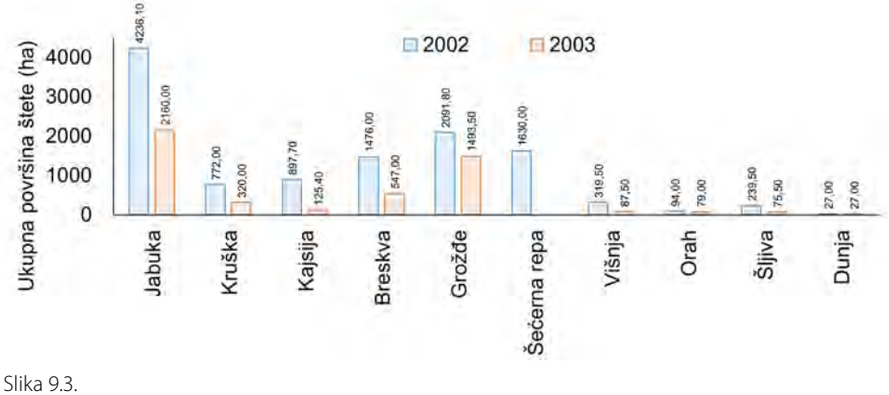
Fenološka faza	Kritične temperature (°C)		
	Kajsija	Breskva	Šljiva
Zatvoren pupoljak	-1,1	-3,9	-1,1
Puno cvetanje	-0,6	-2,2	-0,6
Mladi, zeleni plodovi	0,0	-1,0	-0,6

Oštećenja od mraza se javljaju kada se led (koji ima veću zapreminu od vode pre mržnjenja) formira u biljnom tkivu i ošteti ga prilikom širenja. Razlikuju se dva tipa oštećenja, direktno (kada se ledeni kristali formiraju unutar ćelijske pro-

toplazme) i indirektno (kada se led formira unutar biljaka, ali izvan ćelija) (Snyder and de Melo-Abreu, 2005). Možemo razlikovati oštećenja od hladnoće koja se javljaju kada su biljke izložene temperaturama od +5 °C do –2 °C; oštećenja usled sušenja, do kojih dolazi kada se led kreće po površini listova na temperaturama od 0 °C do –2 °C, i oštećenja od smrzavanja, koja se dešavaju na temperaturama ispod –2 °C kada se, zbog brzog formiranja leda, stvaraju ledeni kristali u tkivu biljaka. Veličina oštećenja zavisi od brzine kojom temperatura pada, a ne toliko od trajanja niske temperature. Čini se da je brzina odmrzavanja nakon zamrzavanja takođe delimično povezana sa intenzitetom oštećenja.

Temperatura pri kojoj se dešavaju značajna oštećenja biljke naziva se - kritična temperatura. Vrednosti ove temperature u velikoj meri zavise od biljne vrste, hibrida i sorte, fenološke faze i mnogih drugih faktora koji utiču na hlađenje biljke i efekte hlađenja (tabela 9.7). Tokom svog razvoja biljke su razvile različite mehanizme za modifikovanje mikroklime biljnog sklopa kao što su razvoj gustih sklopova i stvaranje organa sa visokim toplotnim kapacitetom. U tom kontekstu zanimljiva i značajna je uloga snega. Sneg se, kao što znamo, ponaša kao izolator. Kada se zadrži na površini biljke može značajno da zaštiti kako nadzemne tako i podzemne delove biljaka. Iz tog razloga, u krajevima gde je sneg zimi redovna pojava, neke biljke su razvile svoje morfološke karakteristike (oblik, površina, nagib i arhitektura listova) tako da efikasno zadržavaju sneg na površini.

Tolerantnost prema niskim temperaturama može se postići i snižavanjem tačke mržnjenja. Kada se radi o vanćelijskom mržnjenju, povećana tolerantnost se postiže povećanjem koncentracije materija rastvorenih u protoplazmi koja dovodi do smanjivanja količine formiranog leda. Sa druge strane, unutarćelijsko mržnjenje izbegava se povećavanjem permeabilnosti (propusnosti) ćelijske membrane.



Slika 9.3.

Ukupne štete od mraza u Vojvodini u 2002. i 2003. godini

Tabela 9.8.

Štete od mraza u Vojvodini u 2002. i 2003. godini izražene preko površine na kojima su zabeležene štete (ha)

Godina	2002									
Region	Jabuka	Kruška	Kajsija	Breskva	Vinova loza	Šećerna repa	Trešnja	Orah	Šljiva	Dunja
B. Topola	44	28	8							
Senta			628	628	489		25			
Zrenjanin	35	23,5	17			40	3,5			
Pančevo	157	20,5								
N. Sad	17		2				25			
Vrbas	36		28,40				96	76	12,5	
Šurjan			14			40				
Vršac	346	91	8,30	144	434		17		62	
Subotica	1021,2	70	92	182	211		66	14	27	27
Irig	480	294	20	272		1460				
Ruma	160	90	10	270			20		70	
Kovin	35	10	3		45	90		4	28	
Odžaci	282				249,8		67		40	
Kikinda	570	115	67							
N. Sad	1053	30			663					
Ukupno:	4236,1	772,0	897,7	1476,0	2091,8	1630,0	319,5	94,0	239,5	27,0

Godina	2003									
Region	Jabuka	Kruška	Kajsija	Breskva	Vinova loza	Šećerna repa	Trešnja	Orah	Šljiva	Dunja
B. Topola						1107				
Zrenjanin			2			500				
Pančevo						638				
A. Šantić						340	20			
N. Sad			2							
Vrbas			2,4			8718		76	12,5	
Subotica	122	50	30	25	71	671				
Irig	480		20	272	728	9411			62	
Ruma	250	250		250		3500			27	27
Kovin	25	8	2		30	80		3	28	
Odžaci	230				1,5	5257	67,5		40	
Kikinda			67			2800				
N. Sad	1053	12			663	647				
Ukupno:	2160,0	320,0	125,4	547,0	1493,5	33669,0	87,5	79,0	75,5	27,0

Razmere koje mogu poprimiti štete od mraza prikazane su u tabeli 9.8 i na slici 9.3. Podaci pokazuju štete zabeležene u Vojvodini tokom proleća 2002. i 2003. godine. Najveći deo šteta nastao je tokom nekoliko noći u aprilu (za 2003. videti podatke u tabeli 9.6) kada je temperatura vazduha pala ispod kritične vrednosti.

Šteta koju je mraz prouzrokovao je bila tolika da 2002. u mnogim delovima Vojvodine nije organizovana berba jabuka, a 2003. je šećerna repa zaorana na više od 33000 ha.

Male promene temperature mogu dramatično uticati na razmere štete od mraza (tabela 9.9). U situacijama kada su temperature vazduha više od 4 °C ispod kritične, nije moguće izbeći štete od niskih temperatura ali je moguće smanjiti ih. Svaki stepen porasta temperature vazduha, smanjiće štetu za nekoliko procenata – a nekada je to jedino što može da se učini.

Tabela 9.9.

Nivo štete od mraza u zavisnosti od temperature i fenološke faze za sortu jabuke Zlatni delišes (Snyder and de Melo-Abreu, 2005)

Fenološka faza		10% štete	90% štete
BBCH	opis		
07	Početak listanja: prvi zeleni vrhovi postaju vidljivi	-7,5	-15,7
15	Većina listova je odvojena ali nisu dostigli punu veličinu	-5,6	-11,7
60	Prvi cvetovi su otvoreni	-2,3	-3,9
65	Puno cvetanje: oko 50% cvetova je otvoreno, prvi krunični listići počinju da opadaju	-2,9	-4,7
69	Kraj cvetanja svi krunični listići su otpali	-1,9	-3,0

Indeksi mraza. Mnogi indeksi koriste se za opisivanje uticaja mraza na različite ekosisteme. Takvi indeksi uključuju podatke kao što su datum poslednjeg mraznog dana u proleće i prvog mraznog dana u jesen, broj uzastopnih mraznih dana, broj bezmraznih dana i dužina vegetacionog perioda. Mnogi od ovih indeksa izračunavaju se na osnovu minimalne dnevne temperature vazduha. U nastavku su navedeni neki primeri.

- Mrazni dan se definiše kao dan sa minimalnom temperaturom nižom 0 °C.
- Broj mraznih dana (nFD) definisan je kao broj dana sa mrazom. Ovaj parametar se određuje na mesečnom, sezonskom i godišnjem nivou.
- Broj bezmraznih dana (nFFD) definisan je kao broj dana bez mraza. I ovaj parametar određuje se na mesečnom, sezonskom i godišnjem nivou.
- Poslednji prolećni mraz (LSF) je poslednji dan u periodu od marta do maja sa minimalnom temperaturom manjom od 0 ˚C. Prvi jesenji mraz (FFF) je dan u periodu od septembra do novembra sa minimalnom temperaturom manjom 0 ˚C.
- Dužina vegetacionog perioda (GSL) računa se od početka proleća do jeseni. Ukoliko nas interesuje rast vegetacije, a ne njena otpornost, viši temperaturni pragovi (10 °C i 6,1 °C) se koriste za početak proleća i kraj jeseni. Broj dana od poslednjeg prolećnog mraza do prvog jesenjeg mraza u okviru iste godine smatra se dužinom vegetacionog perioda.

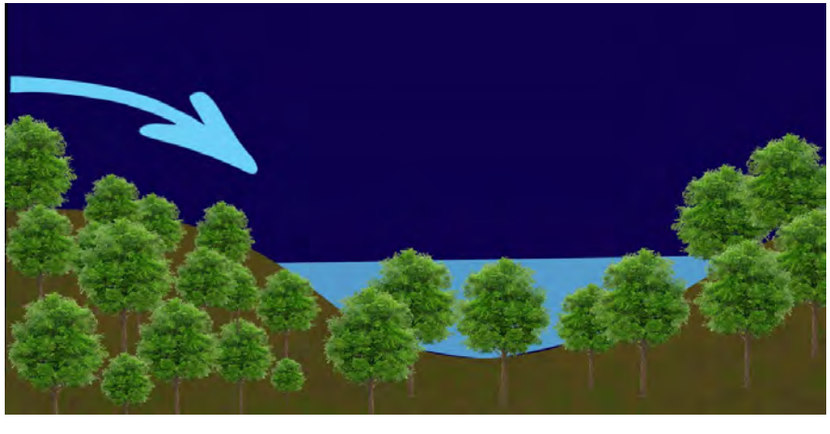
Ovi indeksi su veoma važni jer, recimo, broj bezmraznih dana u toku godine odražava ukupni trend zagrevanja u okviru klimatskog sistema.

9.3.2. Zaštita od mraza

U zavisnosti od aktivnosti koje treba preduzeti da se biljka zaštiti od mraza, mere zaštite se mogu klasifikovati kao *pasivne* i *aktivne*.

Pasivne mere zaštite od mraza uključuju pravilan izbor položaja voćnjaka prilikom zasnivanja, kontrolu vlažnosti zemljišta i prisustva travnatog pokrivača.

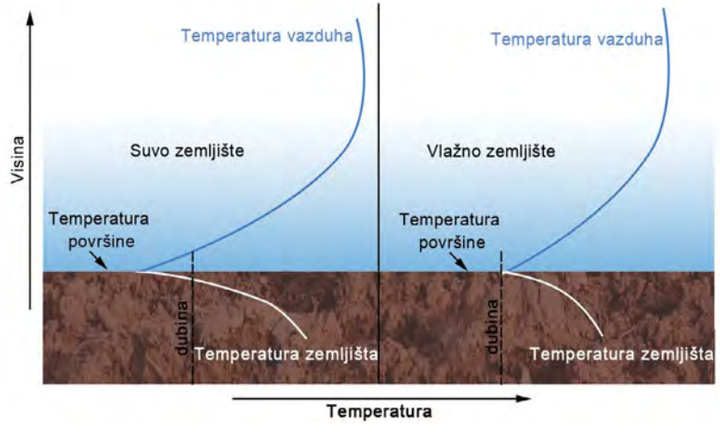
Položaj voćnjaka. Ukoliko se voćnjak nalazi u brdsko-planinskom području treba imati u vidu da je hladan vazduh uvek gušći i teži od toplog i da se zbog toga spušta niz brdo formirajući u dolini jezera hladnog vazduha (slika 9.4). Na ovim mestima, kao i na suviše izloženim vrhovima, temperatura vazduha je uvek niža nego na padinama brda na kojima hladan vazduh nesmetano prolazi kroz voćnjak ne zadržavajući se. Prisustvo objekata ili visoke vegetacije na padanima može da blokira ili skrene silaznu struju hladnog vazduha čime se smanjuje intenzitet i trajanje mraza.



Slika 9.4.

Formiranje jezera hladnog vazduha u dolini

*Sadržaj vlage u zemljištu***.** Toplotna provodnost i toplotni kapacitet zemljišta u velikoj meri zavise od sadržaja vlage u zemljištu. Kada je zemljište vlažno, njegov toplotni kapacitet je veći, a albedo manji tako da se tokom dana akumuliše veća količina toplote u zemljištu nego ako je ono suvo (slika 9.5). Jedan deo ove toplote se transportuje u dublje slojeve zemljišta (efikasnije kada je zemljište vlažnije), a jedan se zadržava u površinskom sloju i zagreva ga. Tokom noći ovako zagrejano zemljište može dugo da greje vazduh koji naleže na njega i da smanjuje intenzitet hlađenja. Ako je sadržaj vlage u zemljištu blizu poljskog vodnog kapaciteta nije potrebno sprovoditi navodnjavanje. Naravno, ako je zemljište veoma suvo nekoliko



Slika 9.5.

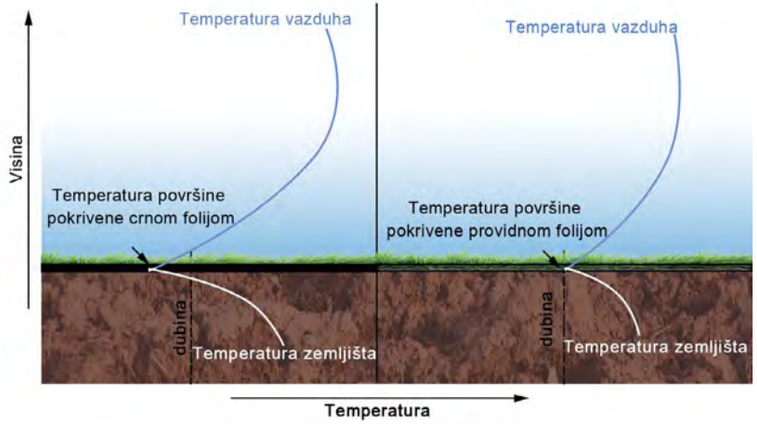
Uticaj vlažnosti zemljišta na promene temperature zemljišta sa dubinom i promene temperature vazduha sa visinom

meseci pre sezone mrazeva, onda je dobro obaviti navodnjavanje jer će sva vlaga koja stigne u površinski sloj biti brzo transportovana u dublje slojeve zemljišta. Prekomerno navodnjavanje neće dati niukom pogledu bolje rezultate, a u nekim situacijama može dati i negativne efekte.

Pokrivači. Travnati pokrivač u voćnjacima i vinogradima se ponaša kao reflektujuća površina za sunčevo zračenje tako da manje energije može da bude akumulisano u zemljištu i intenzitet mraza se povećava. Zato je skraćivanje ili potpuno uklanjanje travnatog pokrivača jedna od mera zaštite od mraza. U prisustvu veštačkih prekrivača, koji propuštaju kratkotalasno a zaustavljaju dugotalasno zračenje, u značajnoj meri se povećava količina toplote akumulisana u površinskom sloju zemljišta, što u kombinaciji sa optimalnom vlažnošću zemljišta može značajno da povisi temperaturu vazduha u voćnjaku (slika 9.6).

Sve navedene karakteristike lokaliteta mogu da snize ili povise temperaturu vazduha u voćnjaku čak za 2 °C što u nekim situacijama dovodi do značajnog povećanja ili smanjenja štete od mraza.

Aktivne mere zaštite od mraza podrazumevaju izmenu mikrometeoroloških uslova u biljnom sklopu dodavanjem i konzerviranjem toplote, usporavanjem izračivanja ili mešanjem vazduha.

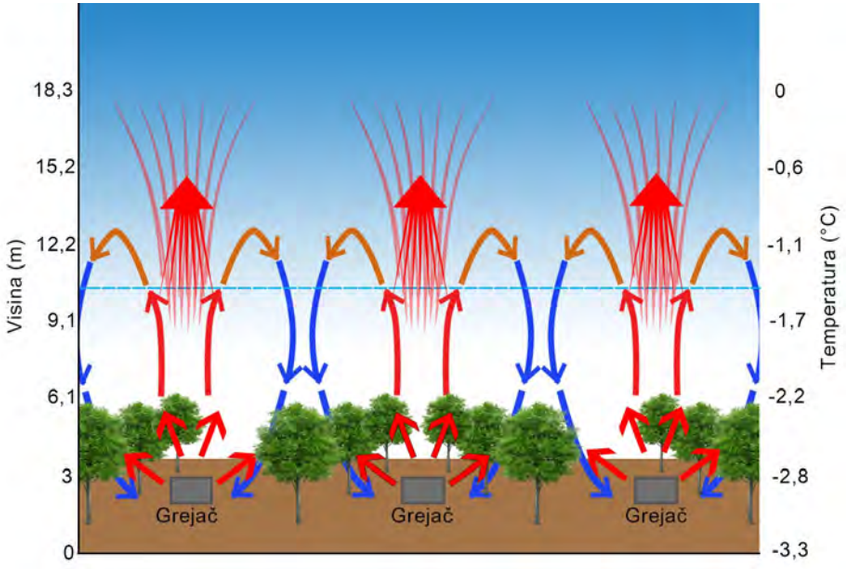


Slika 9.6.

Uticaj veštačkih pokrivača na promene temperature zemljišta sa dubinom i promene temperature vazduha sa visinom

Grejači za zasade. Grejači se koriste za zaštitu voćnjaka i vinograda od mraza više od 2000 godina (Snyder and de Melo-Abreu, 2005). Potrebno je samo postaviti dovoljan broj grejača na odgovarajuća mesta u voćnjaku u situaciji kada nema vetra ili je vetar umerene jačine (slika 9.7). Praksa je pokazala da je bolje koristiti više manjih grejača nego manje grejača velike snage. Sagorevanjem goriva oslobađa se toplota koja kroz male otvore na grejaču odlazi u okolni vazduh i zagreva ga. Važno je da su otvori na grejaču postavljeni na bočnim stranama tako da se toplota iz grejača kreće u horizontalnom pravcu i utiče na temperaturu što većeg dela prostora u voćnjaku. Topao vazduh oko grejača postaje znatno topliji i ređi od okolnog vazduha pa formira lokalnu uzlaznu struju koja izaziva mešanje slojeva vazduha. Na taj način se topao vazduh zadržava u predelu krošnji drveća. Za stvaranje ovakvih uslova potrebno je mnogo grejača, 120–170 po hektaru što značajno poskupljuje primenu grejača koji se danas najčešće koriste u rasadnicima.

Mašine za vetar. Ove mašine imaju zadatak da mešaju vazduh. Najbolji efekat postižu u brdovitom i planinskom području u prisustvu inverzije. Mešanjem toplijeg vazduha iz viših slojeva sa hladnijim vazduhom pri tlu smanjuje se visina inverzije. Efikasnost ovih mašina zavisi od brojnih faktora među kojima su pre svega topografija voćnjaka, uobičajena visina sloja inverzije i temperaturna razlika između tla i vrha sloja inverzije. U zavisnosti od uslova i topografije, mašine za vetar mogu da obezbede povećanje temperature vazduha za oko 2 °C na površini od 4 do 5 ha. Standardne mašine za vetar imaju efektivni radijus delovanja od oko 90–120 m, u zavisnosti od snage mašine (Snyder and de Melo-Abreu, 2005).



Slika 9.7.

Zaštita od mraza u voćnjacima upotrebom grejača

Orošivači i mikroorošivači. Primena ovih uređaja se zasniva na ideji zaštite biljke od kritičnih temperatura dodavanjem toplote u biljni sklop i stvaranjem ledene skrame koja služi kao izolator. Prilikom orošavanja biljnog sklopa sitnim kapljicama vode na temperaturama bliskim 0 °C ili nižim, mržnjenje vode počinje dok kapljice lete kroz vazduh i u trenutku kada dodju do biljke pretvore se u led. Tom prilikom dolazi do oslobađanja latentne toplote mržnjenja vode (koja ostaje u vazduhu i greje ga) i stvaranja tankog sloja leda na površini biljke. Izuzetno je važno da se pri orošavanju formira sprej a ne kapljice različite veličine koje bi formirale neravnomerno raspoređene ledene površine na biljci i dovele

do oštećenja. Orošavanje intenziteta 3,7 mm h^{-1} može da zaštiti cvetove voćki na temperaturi od -6,6 °C (slika 9.8). Tokom niza testiranja ustanovljeno je da je efikasnost primene orošivača veća ako se postave ispod krošnje nego iznad krošnje jer se umanjuje štetno delovanje vetra, intenzitet mržnjenja je veći jer je temperatura vazduha pri tlu niža, a zadržavanje spreja na listovima je manje. Orošavanje treba prekinuti tek kada temperatura vazduha poraste dovoljno da se istopi led sa površine biljke.

Iako je veoma efikasan ovaj sistem ima nekoliko slabosti. Prvo, tokom jakih i dugih mrazeva led se može toliko nagomilati da izazove lomljenje grana drveća. Drugo, tokom mnogo uzastopnih noći sa mrazom ili ako se mraz javlja rano u toku noći, ove prskalice moraju da rade po više sati neprekidno, što dovodi do natapanja zemljišta vodom i povećanog rizika od truljenja korena. Na kraju, vetar može naneti kapljice na samo jednu stranu voćnjaka i odneti značajan deo oslobođene toplote.

Slika 9.8.

Grana voćke nakon primene orošavanja u zaštiti od mraza (Snyder and de Melo-Abreu, 2005)

Istraživanja su potvrdila pretpostavku da su mašine za vetar i orošivači ekonomičniji od grejača koji koriste različite vrste goriva iako su početna ulaganja veća (Snyder and de Melo-Abreu, 2005).

Tabela 9.10.

Potreban broj uređaja po hektaru i opseg troškova instalacije i korščenja u 2000. godini u voćnjacima i vinogradima u državi Vašington (SAD) (Snyder and de Melo-Abreu, 2005)

Metod	Broj uređaja	Cena instalacije ($ ha^{-1})	Cena eksploatacije ($ ha^{-1})
Grejač na tečno gorivo	99	2471–2965	93,08
Grejač na gas	153	6178–9884	103,98
Orošivači– iznad krošnje		2224–2965	4,10
Orošivači – ispod krošnje		2224–3459	4,25
Mikroorošivači		2471–3706	4,25

9.4. Oluje, grad i vetar

9.4.1. Grad

Kada temperatura oblaka dostigne vrednosti između -5 °C i –20 °C, može doći do još jedne štetne pojave, a to je oluja sa gradom (vidi poglavlje 5). Pored oluje, grad nanosi dodatne štete usevima uzrokujući povrede različitih delova biljke, opadanje cvetova i plodova, kao i lomljenje zeljastih i drvenastih delova biljaka. Kao sekundarni uticaj, patogene gljive mogu koristiti oštećena tkiva kao puteve invazije i naneti značajne gubitke prinosa kako u smislu kvaliteta tako i kvantiteta.

Jake oluje sa gradom mogu uticati na poljoprivrednu proizvodnju, nanoseći značajne, a često i totalne direktne gubitke prinosa. Poljoprivredni usevi se mogu štititi uz pomoć aktivnih i pasivnih strategija.

Aktivne strategije imaju za cilj sprečavanje pojave oluja sa gradom upotrebom hemijskih jedinjenja. U upotrebi su uglavnom srebro–jodid ili higroskopna jedinjenja, koji se koriste da bi se smanjila veličina kišnih kapi, podstakle ranije padavine i sprečilo stvaranje zrna grada. Danas se uglavnom koriste protivgradne rakete (slika 9.9) koje se ispaljuju sa zemlje i pomoću njih se hemijska jedinjenja ubacuju u gradonosne oblake.

Pasivne strategije u borbi protiv grada, odnosno smanjenja šteta od grada, uključuju pre svega, protivgradne mreže koje se široko koriste u proizvodnji voća (slika 9.10). Presretanje zrna grada je obezbeđeno pasivnom zaštitom, pomoću mreža postavljenih iznad biljaka. Mreže su obično izrađene od polietilena, sa kvadratnim ili pravougaonim rupama dimenzija od 2 do 11 mm. Mreže se oslanjaju na stubove i sistem žica koji je postavljen pod specifičnim nagibom kako bi se obezbedilo da se zrna grada mogu ukloniti iz mreža.

Slika 9.9.

Protivgradni top [izvor: Massimo Telò – Own work, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=19250054]

Kao veoma važna mera za zaštitu od ekonomskih gubitaka, osiguranje od grada je postalo sasvim uobičajeno za poljoprivrednike iz ugroženih područja, kao što su ona u blizini Alpa. U Austriji, na primer, više od 40% proizvođača ima osiguranje za sve vrste useva, a posebno za voćnjake. Premija osiguranja može biti značajno umanjena ako poljoprivrednici instaliraju mreže za zaštitu grada.

Slika 9.10.

Mreže za zaštitu od grada u voćnjaku

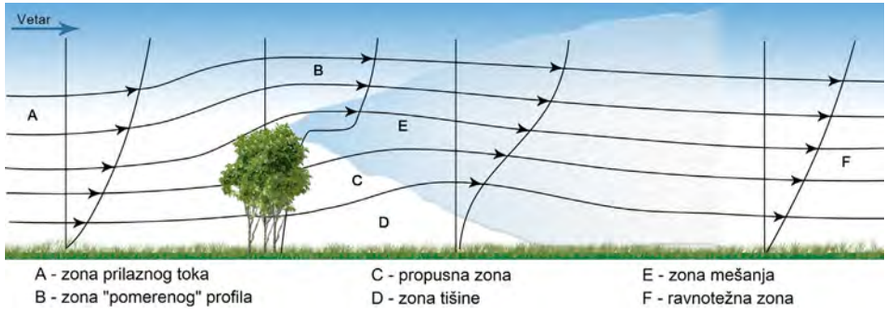
9.4.2. Vetar i oluje

Vetar igra značajnu ulogu u razmeni gasova između tla i viših slojeva atmosfere, prenosu polena, ali i prenosu različitih štetnih organizama (spore, insekti). Kada vetrovi dostignu olujne jačine (8–9 B, vidi tabelu E6.2 u glavi „Numerički primeri") njihovo delovanje može izazvati velike štete za kratko vreme: poleganje useva, lomljenje grana, opadanje cvetova i plodova, čupanje biljke iz korena i eolsku eroziju (erozija zemljišta uzrokovana vetrom). Eolska erozija pogađa širok spektar područja u svetu i smanjuje globalne poljoprivredne površine iz godine u godinu tako što intenzivira proces dezertifikacije. Eolska erozija se javlja u specifičnim klimatima (određenim vetrom, padavinama i temperaturom), sa specifičnom vlažnošću i strukturom zemljišta i specifičnim karakteristikama površine zemljišta i vegetacije. Odgovarajuća brzina i smer vetra, kao i intenzivna turbulencija pri tlu, mogu ukloniti značajne količine čestica zemljišta. Merenje intenziteta turbulentnog transporta je najveći izazov jer se smanjuje sa smanjenjem brzine vetra, a povećava sa povećanjem hrapavosti terena. Brzina vetra od 15 km h^{-1} na visini od 30 cm iznad površine zemljišta je kritična za početak erozije zemljišta. Padavine smanjuju eolsku eroziju tako što poboljšavaju koheziju zemljišta i pomažu rasprostiranje biljaka na površini. Eolska erozija se najčešće javlja u slučaju: a) suvog i peskovitog zemljišta sastavljenog od malih čestica, b) ravnog zemljišta bez vegetacije ili nekog drugog pokrivača i c) velikih polja bez ikakvih prepreka (stene, ostaci useva, pokrovni usevi) koje bi delovale kao vetrobran.

Oluje su kombinacije ekstremnih vremenskih prilika kao što su snažan vetar, obilne padavine, grmljavina, munje i grad, a u nekim regionima i tornada, uragani i tajfuni. U zavisnosti od klimatskog područja, efekti oluje mogu biti manje ili više intenzivni; u osetljivim zonama kao što je Centralna Amerika, oluje mogu prouzrokovati ozbiljne probleme za stanovništvo i poljoprivredu, uključujući olujne poplave, plimske talase, jake pljuskove i eroziju zemljišta. Uticaj oluja na useve i oporavak useva zavisi od nekoliko faktora, kao što su vrsta useva, faza rasta, vremenski uslovi odmah posle oluje i prisustvo štetnih organizama. Jaki vetrovi koji se javljaju tokom oluja mogu prouzrokovati poleganje poljoprivrednih useva, a u ekstremnim slučajevima mogu uništiti useve i obarati stabla. Pored toga, obilne padavine tokom oluja mogu izazvati značajnu eroziju zemljišta ili, još gore, mogu pokrenuti klizišta sa značajnim gubicima poljoprivrednog zemljišta i useva. Generalno, oluje uključuju i pogoršavaju negativne efekte vetra i jakih padavina kako na useve, tako i na ljude. Pored toga, štetni efekti oluja mogu se dalje pogoršati ako se topli i vlažni uslovi produže, što mogu dovesti do pojave bolesti. Oluje se često javljaju u tropima. Međutim, zbog klimatskih promena, oluje se sve češće javljaju u umerenim ili kontinentalnim područjima.

Na raspolaganju je nekoliko strategija za zaštitu useva od štetnog uticaja vetra. Najefikasnija se zasniva na korišćenju vetrozaštitnih pojaseva sačinjenih od drveća ili izrađenih od različitih prirodnih i veštačkih materijala. Prirodni vetrozaštitni pojasevi mogu da se sastoje od jednog ili nekoliko redova drveća ili grmlja, u zavisnosti od zahteva useva i klimatskih uslova. Obično se postavljaju oko ivica polja u pravcu normalnom na pravac iz koga duvaju dominantni vetrovi. Vetrozaštitni pojasevi takođe uključuju veštačka rešenja kao što su suvi zidovi, drvene ili plastične ograde, kao i polietilenske mreže postavljene na stubove. Vetrozaštitni pojasevi se mogu organizovati u jednom redu ili u nekoliko paralelnih redova, što zavisi od brzine vetra. U slučaju da dominantni vetrovi dolaze iz različitih pravaca, vetrozaštitni pojasevi se postavljaju u obliku slova L, polukružno ili – u slučaju turbulentnih vetrova – sa mrežastom strukturom koja štiti polje sa svih strana; poslednje rešenje se često koristi u agrošumskim sistemima.

Svrha vetrozaštitnog pojasa je da smanji brzinu vetra i da ga skrene sa pravca u kome duva. Kada vetar koji duva naiđe na vetrozaštitni pojas, jedan deo vazdušne mase prolazi kroz prepreku uz značajno smanjenje brzine, dok se ostatak preusmerava u zonu iznad pojasa (9.11). Ovo značajno utiče na izmenu mikrometeoroloških karakteristika vazduha delimično ispred, a naročito iza pojasa.



Slika 9.11.

Kretanje vetra u prisustvu poljozaštitnog pojasa

Najznačajniji faktori u tom procesu su sledeći:

- izmena karakteristika turbulentnog transporta i brzine vetra koji se približava poljozaštitnom pojasu, što utiče na dinamiku protoka vazduha i veličinu *zaštićene zone*, a posebno na širinu *zone mešanja*;
- visina poljozaštitnog pojasa (H_{wb}), koja se obično definiše u odnosu na prosečnu visinu drveća, predstavlja visinu na kojoj započinje sloj turbulentnog mešanja;
- propustljivost poljozaštitnog pojasa, koja se sa aerodinamičke tačke gledišta definiše kao odnos brzine vetra iza i ispred prepreke; s obzirom da je ovaj odnos vrlo teško eksperimentalno odrediti, često se umesto njega koristi optička propustljivost kao odnos površine otvora na poprečnom preseku pojasa i ukupne površine poprečnog preseka.

Na zavetrinskoj strani, vazduh koji prolazi preko i kroz poljozaštitni pojas stvara zone sa specifičnim mikrometeorološkim karakteristikama (slika 9.11): A) zonu prilaznog toka; B) zonu „pomerenog" profila; C) propusnu zonu; D) zonu tišine; E) zonu mešanja i F) ravnotežnu zonu.

Zona prilaznog toka se obično nalazi na udaljenosti od 5 H_{wb} od poljozaštitnog pojasa na navetrenoj strani, gde se na visinama ispod visine poljozaštitnog pojasa brzina vetra sve više smanjuje i skreće sa prvobitnog pravca kako se približava pojasu.

Propusna zona se nalazi neposredno iza zaštitnog pojasa, na visini manjoj od visine poljozaštitnog pojasa. Brzina vetra u ovoj zoni zavisi od propustljivosti pojasa i znatno je smanjena zbog otpora koji pruža lišće.

Kako se približavaju prepreci, strujnice vetra se zgušnjavaju u zoni neposredno iznad poljozaštitnog pojasa (1,5 H_{wb}), što povećava brzinu vetra. Zajedno s vazduhom iz propusne zone ova struja formira *zonu „pomerenog" profila* neposredno iza prepreke, u kojoj se profil brzine vetra dramatično menja s visinom.

Zapravo, promene profila su male od tla do gornje granice pojasa, ali se na visinama oko visine poljozaštitnog pojasa brzina intenzivno menja s visinom, da bi iznad pojasa profil bio približno logaritamski.

Iza poljozaštitnog pojasa, između površine tla i zone mešanja nalazi se *zona tišine*. U ovoj zoni vetar ima najmanju brzinu, a dužina ove zone niz vetar dostiže udaljenost od 5 do 8 H_{wb} od pojasa. Veličina mirne zone zavisi od propustljivosti pojasa i brzine vetra na navetrenoj strani, dok su profil vetra i turbulencija uglavnom određeni tokom u propusnoj zoni.

Zona mešanja se formira iza zaštitnog pojasa, počinje od vrha pojasa i stiže do tla na udaljenosti od 5 do 8 H_{wb}. Na udaljenostima mnogo većim od 10 H_{wb} zona mešanja prelazi u *ravnotežnu zonu*, u kojoj se ponovo uspostavlja logaritamski profil vetra.

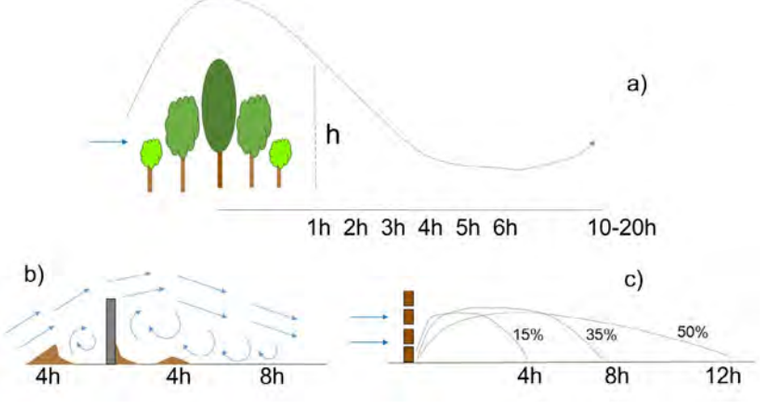
U zaštićenoj zoni iza pojasa, zona tišine se odlikuje najslabijim turbulentnim transportom i najmanje izraženim profilima toplote, vodene pare i ugljen-dioksida. Tokom dana, u zoni tišine mali intenzitet turbulentnog transporta osetne toplote sa zemlje u atmosferu dovodi do viših temperatura vazduha u blizini površine, u odnosu na one u zoni mešanja, recimo. Obrnuto se dešava noću, kada intenzivno površinsko hlađenje i slabo turbulentno mešanje proizvode niže temperature u ovoj zoni. Neki eksperimenti su pokazali da prisustvo vetrozaštitnog pojasa blago smanjuje koncentraciju ugljen-dioksida tokom dana i povećava je tokom noći u zoni tišine, ali bez značajnog uticaja na intenzitet fotosinteze. S obzirom da vetrozaštitni pojas smanjuje brzinu vetra u zaštićenoj zoni, možemo očekivati da evapotranspiracija i gubici vode generalno budu smanjeni i u zemljištu i u biljnom sklopu, naročito u zoni tišine. Ovaj način razmišljanja je podržan eksperimentima u kojima su korišćene velike posude napunjene vodom ili dobro zalivene biljke iza poljozaštitnih pojaseva. Iako smanjena brzina vetra smanjuje intenzitet isparavanja sa zemljišta i evapotranspiraciju biljaka, drugi faktori na koje utiče prisustvo vetrozaštitnog pojasa takođe igraju važnu ulogu. Neki od njih su: a) smanjenje upadnog Sunčevog zračenja zbog senčenja; b) povećanje temperature zemljišta i vazduha u zoni tišine i c) promene stomaternog otpora na koje utiču upadno Sunčevo zračenje, temperatura i vlažnost vazduha; ove promene su različite kod različitih biljaka.

Opisane promene mikrometeoroloških karakteristika vazduha ispred i iza vetrozaštitnog pojasa na različite načine utiču na izmenu uslova u kojima će biti gajene biljke. Na ovom mestu ćemo navesti samo neke od njih:

- smanjenje brzine vetra smanjuje mogućnost eolske erozije;
- porast noćnih temperatura vazduha smanjuje štete od niskih temperatura naročito u rano proleće;

- povećanje količine vode od rose i produžetak perioda u kome se rosa zadržava na površini biljke, ima pozitivan efekat na vodni bilans biljnog sklopa;
- porast temperature zemljišta u prisustvu vetrozaštitnog pojasa obezbeđuje raniju setvu i ranije klijanje useva;
- povećanje relativne vlažnosti vazduha (2-4%) može povoljno delovati na razvoj biljaka u prostoru iza vetrozaštitnog pojasa, mada velika gustina vetrobrana može prouzrokovati povećanu vlažnost listova i zemljišta, a time i povećan rizik od pojave biljnih bolesti i smanjene evapotranspiracije;
- smanjenje intenziteta isparavanja smanjuje verovatnoću pojave suše;
- povećana debljina snežnog pokrivača i njegovo produženo zadržavanje obezbeđuje dodatnu vlagu prolećnim kulturama.

Prirodni vetrobrani mogu imati različite gustine u zavisnosti od rastojanja prilikom sadnje, gustine krošnje i izbora biljnih vrsta. Gustina krošnje od 40 do 60% daje najbolje rezultate, dok gustina iznad 80% stvara previše turbulencije, a gustina manja od 20% nema značajnijih efekta. Pored toga, efikasnost vetrozaštitnog pojasa je povezana sa njegovom debljinom. Kod prirodnih pojaseva deset redova se obično koristi na spoljnim granicama, a jedan do tri reda između svake parcele (slika 9.12).



Slika 9.12.

Uticaj prirodnih (a) i veštačkih (b, c) vetrobrana. Veštački vetrobrani imaju drugačije efekte na pravac i brzinu vetra i turbulencije koje izaziva (Ceccon et al. 2017)

Takođe, potrebno je preduzeti određene mere kako bi prirodni pojas mogao da obezbedi visok stepen zaštite:

- izbor zimzelenih vrsta obezbeđuje zaštitu proizvodnih parcela tokom cele godine (ovaj uslov nije neophodan u umerenim klimatima gde su usevi u mirovanju tokom zimskog perioda);
- korišćenje biljnih vrsta koje poseduju visoku toleranciju prema štetočinama, bolestima i ekstremnim vremenskim uslovima;
- korišćenje vrsta koje razvijaju snažnu krošnju, kao i vrsta koje imaju visoku toleranciju na orezivanje (proizvodnja drveta može predstavljati dodatnu ekonomsku aktivnost);
- izbor vrsta sa jakim centralnim korenom smanjuje konkurenciju sa glavnim usevom;
- izbor vrsta koje povoljno utiču na biodiverzitet (npr., cvetajuće vrste za pčele) je, takođe, od velikog značaja.

U umerenim podnebljima kao što je centralna Evropa, lokalne vrste otporne na zimske uslove koriste se u kombinacijama žbunja i drveća (tabela 9.11). Pored toga, u područjima gde preovladavaju jaki vetrovi, potrebno je zasnovati nekoliko redova vetrobrana.

Gustina veštačkog pojasa se lakše kontroliše nego kada se radi o prirodnim pojasevima. Montažni zaštitni zid, na primer, preusmerava vetar iznad svoje gornje granice i stvara snažno turbulentno strujanje na zavetrenoj strani što smanjuje razmere zaštićenog područja. Plastične mreže su najefikasnije rešenje među veštačkim vetrozaštitnim pojasevima. Mreže smanjuju snagu vetra za 50% što značajno smanjuje njegovu brzinu u zavetrenom području gde se javljaju slabi turbulentni vrtlozi. U isto vreme, ovakvo strujanje obezbeđuje veću zaštićenu zonu iza mreže.

Tabela 9.11.

Drvenaste vrste pogodne za podizanje vetrozaštitnih pojaseva u uslovima Centralne i Jugoistočne Evrope (Sentić, 2019)

Drveće		Žbunje	
Latinski naziv	Narodni naziv	Latinski naziv	Narodni naziv
Acer campestre L.	poljski javor	***Berberis vulgaris*** L.	žutika
Acer platanoides L.	gorski javor	***Caragana arborescens*** Lam.	sibirska karagana
Acer tataricum L.	željša	***Crataegus monogyna*** Jacq.	jednosemeni glog
Carpinus betulus L.	grab	***Cotoneaster dammeri*** Schneid.	kineska duljarica
Celtis australis L.	koprivić	***Juniperus communis*** L.	kleka
Chamaecyparis lawsoniana	Lavsonov čempres	***Rhus typhina*** L.	kiseli ruj
Corylus colurna L.	mečja leska	***Rosa rugosa*** Thunb.	kineska divlja ruža
Cupressus arizonica Greene	arizonski čempres	***Sambucus nigra*** L.	crna zova

Naravno, važno je imati u vidu da vetrozaštitni pojasevi zauzimaju plodno zemljište i loše utiču na rast useva koji se nalaze u njihovoj blizini jer povećavaju senčenje i ulaze u konkurenciju za vodu i hranljive materije u zemljištu sa gajenim biljkama. Ipak, njihovi pozitivni ekonomski efekti prevazilaze negativne, naročito u regionima podložnim sušama i visokim temperaturama. Osim toga, vetrozaštitni pojasevi pozitivno utiču na biodiverzitet i zadržavanje vode u zemljištu što često ne ulazi u kratkročne ekonomske analize. Pošto intenzivna upotreba vetrobrana dovodi do smanjenja poljoprivrednog zemljišta, vetrobrani se u mnogim slučajevima postavljaju na ivice polja ili na neproduktivne trake između parcela.

9.5. Poplave i obilne padavine

Padavine kao meteorološki faktor karakteriše veoma visoka prostorna i vremenska varijabilnost u svim klimatskim uslovima u svetu, što stvara probleme u planiranju i upravljanju poljoprivrednom proizvodnjom. Početkom 21. veka, zbog klimatskih promena, vlažna područja su postala još vlažnija, a suva područja još suvlja. U severnoj Evropi, Severnoj i Južnoj Americi i severnoj Aziji, padavine su povećane. Sa druge strane, u tropskim i subtropskim predelima izvan monsunskog pojasa (Mediteran, južna Afrika i južna Azija) padavine se smanjuju. U mnogim regionima je zabeležen povećan intenzitet padavina. Čak i kada

se radi o područjima gde su godišnje količine padavina smanjene, zabeleženo je povećanje vremenskih epizoda sa obilnim padavinama.

Promene u dinamici padavina su pod uticajem temperaturnih promena na globalnom nivou. Povećanje temperature dovodi do povećanja kapaciteta zadržavanja vode u atmosferi (maksimalni pritisak vodene pare je veći kada je vazduh topliji) i dovodi do pojave obilnijih, ali ređih padavina. Drugim rečima, povećani kapacitet atmosfere za zadržavanje vodene pare povećava šanse za ređu pojavu padavina većeg intenziteta, pošto je atmosferi potrebno više vremena da „popuni svoje kapacitete" vodenom parom.

Povećanje intenziteta padavina predstavlja ozbiljan problem za poljoprivredu. Treba naglasiti da obilne padavine povećavaju stepen oštećenja useva i zemljišta, a naročito eroziju zemljišta. Težina kišnih kapi koje padaju na biljke povećava rizik od fizičkog oštećenja u obliku poleganja, opadanja listova, cvetova i plodova i lomljenje grana. Takva oštećenja su ozbiljnija ako se dese tokom vegetativne faze razvoja biljaka i ako su pogoršana jakim vetrom. Objasnićemo detaljnije samo neka od njih.

- Poleganje biljaka: ako se obilne kiše jave u ranim fazama razvoja biljaka, stabljike biljaka su savitljivije, pa se smanjuju štete od poleganja. Biljke mogu lako da se vrate u normalan položaj. Ipak, poleganje predstavlja ozbiljan problem koji može dramatično smanjiti prinose naročito kada se poleganje biljaka dešava po veoma vlažnom zemljištu u kasnijim fazama razvoja (npr. kod žita u fazi nalivanja zrna) što stvara uslove za pojavu gljivičnih obolenja i otežava kombajniranje.
- Oštećenje vegetativnih delova biljaka: ovo se normalno javlja u ranim fazama rasta biljaka i može smanjiti razvoj biljaka i prinos. Kod drveća, lomljenje vegetativnih delova ugrožava godišnju proizvodnju; kod osetljivih vrsta, to može dovesti do drugog plodonošenja. Intenzivno opadanja listova značajno smanjuje fotosintetsku aktivnost i fiziološke procese.
- Lomljenje grana stabla: oštećenja ove vrste utiču na godišnju proizvodnju i fiziološku aktivnost biljaka, što može povećati njihovu podložnost napadima gljiva. U tom slučaju opet može doći do drugog plodonošenja.
- Opadanje cvetova: kada cvetovi opadnu, razvoj plodova, a time i prinosi su znatno smanjeni.
- Oštećenja plodova: oštećenje pokožice čine plodove voća osetljivijim na štetočine i bolesti. Ekstremni vremenski uslovi mogu dovesti do daljeg opadanja plodova, čime se ugrožava prinos. Čak i ako plodovi sa oštećenom pokožicom uspeju da se zadrže na biljkama, proizvodnja je smanjena jer se smanjuje kvalitet prinosa.

Pored svega navedenog, važno je imati u vidu da obilne padavine izazivaju eroziju i time nanose više štete poljoprivrednom zemljištu nego usevima i zasa-

dima. Erozija uzrokovana vodom utiče na zemljište direktno, kao erozija spiranjem, a indirektno, kao erozija koju uzrokuje stvaranje manjih brazdi i jaruga (slike 9.13 i 9.14).

Slika 9.13.

Efekti vodne erozije na lokalitetu Changwu (NR Kina)

Eroziju rasprskivanjem izazivaju kišne kapi svojim padom na zemljište. Ovaj tip erozije se javlja kada je kinetička energija kišnih kapi dovoljno velika da može da odvoji i pomeri čestice zemljišta. Ipak, iako je erozija rasprskivanjem u stanju da pokrene znatne količine zemljišta, pomeranje zemljišta je ograničeno na samo nekoliko centimetara, tako da se površina zemljište vrlo brzo konsoliduje. To je razlog zbog koga intenzitet i trajanje padavina, pokrivenost zemljišta, njegova tekstura i nagib u velikoj meri utiču na stepen erozije.

Količina padavina koju zemljište ne može da primi sliva se nizbrdo pod dejstvom gravitacije. Do slivanja dolazi iz dva razloga: (i) intenzitet padavina je veći od zemljišnog potencijala za infiltraciju (slivanje viška vode koji ne stiže da se in-

filtrira) i (ii) zemljište je već apsorbovalo svu vodu koju može da zadrži (slivanje viška vode koji zemljište ne može da upije).

Zaštita zemljišta od erozije spiranjem može se postići obradom zemljišta i zasnivanjem biljnog pokrivača. Obično je moguće iskopati nekoliko plićih kanala pod pravim uglom u odnosu na nagib zemljišta (drljačom ili plugom). Na taj način, voda koja teče nizbrdo tokom jakih padavina planirano se sakuplja na nekoliko mesta i time se smanjuje erozioni potencijal. U osetljivim oblastima, međutim, preporučuje se periodično održavanje drenažnih kanala. Redovno uklanjanje nanesenog materijala osigurava funkcionalnost kanala i smanjuje dodatne rizike od poplave. Za procenu godišnje stope erozije zemljišta neophodno je poznavati karakteristike sliva, način korišćenja zemljišta, intenzitet padavina, hidrološke karakteristike sliva, itd.

Slika 9.14.

Različiti tipovi erozija zemljišta nakon velikih padavina: a) podrivanje, b) rasedanje, c) hidrogeološka nestabilnost i d) klizišta

Štetni uticaji obilnih kiša na zemljište uključuju degradaciju strukture zemljišta i zbijanja kao posledicu padanja kišnih kapi. U tom smislu, najosetljivija

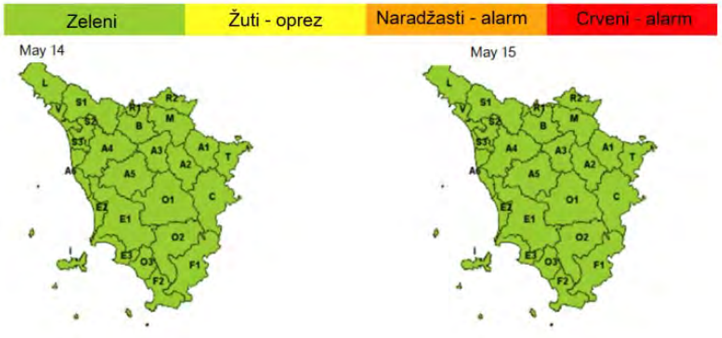
područja su ravna zemljišta, priobalna područja i glinovita zemljišta. Sabijanje zemljišta smanjuje potencijal infiltracije vode koja se nalazi na površini, zajedno sa smanjenjem količine kiseonika. Smanjenje dotoka kiseonika dovodi do nastajanja anaerobnog stanja, koje zauzvrat smanjuje populaciju aerobnih mikroorganizama u zemljištu. U ovakvim okolnostima, plodnost zemljišta je u velikoj meri ugrožena.

9.6. Sistemi ranog upozoravanja u poljoprivredi

Sistem ranog upozorenja se obično definiše kao sistem koji omogućava predviđanje predstojećih ekstremnih događaja. To se postiže tako što se formulišu upozorenja na osnovu naučnih saznanja, praćenja i razmatranja faktora koji utiču na težinu i učestalost prirodnih nepogoda. Cilj sistema ranog upozorenja je da pripremi ljude za rizike koje može izazvati neki događaj. Danas postoje mnogi tipovi sistema upozorenja za industrijske, geofizičke i biološke opasnosti, kao i rizike za lično zdravlje čoveka. Razvijeno je nekoliko sistema upozoravanja na rizike koje može uzrokovati širok spektar prirodnih procesa (WMO, 2010). Sistemi ranog upozoravanja moraju u sebi uključivati četiri prepoznatljiva elementa: znanje o rizicima, sistem nadzora i upozoravanja, sistem prenošenja i širenja obaveštenja i sposobnost reagovanja. Najčešći metod korišćen u okviru sistema ranog upozoravanja je lanac upozorenja, koji počinje sa analizom rizika, a završava se obaveštavanjem korisnika.

Još jedan primer je sistem upozorenja Toskane (Italija), koji građane obaveštava o potencijalnim rizicima vezanim za meteorološke pojave. Pored objava sistem pruža i informacije o mogućim akcijama koje treba preduzeti u kriznim situacijama. Rizici koji su uvršteni u sistem su poplave (vodni rizik), klizišta (hidrogeološki rizik), jake oluje, vetrovi, sneg i led (slika 9.15).

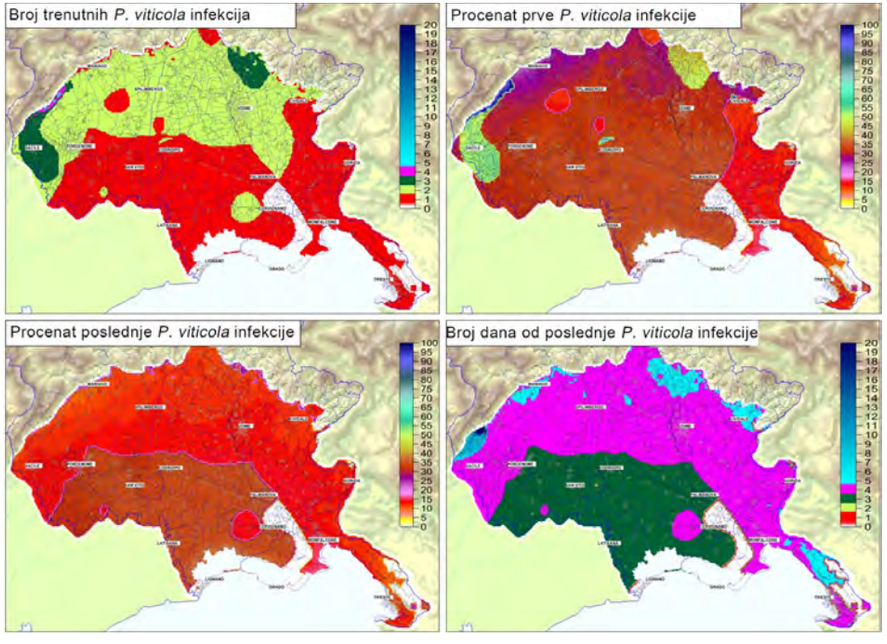
Servisi za upozoravanje su važni za predviđanje parametara rizika. Centralna tačka sistema ranog upozoravanja su modeli koji reprodukuju rizične karakteristike nekog događaja. To mogu biti modeli biofizičkih procesa (kao što je model suše u kome se nedostatak zemljišne vlage može javiti tokom nekoliko meseci) ili procesa reakcije (kao što je dinamika procesa evakuacije stanovništva). U odsustvu podataka, modeli se zasnivaju na izračunavanju verovatnoće događaja na osnovu istorijskih podataka za posmatrano područje. Ukoliko ni ovi podaci ne postoje, onda se verovatnoća događaja određuje po analogiji sa nekim sličnim područjem za koje postoje podaci. Na žalost, ovo može dovesti do izazivanja lažne uzbune.



Vrsta kritičnosti	Nivo upozorenja	Scenario uticaja	Pojedinačna pravila ponašanja
-0- nema kritičnosti	normalno	nijedan	da budete informisani
-1- nizak uticaj	oprez	opisane događaje, čak i intenzivne, teško je pronaći i prognozirati	da budemo svesni
-2- srednji uticaj	upozorenje	rasprostranjene vremenske pojave sa mogućim efektima na stabilnost padina i na vodotoke	biti spreman
-3- visok uticaj	visoko upozorenje	rasprostranjene vremenske pojave posebnog intenziteta i ustrajnosti, sa posledičnim relevantnim uticajem na tlo, kao što su raširena klizišta i poplave glavnih plovnih puteva	spreman da deluje

Slika 9.15.
Sistem upozorenja Lamma – regiona Toskane
[izvor: http://www.lamma.rete.toscana.it/]

Sistemi ranog upozoravanja su široko rasprostranjeni u poljoprivrednom sektoru naročito kada se radi o upozorenjima na ekstremne vremenske prilike (olujne nepogode, grad, sušni period, toplotne talase), ali i očekivanu pojavu biljnih bolesti i štetočina. Interesantan primer predstavlja jednostavan sistem ranog upozorenja koji je razvijen za plamenjaču vinove loze (*Plasmopara viticola*) u oblasti Friuli Venezia Giulia (Italija) i dela teritorije Republike Slovenije. Meteorološke i epidemiološke informacije su generisane na lokalnom nivou i integrisane preko radarskih podataka. Osmotreni meteorološki podaci su korišćeni za kreiranje polja veličine 500×500 m, dok su specifični modeli korišćeni za svaku ćeliju mreže. Izlaz iz sistema su dnevne epidemiološke i meteorološke karte koje se objavljuju na internetu (slika 9.16).



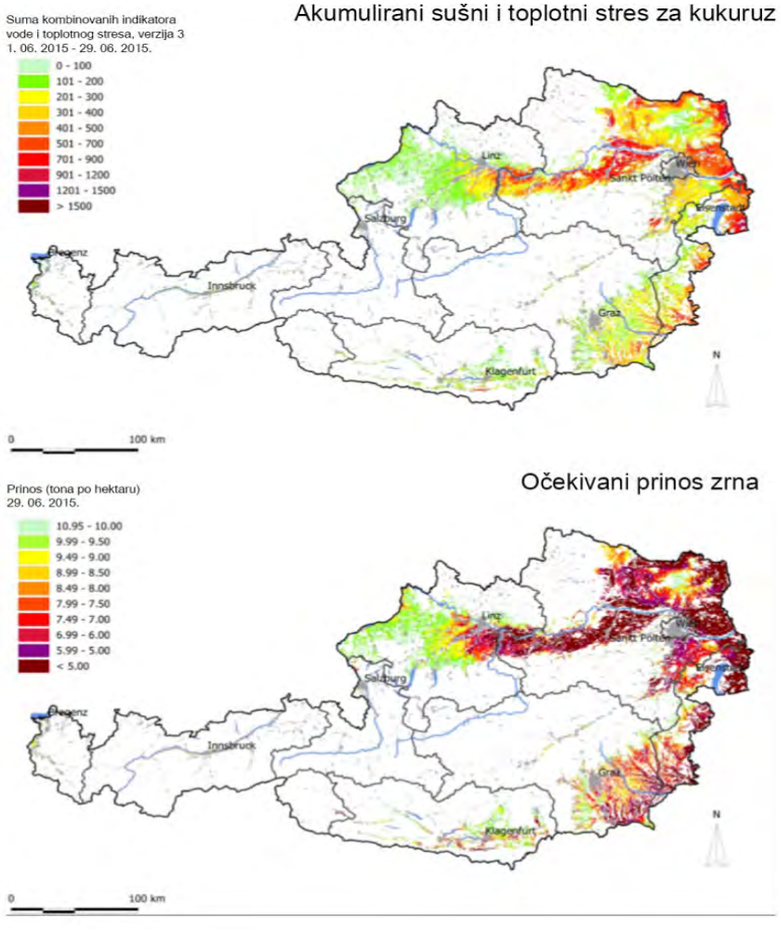
Slika 9.16.

Sistem upozorenja za plamenjaču vinove loze
[izvor: http://www.meteo.fvg.it/agro.php]

Još jedan primer sistema ranog upozorenja je onaj koji je razvijen u Kini za bolesti krastavaca u staklenicima. Podaci su sakupljani kako bi se razvio model predviđanja pojave bolesti. Model uključuje sledećih pet koraka. Prvi je prethodni alarm koji se zasniva na stepenu proširenosti obolenja. U konkretnom slučaju razvijena su dva indeksa: indeks opasnosti i indeks bolesti. Drugi korak se odnosi na analizu indikatora koji upozoravaju na verovatnoću pojave bolesti, kao što su relativna vlažnost vazduha, trajanje vlage na listovima i temperatura vazduha. Treći korak je traženje izvora koji uzrokuju ili povećavaju rizik od bolesti, kao što su prekomeran broj navodnjavanja ili previsoki dnevni opseg temperatura. Nakon pojave bolesti, upozorenja se upućuju putem zvučnog alarma i svetlosnog upozorenja. Svetlosno upozorenje uključuje različite boje od kojih svaka odgovara jednoj od pet klasa intenziteta bolesti. Konačno, korisnici mogu unositi informacije u realnom vremenu, što je korisno za donošenje odluka.

Primer operativnog monitoringa i sistema ranog upozoravanja u poljoprivredi je austrijski Informacioni sistem za rizike u poljoprivredi (ARIS), koji koristi mrežu visoke rezolucije (1×1 km) i izdaje dnevna obaveštenja, kao i

desetodnevne prognoze. ARIS identifikuje potencijalne rizike povezane sa meteorološkim uslovima i događajima u austrijskim poljoprivrednim regionima, koristeći odgovarajuće agroklimatske indikatore koji ukazuju na uticaj suše, visokih i niskih temperatura i snabdevenosti vodom glavnih poljoprivrednih kultura (slika 9.17). Korisnici ovog sistema operativnog praćenja meteorološke situacije su poljoprivrednici, istraživači, savetodavne službe i osiguravajuća društva.



Slika 9.17.

Ukupni sušni i toplotni stres za kukuruz (gore) i očekivani prinos zrna (dole) za Austriju u 2015. godini [izvor operativnog sistema: https://aris.boku.ac.at/home.html]

10. Upravljanje rizicima

U mnogim delovima sveta vremenski i klimatski ekstremi predstavljaju najvažnije rizike koji utiču na proizvodnju, produktivnost i upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom. Ekstremne vremenske prilike kao što su suše, poplave, cikloni, ekstremne temperature i jaki vetrovi znatno otežavaju održivi razvoj poljoprivrede.

Klimatski ekstremi su događaji koji odstupaju od normalnih vrednosti po učestalosti svoje pojave ili trajanju (retko) na nekom lokalitetu. Ne postoji generička definicija ekstremnih vremenskih događaja, jer ekstremi na jednoj lokaciji mogu biti normalni u drugoj. Štaviše, ekstremni vremenski događaji su višedimenzionalni, jer se mogu opisati na osnovu više osobina kao što su brzina pojave (verovatnoća u jedinici vremena), intenzitet pojave, trajanje i vreme pojave, prostorni razmer i multivarijantne zavisnosti. Zato je neophodno dodatno opisati već definisane pojmove. Recimo, toplotni talas je period „neobično" toplog vremena (opisanog na osnovu vrednosti maksimalne, minimalne i srednje dnevne temperature vazduha) u nekom regionu, koje traje najmanje dva uzastopna dana tokom godišnjeg doba koje se smatra toplim na osnovu lokalnih klimatskih uslova. U ova dva dana, vrednosti ekstremnih i srednjih dnevnih temperatura su iznad njihovih klimatoloških vrednosti. Ovaj događaj se posebno može definisati intenzitetom, trajanjem, prostornim razmerom i brzinom pojave (WMO, 2016).

Tokom prethodnih decenija, a kao posledica klimatskih promena, ovi događaji se povećavaju po broju, trajanju i intenzitetu (WMO, 2016). Mnoge strategije prilagođavanja imaju za cilj da procene koje bi promene vremenskih i klimatskih događaja mogle da imaju ekstreman uticaj na ljudsko društvo. Pored ekstremnih vremenskih prilika i opasnosti koje one nose, stepen izloženosti ovim opasnostima i osetljivost na njih uzimaju se u obzir prilikom utvrđivanja rizika. To znači da strategije adaptacije i mere koje se koriste kod upravljanja rizicima zavise od sagledavanja ljudske izloženosti i ranjivosti, kao i od pravilne procene kako se te dimenzije menjaju (Cardona et al., 2012). Da bi se bolje razumeli međusobni

odnosi koji postoje između koncepata opasnosti, ranjivosti, izloženosti i rizika potrebno je bliže objasniti ove pojmove.

10.1. Rizik

Iako u literaturi postoji niz definicija, rizik se često predstavlja kao proizvod verovatnoće nastanka opasnih događaja ili trendova i posledica do kojih dolazi ako se ovi događaji ili trendovi jave. Dakle, rizik je složen koncept i on se u krajnjoj instanci određuje na osnovu interakcije društvenih i ekoloških procesa, kao i kombinacije fizičkih opasnosti i ranjivosti elemenata koji se nalaze na udaru. Iako se u svakodnevnom govoru rizik i opasnost često koriste kao sinonimi, trenutno je široko prihvaćeno da je opasnost jedna od komponenti rizika, a ne sam rizik (Cardona et al., 2012). Tri komponente rizika su: opasnost, izloženost i ranjivost (slika 10.1).

Slika 10.1.

Tri komponente rizika: opasnost, izloženost i ranjivost

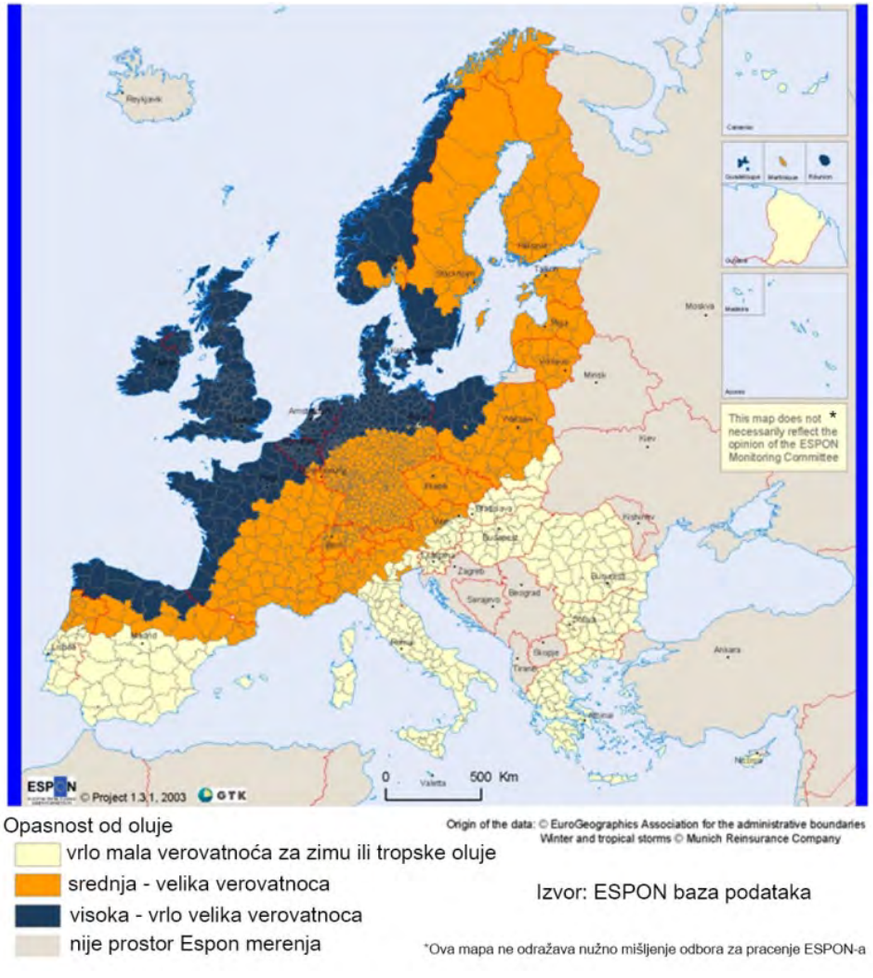
Opasnost. U Četvrtom izveštaju IPCC-ja[24] (2007) opasnost je definisana kao „moguća pojava prirodnog, ili od strane čoveka izazvanog, fizičkog događaja ili trenda koji može dovesti do gubitka života, povrede ili drugog uticaja na zdravlje čoveka, kao i oštećenja ili gubitka imovine, infrastrukture, sredstava za život i resursa". U kontekstu klimatskih promena, pojam opasnosti se obično odnosi na događaje ili trendove vezane za klimu i odstupanje od klimatoloških srednjih vrednosti na nekom području. Kao opasne vremenske i klimatske pojave pre sve-

[24] Međunarodni panel o klimatskim promenama. Telo ustanovljeno od strane UN u cilju praćenja klimatskih promena, njihovih uzroka i efekata, kao i izrade globalne strategije ublažavanja i adaptacije na klimatske promene.

ga se razmatraju ekstremne vremenske prilike kao što su suša, olujne nepogode praćene gradom, poplave, mraz, toplotni talasi i tornado (slika 10.2). Ovakvi događaji zavise od prirodnih faktora i karakterišu ih relativno dobro poznati zakoni verovatnoće.

Izloženost i ranjivost. Izloženost i ranjivost se često, ali pogrešno, koriste kao sinonimi. Izloženost se može definisati kao „prisustvo ljudi, sredstava za život, infrastrukture, ekonomskih, socijalnih ili kulturnih dobara na mestima koja bi mogla biti pogođena štetom", dok je ranjivost „sklonost ili predispozicija da se bude izložen negativnom uticaju" (Cardona et al., 2012). Znači, izloženost je više povezana sa fizičkim karakteristikama, kao što je lokacija, dok ranjivost može biti (bio)fizička i socio-ekonomska i ona je povezana ne samo sa osetljivošću i slabošću sistema, već i sa nedostatkom sposobnosti da se ublažavaju negativni uticaji.

Na osnovu ovih definicija, zaključujemo da je moguće biti izložen, ali ne i ranjiv, međutim, da bi bili ranjivi u odnosu na neki opasan događaj neophodno je biti izložen. Na primer, ako živite u plavnoj ravnici, to znači da ste izloženi ekstremnim događajima vezanim za padavine, ali to nužno ne znači da ste ranjivi ukoliko se primjenjuju efikasne mere za smanjenje potencijalnih gubitaka. Sa druge strane, ako niste izloženi, rizik ne postoji, tako da biti ranjiv podrazumeva da ste izloženi. Recimo još i ovo. Japan je jedna od država koja je veoma izložena opasnosti od zemljotresa praćenog cunamijem. Međutim, od svih izloženih zemalja Japan je najmanje ranjiv jer je razvio tehnologiju za praćenje, prognozu i ublažavanje efekata od cunamija i ima stanovnike koji su o tome dobro obavešteni i aktivni su deo celokupnog sistema.



Slika 10.2.

Evropska područja u kojima preti opasnost od oluje
[izvor: European Spatial Planning Observation Network, ESPON, https://www.preventionweb.net/english/professional/maps/v.php?id=3833]

Na kraju, ranjivost je takođe u funkciji osetljivosti sistema, što podrazumeva stepen do koga na određeni sistem utiču, negativno ili pozitivno, faktori vezani za klimu. Uticaj može biti direktan (npr., promena prinosa useva kao odgovor na promenu srednje vrednosti, ekstremnih vrednosti ili varijabilnosti temperature)

ili indirektan (npr., štete prouzrokovane povećanom učestalošću plavljenja priobalja zbog porasta nivoa mora) (Cardona et al., 2012).

10.2. Procena i upravljanje rizikom

Procena rizika odnosi se na kvalitativni ili kvantitativni pristup utvrđivanju prirode i obima rizika analizom potencijalnih opasnosti i procenom postojećih uslova izloženosti i ranjivosti koji, delujući zajedno, mogu naneti štetu ljudima, imovini, sredstvima za život i njihovom okruženju. Da bi se procenio rizik, prvi korak je identifikovanje opasnosti i njihovih glavnih karakteristika (verovatnoća pojave, intenzitet, itd.); nakon toga je potrebno analizirati izloženost i ranjivost. Na kraju treba proceniti efikasnost kapaciteta potrebnih za uspešno suprotstavljanje identifikovanim scenarijima rizika.

Termin „upravljanje rizicima" podrazumeva razvoj i primenu strategija za smanjenje i prevenciju rizika, što doprinosi povećanju otpornosti i smanjenju gubitaka. Da bi se smanjio uticaj varijabilnosti meteoroloških uslova (uključujući ekstremne vremenske prilike) na poljoprivrednu proizvodnju, moguće je koristiti strukturne i nestrukturne mere. Strukturne mere obuhvataju navodnjavanje, prikupljanje vode, vetrobrane, zaštitu od mraza, veštačke i kontrolisane prostore (staklene bašte). Nestrukturne mere uključuju korišćenje kratkoročnih agrometeoroloških prognoza, poboljšanu primenu mesečnih i sezonskih prognoza vremena i osiguravanje proizvodnje.

Uticaj klimatskih promena na poljoprivredne sisteme naročito je zabrinjavajući u pogledu rizika vezanih za pad proizvodnje, koji se očekuje za skoro sve useve, i ekonomske i socijalne posledice toga pada. U tom kontekstu naučna zajednica je razvila dva različita pristupa problemu suočavanja sa rizicima vezanim za klimatske promene. Ovi pristupi se razlikuju kako u pogledu vremenskog okvira tako i u pogledu ciljeva, a nazivaju se *adaptacija* i *ublažavanje* (mitigacija).

10.3. Adaptacija i ublažavanje

Svrha mera adaptacije[25] u poljoprivredi je unapređenje upravljanja potencijalnim rizicima koji su povezani sa klimatskim promenama u narednim decenijama. Brojne naučne studije su posvećene iznalaženju optimalnih strategija i mera adaptacije u različitim granama poljoprivredne proizvodnje. Izbor strategije zavisi od vremenskih i prostornih razmera na kojima mere treba da budu primenjene kao i od ekonomskih i socijalnih kapaciteta sredine. Kratkoročne i dugoročne mere adaptacije mogu se razviti na nivou gazdinstva, regionalnom ili

[25] Adaptacija je prilagođavanje organizma okolini.

nacionalnom nivou. Neke od strategija adaptacije ratarske proizvodnje na klimatske promene opisane su u nastavku ovog poglavlja.

Kratkoročne mere adaptacije pokrivaju različite aspekte. Na primer, pomeranje datuma setve i upotreba različitih sorti dozvoljava da se prolećnim kulturama produži period rasta ili da se podesi dinamika rasta, tako da se najosetljivije faze razvoja odvijaju tokom perioda u kojima postoji manji rizik od vodnog ili temperaturnog stresa. Takođe je važna i različita dubina setve, koja pomaže da se obezbedi bolje klijanje semena. Još jedan primer je primena mera za očuvanje vlažnosti zemljišta. Ove mere se mogu kombinovati sa uobičajenim agronomskim merama kao što su obrada zemljišta i navodnjavanje. Na taj način se pravilnom obradom zemljišta, zaoravanjem žetvenih ostataka, čuvaju biljni ostaci iz prethodne godine kako bi se povećao sadržaj organske materije u zemljištu i kako bi zemljište zaštitili od erozije i sušenja, dok se navodnjavanjem omogućava pravilno upravljanje i korišćenje vode zasnovano na stvarnim potrebama useva.

Dugoročne strategije adaptacije koje obezbeđuju strukturne promene u celokupnom proizvodnom sistemu odnose se na promene u sistemu korišćenja zemljišta, uvođenja otpornih hibrida i sorti, i razvoj i korišćenje svrsishodnijih agrotehničkih mera. Najefikasnija upotreba zemljišta osigurava se rotacijama između useva sa varijabilnim proizvodnim rezultatima na višegodišnjem nivou (npr., pšenica) i kultura sa stabilnijim prinosima. Pored toga, genetska poboljšanja nude širok izbor faktora otpornosti na biljne bolesti i stres, dok zamena useva pomaže u održavanju visokih prinosa tako što se koriste kulture koje mogu bolje očuvati vlagu u zemljištu (npr., zamena kukuruza šećernom trskom, koja je otpornija na visoke temperature). Na kraju, nove agrotehničke mere kao što su precizna poljoprivreda, minimalna obrada i malčovanje, međuusevi, rotiranje useva i korišćenje inovativnih strategija, upravljanje navodnjavanjem i praćenje stanja vlažnosti zemljišta mogu se smatrati dugoročnim strategijama adaptacije koje su sposobne da poboljšaju efikasnost korišćenja vode (slika 10.3).

Slika 10.3.

Sistem gajenja više kultura kao oblik adaptacije

Strategije ublažavanja efekata klimatskih promena u fokusu imaju uzroke klimatskih promena. Kada je u pitanju poljoprivreda, jedan od najvažnijih ciljeva svih strategija ublažavanje jeste da smanje ili stabilizuju emisiju gasova staklene bašte, koji potiču od poljoprivrednih aktivnosti. Globalno, poljoprivreda doprinosi sa 10% globalnoj emisiji gasova staklene bašte u atmosferu. U ovom iznosu ugljen-dioksid (CO_2) učestvuje sa 50%, metan (CH_4) sa 27,5%, a azot-suboksid (N_2O) sa 22.5% (FAOSTAT, 2016). Emisija N_2O potiče od procesa nitrifikacije i denitrifikacije koji se u najvećoj meri javljaju posle upotrebe mineralnog đubriva i stajnjaka. Metan se stvara i emituje gajenjem pirinča i ishranom preživara u procesu varenja.

Podaci iz baza podataka EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) i FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database) pokazuju da je najveći izvor emisije štetnih gasova stočarstvo (fermentacija), dok se u bazi Američke agencije za zaštitu životne sredine (United States Environmental Protection Agency) kao glavni izvor emisije gasova

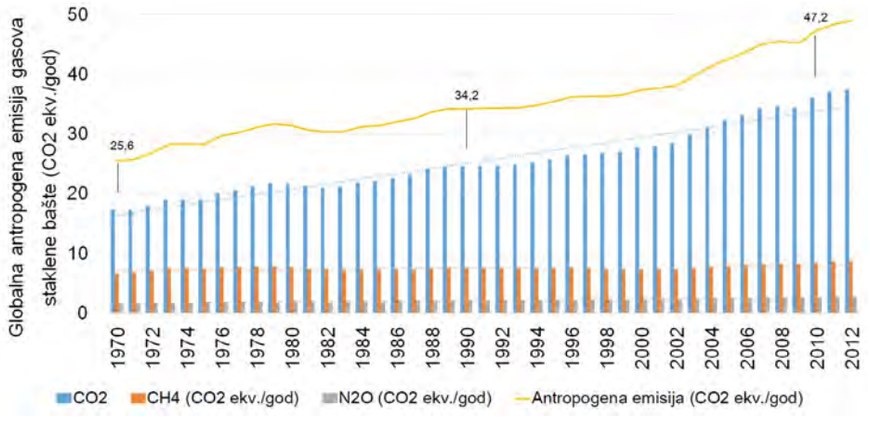
staklene bašte navodi zemljište. Zaključak koji se izvodi iz sve tri baze je da fermentacija i emisija iz zemljišta zajedno čine 70% ukupne emisije gasova staklene bašte, dok 9–11% dolazi iz proizvodnje pirinča, 6–12% od sagorevanja biomase i 7–8% od upotrebe organskog i neorganskog đubriva. Globalna emisija iz đubrenja porasla je u periodu od 1961. do 2010. godine sa 0,57 na 0.99 Gt CO_2ek[26]/god. Sve emisije su u proseku porasle za 1,1% godišnje. Emisija gasova staklene bašte iz sintetičkih đubriva povećala se u proseku za 3,9% godišnje, u periodu od 1961. do 2010. godine, što u apsulutnim vrednostima iznosi povećanje od 9 puta, odnosno, od 0,07 do 0,68 Gt CO_2ek/god. (slika 10.4).

Strategije ublažavanja se razlikuju od strategija adaptacije jer deluju dugoročno, a njihova efikasnost uglavnom zavisi od nivoa koordinacije na nacionalnom ili globalnom nivou. Trenutno, naučna zajednica prepoznaje tri glavna načina za smanjenje i stabilizaciju emisije i koncentracije gasova staklene bašte: smanjenje emisije, povećano uklanjanje i sprečavanje emisije.

Smanjenje emisije se uglavnom postiže povećavanjem efikasnosti upravljanja glavnim tokovima gasova (u obliku CO_2, CH_4 i N_2O) iz ciklusa ugljenika i azota poreklom iz poljoprivrednih sistema. Uspeh se obezbeđuje direktnim delovanjem na faktore koje najviše utiču na razmenu gasova u sistemu biljka-atmosfera, kao što su kontrola đubrenja (glavni izvor metana) i smanjenje đubrenja azotom (glavni izvor N_2O). Ovaj aspekt može dodatno da se poboljša tako što se, pored količine đubriva, vodi računa i o tipu i metodu njegove distribucije.

Povećanje uklanjanja gasova je povezano sa efikasnijim upravljanjem zemljištem koje je, odmah posle okeana, najvažnije skladište atmosferskog ugljenika. Zbog toga, sve aktivnosti koje su usmerene ka povećanju fotosinteze ili usporavanju procesa povratka ugljenika organskog porekla (npr., preko respiratornih procesa, požara ili erozije zemljišta) doprinose uspešnijem skladištenju ugljenika.

[26] CO_2ek - Ekvivalent ugljen-dioksida predstavlja jedinicu zasnovanu na potencijalu globalnog zagrijavanja (PGZ) različitih gasova staklene bašte. Jedinica CO_2ek meri uticaj jedne tone gasova staklene bašte na životnu sredinu u odnosu na uticaj jedne tone CO_2.



Slika 10.4.

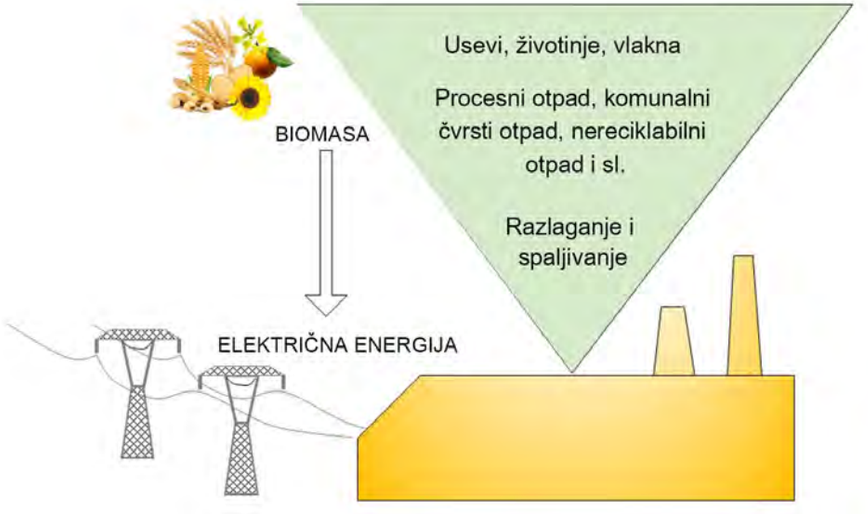
Ukupna godišnja antropogena emisija osnovnih gasova staklene bašte (GtCO2 ekv./god) prikazana za različite grupe gasova i za period 1970–2012. u EDGAR bazi (https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=temp_profile). Podaci uključuju CO2 poreklom od sagorevanja fosilnih goriva i industrijskih procesa, iz šumarstva i drugih načina upotrebe zemljišta, metan (CH4), i azot-suboksid (N2O) (Crippa et al., 2020).

Aktivnosti koje imaju za cilj sprečavanje emisije gasova fokusirane su na proizvodnju energije i moguću zamenu postojećih oblika energije alternativnim oblicima kao što je bioenergija, koja zatvara ciklus prirodnog ugljenika. Činjenica je da je poljoprivredne ostatke moguće koristiti kao izvor energije (slika 10.5). Ostaci se mogu koristiti direktno (npr., kao ogrevni materijal) ili indirektno, na primer kroz preradu i pretvaranje u gorivo kao što je etanol ili dizel. Glavna prednost ove aktivnosti je vezana za činjenicu da CO_2, koji se oslobađa sagorevanjem biljnih ostataka, ne menja zalihe ugljenika prisutne u zemljištu i ne dodaje ugljenik u atmosferu, kao što je to slučaj sa fosilnim gorivima (ugalj, gas, motorna goriva).

Da bi se smanjila proizvodnja gasova staklene bašte u oblasti poljoprivrede, neophodno je zaustaviti ili bar ograničiti praksu kao što je neselektivna seča šuma na velikim površinama pod vegetacijom (posebno prašumama) i uklanjanje druge ne-poljoprivredne vegetacije. Smanjenje ovih aktivnosti može značajno povećati sekvestraciju ugljenika i njegovo skladištenje u drvetu na duži vremenski period, čime se izbegava dalja emisija ugljenika u obliku CO_2 i drugih gasova staklene bašte u atmosferu.

Iako su smanjenje i sprečavanje emisije, i povećanje uklanjanja GHG osnovni elementi svake strategije za ublažavnje efekata klimatskih promena, njihovo sprovođenje zahteva čitavu seriju specifičnih akcija. Neke od njih su:

- oporavak organskih i degradiranih zemljišta, koji obezbeđuje povećanje njihove plodnosti sa pozitivnim posledicama u smislu skladištenja ugljenika;
- bolje upravljanje poljoprivrednim kulturama, livadama i pašnjacima (hranjive materije, tehnike setve, korišćenje biljnih ostataka, navodnjavanje);
- unapređena selekcija i proizvodnja pirinča (glavni izvori CH_4 i N_2O za atmosferu);
- štednja energije kroz izgradnju zgrada sa većom energetskom efikasnošću i poklanjaje više pažnje problemima životne sredine.



Slika 10.5.

Poljoprivredni ostaci i biomasa mogu se koristiti za proizvodnju energije (prilagođeno sa https://followgreenliving.com/).

11. Agrometeorološki modeli

Tokom poslednjih decenija 20. veka agrometeorološki modeli su započeli novo poglavlje savremene poljoprivrede. Nastali na temeljima vekovne želje čoveka da predvidi ponašanje živih bića, agrometeorološki modeli su rezultat rada brojnih timova biologa, agronoma različitih specijalnosti, meteorologa i programera. U razvijenim zemljama ovi modeli su postali nezamenjivi izvor informacija u naučnim ustanovama, savetodavnim službama, poljoprivrednim stručnim službama i svim drugim mestima na kojima se donose odluke vezane za proizvodnju i zaštitu bilja.

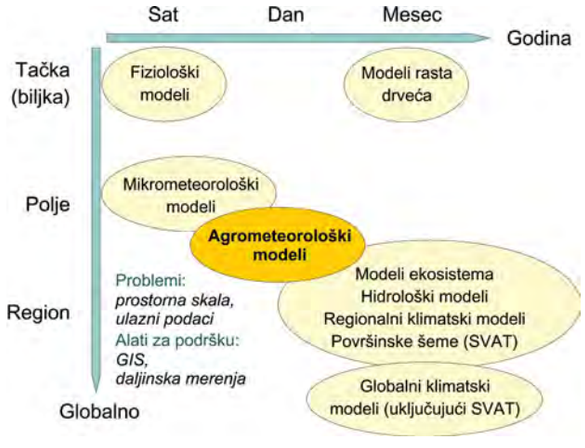
11.1. Pristupi modeliranju

Tokom proteklih decenija razvijeni su brojni modeli za potrebe istraživanja i donošenja odluka u poljoprivredi. Modeli imaju zadatak da simuliraju najznačajnije procese kojima se opisuje funkcionisanje posmatranog sistema. Prilikom simulacija mogu da se koriste kako jednostavni tako i veoma složeni pristupi, uzimajući u obzir samo delove sistema i njegove karakteristike (kao što su temperatura zemljišta ili bilans vlage u zemljištu) ili složenije sisteme kao što je biljka ili ceo biljni sklop i njihove karakteristike (morfološke, fiziološke, fizičke itd). Potonji pristup podrazumeva uzimanje u razmatranje svih relevantnih interakcija u okviru sistema zemljište - biljka – atmosfera i procesa koji utiču na rast i razvoj biljke. Nadalje, ti se pristupi mogu ograničiti na fizičke procese, bio-fizičke interakcije ili mogu proširiti svoj domen razmatranja na interakcije sa čovekom, npr., povezujući biofizičke sa socio-ekonomskim modelima (od modela gazdinstva u poljoprivredi do modela promene načina korišćenja zemljišta na globalnom nivou). U poljoprivredi, modeli mogu da simuliraju rast i razvoj jednog useva ili funkcionisanje celokupnog gazdinstva; mogu upozoravati na ostvarivanje uslova za pojavu štetnih organizama; obezbeđivati korisne informacije za planiranje navodnjavanja ili primenu srodnih tehnologija na gazdinstvu.

Za istraživačke svrhe, modeli se koriste za simulaciju i analizu složenih interakcija u okviru sistema zemljište-biljka-atmosfera (SVAT modeli), kao i za prognozu dinamike vegetacije i prinosa nekih ratarskih kultura - modeli biljne proizvodnje (engl. crop model). Prilikom upotrebe modela važno je biti svestan njihovih manjkavosti i ograničenja koja proizilaze iz složenosti sistema koji se modelira i procesa koji opisuju interakcije unutar modela, pojednostavljenog prikazivanja realnosti i primenjene tehnologije gajenja.

Nivo kompleksnosti i detalji koji će biti uključeni u bilo koji matematički opis rasta i razvoja biljaka zavisi, u prvom redu, od svrhe za koju se model razvija. Recimo da je, za potrebe globalnog ekonomskog modela, potrebno predvideti prinos žitarica u nekoj državi ili regionu, tokom godine. U tom slučaju, bilo bi dovoljno obezbediti podatke o prinosu žitarica tokom prethodnih godina, klimatske karakteristike područja i informacije o agrarnoj politici, pa da ulazni podaci u modelu budu zaokruženi. Korišćenjem ovakvih ulaznih podataka jedan, u osnovi statistički, model biljne proizvodnje može da pruži željene informacije o prinosu u posmatranoj godini. Međutim, ako je cilj modela da predvidi prinos i komponente prinosa neke biljne vrste na izabranom području tada je neophodno razviti dinamički model koji simulira procese koji su od značaja za rast i razvoj biljaka uzimajući u obzir i uticaj meteoroloških uslova i primenjenih agrotehničkih mera na ove procese. Ipak, ne traba izgubiti iz vida činjenicu da kompleksnost modela ne može neograničeno da se povećava. Optimalan odnos između obima ulaznih podataka, složenosti modela posmatranih procesa i zahtevanih izlaznih podataka cilj je svakog modelara. Takođe, veoma je bitno da funkcionalni i konceptualni dizajn modela podržavaju laku izmenjivost pojedinih rutina kako bi tretman pojedinih procesa u modelu mogao da se promeni a da se, pri tom, ne menja struktura celokupnog modela.

Na slici 11.1 prikazane su prostorne i vremenske razmere na kojima se primenjuju različiti modeli ekosistema. U zavisnosti od svrhe za koju se koriste, modeli mogu zahtevati visoke prostorne i vremenske rezolucije simuliranih procesa (kao što je slučaj sa fiziološkim modelima biljaka) ili, naročito kada se primenjuju na velikim razmerama, niske prostorne i vremenske rezolucije (kao što su modeli globalne klime ili interakcije u sistemu zemljište-vegetacija-atmosfera. Opšti problem, naročito kada se radi o primeni na velikim prostornim razmerama, je dostupnost ulaznih podataka. Zbog toga je model uvek kompromis između dostupnih ulaznih podataka i zahteva koji moraju biti u skladu sa procesima koje model opisuje.



Slika 11.1.

Prostorne i vremenske razmere različitih modela

11.2. Tipovi modela

Funkcionalna klasifikacija modela prepoznaje dva glavna tipa modela: stohastičke –koji su deskriptivno orijentisani (empirijski, statistički) i determinističke – koji su mehanicistički orijentisani (dinamički, procesni). Ovi modeli su razvijeni za različite svrhe, a tek njihova zajednička primena može da obezbedi potpuniju sliku biološkog ili biofizičkog događaja.

Stohastički modeli su razvijeni sa ciljem da identifikuju „obrasce ponašanja" unutar posmatrane populacije ili dugačkih vremenskih serija kojima se opisuje ponašanje nekog sistema i da ponude kratkoročno predviđanje ponašanja sistema. Zadatak determinističkih sistema, sa druge strane, je da objasne uočene „obrasce ponašanja" i da ponude matematičku interpretaciju fizičkih, hemijskih i bioloških procesa koji su odgovorni za uočeno ponašanje sistema.

Stohastički modeli koji se koriste u poljoprivredi su, u osnovi, statistički modeli koji na osnovu velike količine podataka i dugih vremenskih serija koje opisuju promene posmatrane veličine (intenzitet evapotranspiracije, masa zrna, prinos), treba da obezbede relacije između te veličine i promenljivih koje utiču na vrednosti posmatrane veličine. Jedan primer su modeli za prognozu prinosa i dinamike vegetacije nekih ratarskih kultura. Ovi modeli se oslanjaju na podatke o izmerenom prinosu na posmatranoj lokaciji i zabeleženim datumima početka fenoloških faza, kao i izmerenim vrednostima meteoroloških podataka, jer se

pretpostavlja da meteorološki uslovi najviše utiču na prinos i dinamiku vegetacije. U slučaju kada dobijeni stepen korelacije nije zadovoljavajući uvode se parametri koji uključuju, recimo, primenjene agrotehničke mere. Izlazi iz ovakvog stohastičkog modela (izračunat očekivani prinos, recimo) su rezultat utvrđenih korelacija između osmotrenih meteoroloških podataka i prinosa ili datuma nastupanja fenoloških faza.

Regresiona analiza je jedna od najčešće korišćenih statističkih tehnika da se neki matematički model ili funkcija koja opisuje posmatranu pojavu ili proces uskladi sa eksperimentalnim podacima. Iz tog razloga je od početka 20. veka korišćena kao najjednostavnija tehnika modeliranja. U cilju prognoziranja prinosa, ovu tehniku je prvi put upotrebio Ser Ronald Fišer 1924. godine kada je na osnovu podataka prikupljenih na Eksperimentalnoj stanici Rothamsted (Engleska) pokušao da utvrdi uticaj padavina na prinos. Različite tehnike regresione analize mogu da se upotrebe u zavisnosti od toga da li se radi o linearnim ili nelinearnim modelima. Prvi koraci u korišćenju regresione analize su se svodili na podešavanje linearne funkcije na osnovu serija eksperimentalnih podataka što je bio relativno jednostavan zadatak. Međutim, podešavanje nelinearne funkcije je mnogo komplikovanije i obično podrazumeva korišćenje iterativnih metoda za određivanje parametara funkcije.

Za potrebe analize i prognoze u agronomiji, regresiona analiza može da obezbedi jednostavan opis rasta i razvoja biljaka. U agronomskoj nauci, četiri glavna aspekta ponašanja useva mogu da budu modelirana korišćenjem regresionih metoda: i) celokupna produkcija suve materije ili samo delovi ovog ciklusa; ii) komponente prinosa kao što je npr. broj zrna; iii) fenološki razvoj useva; iv) korišćenje raspoloživih resursa i reakcija useva. Jednačina koja je rezultat primene regreresione analize je u potpunosti empirijska i njeni parametri nemaju nikakvo fiziološko značenje. Primera radi, jednačina za izračunavanje prinosa može biti oblika:

$$Y = a + \sum_{i=1}^{n} b_i\, x_i + \sum_{k=1}^{m} c_k T_k + e\,, \qquad (11.1)$$

gde je Y očekivani prinos, a, b i c su regresioni parametri, x_i je klimatološka promenljiva, n je broj klimatoloških promenljivih, T_k je tehnološka promenljiva, m je broj tehnoloških promenljivih i e je očekivana greška. Kao klimatološke promenljive obično se uzimaju temperatura vazduha i padavine, dok tehnološke promenljive mogu biti iznos navodnjavanja i đubrenja, recimo.

Prednost stohastičkih modela je što su manje zahtevni u pogledu računskog vremena od determinističkih i ne iziskuju potragu za dodatnim parametrizacijama kada odvijanje nekog procesa nije u potpunosti opisano. Glavni nedostatak ovih modela je što se statističke relacije na kojima se modeli baziraju mogu pri-

meniti samo na lokaciji sa koje su podaci korišćeni za izradu modela. Drugim rečima nije moguće koristiti ih za izračunavanje prinosa drugih biljnih vrsta na istoji lokaciji ili za istu kulturu na drugoj lokaciji gde vladaju drugačiji agroekološki uslovi. Kvalitet ovih modela zavisi od količine, kvaliteta i relevantnosti raspoloživih podataka i opisuju isključivo događaje i procese koji su obuhvaćeni ovim podacima.

Deterministički modeli su procesno orijentisani modeli bazirani na sistemima diferencijalnih jednačina kojima se izračunavaju vremenske promene veličina od značaja za rast i razvoj biljke (npr. intenzitet fotosinteze, produkcija biomase). Međutim, ovi modeli uvek sadrže i empirijske delove koji se odnose na procese koji nisu dobro poznati ili su isuviše složeni da bi se simulirali na procesnom nivou (kao što je fenologija useva). Deterministički modeli useva primenjuju se u istraživanju već više od 50 godina. Danas se u poljoprivrednoj praksi ovi modeli biljne proizvodnje najviše koriste za prognozu prinosa ratarskih kultura. U poglavljima 11.3–11.6 će biti više reči o njihovoj strukturi i primeni u prognozi, recimo, dinamike vegetacije i prinosa pojedinih ratarskih kultura.

11.3. Karakteristike modela biljne proizvodnje

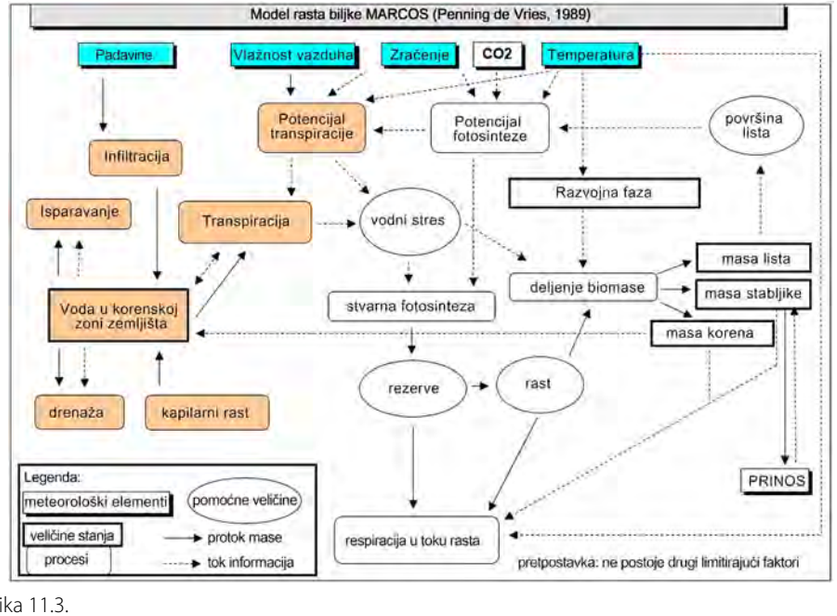
11.3.1. Struktura modela

Model biljne proizvodnje je kompjuterski program čiji je zadatak da simulira procese koji određuju rast i razvoj biljaka a koji su uslovljeni, pre svega, interakcijom genotip–spoljašnja sredina, kao i primenjenim agrotehničkim merama. Otuda je, za funkcionisanje modela, neophodno obezbediti vrednosti najznačajnijih parametara i veličina koji utiču na karakter ove interakcije, a koji se obično nazivaju *ulazni podaci*. Nakon „prolaska“ kroz model ulazni podaci su pretvoreni u *izlazne podatke* u vidu različitih informacija o datumu nastupanja fenoloških faza, prinosu i komponentama prinosa (slika 11.2).

Slika 11.2.

Funkcionalne komponente modela biljne proizvodnje

Pojednostavljena šema procesa koji su uključeni u modele biljne proizvodnje prikazana je na slici 11.3. Ovo je šema osnovnih procesa koji su prisutni u svim modelima biljne proizvodnje. Modeli se uglavnom razlikuju u pogledu parametrizacije pojedinih procesa koja zavisi od vrste useva i predviđene primene. Mnogi od simuliranih procesa prikazanih na slici 11.3, koji opisuju uticaj meteoroloških elemenata na biološke procese, već su spominjani u prethodnim poglavljima (kao što je uticaj temperature i sunčevog zračenja na intenzitet fotosinteze, metode proračuna vodnog bilansa u zemljištu, itd.).



Slika 11.3.

Generička šema simulacije rasta useva u dinamičkim modelima rasta useva prema MACROS pristupu (prilagođena iz Pening de Vrisa, 1989)

11.3.2. Ulazni podaci

Ulazni podaci u modelima biljne proizvodnje uključuju: dnevne vrednosti meteoroloških elemenata, početno stanje i karakteristike zemljišta, karakteristike biljke i planirane agrotehničke mere.

Meteorološki elementi koji se uobičajeno koriste u modelima biljne proizvodnje su temperatura i vlažnost vazduha, intenzitet sunčevog zračenja, brzina vetra i količina padavina. U slučaju da model uključuje i direktno izračunavanja intenziteta fotosinteze neophodno je poznavati stvarnu koncentraciju ugljen-di-

oksida u atmosferi. Naravno, u mnogim modelima se pretpostavlja da je intenzitet fotosinteze konstantan tokom perioda za koji se proračun obavlja ili da se postepeno povećava na poznat način.

Karakteristike zemljišta koje se smatraju konstantim su fizičko-hemijske karakteristike zemljišta za izabrane slojeve (koji dosežu do dubine nešto veće od maksimalne dubine korena), a posebno kapacitet zadržavanja vode dostupne biljkama, maksimalni sadržaj vlage u zemljištu i konstanta mineralizacije. Veličine koje se koriste za opisivanje početnog stanja zemljišta su pre svega sadržaj vlage, kao i organskog i neorganskog azota.

Karakteristike biljke koje je potrebno poznavati pre početka simulacija i koje se smatraju konstantnim se odnose na vrstu useva i/ili specifične sortne karakteristike kao što su, recimo: sume temperatura potrebne za odvijanje pojedinih fenoloških faza, maksimalna veličina i broj listova, koeficijent apsorpcije fotosintetski aktivnog zračenja (FAZ) i intenzitet vernalizacije.

Kada su u pitanju agrotehničke mere svi modeli uključuju: datum setve, režim đubrenja i navodnjavanja (vremenski raspored i primenjene količine).

11.3.3. Simulacioni deo modela

Centralna komponenta modela biljne proizvodnje sastoji se od niza kompjuterskih programa čiji je zadatak da simuliraju najznačajnije procese koji se odigravaju u biljci i njenom okruženju, a koji odlučujuće utiču na tempo razvoja i prinos. Procesi koji opisuju interakciju atmosfera–zemljište–biljni sklop su kvantifikovani izračunavanjem komponenata vodnog bilansa, intenziteta potencijalne evapotranspiracije i isparavanja sa površine zemljišta, kao i transporta materije u zemljištu. Intenzitet produkcije biomase se obično izračunava na osnovu intenziteta usvojenog fotosintetski aktivnog zračenja. Imajući u vidu značaj i složenost transporta i usvajanja azota, kao i realizacije pojedinih fenoloških faza, u modelima biljne proizvodnje se razvijaju posebni podprogrami za simulaciju ovih procesa.

U okviru fenološkog modula modela tipično se izračunavaju datumi nastupanja sledećih fenoloških faza: nicanje, formiranje listova, cvetanje, početak i kraj nalivanja zrna i puno zrenje. Trajanje perioda od setve do nicanja se izračunava na osnovu akumulacije suma aktivnih temperatura vazduha iznad 0 ˚C. Za većinu sorti ova suma iznosti oko 150˚C, ali se u okviru ulaznih podataka („karakteristike sorte") može zadati i drugačija vrednost. Naravno, bilo bi logično da je ovo izračunavanje povezano sa temperaturom površinskog sloja zemljišta, ali s obzirom da je do tih podataka teško doći, u okviru modela se obavlja odgovarajuća kalibracija koja se pokazala kao vrlo efikasna.

11.4. Kalibracija i validacija modela

Modeli biljne proizvodnje obično imaju nekoliko vrednosti svakog parametra u modelu koje su preuzete iz literature ili određene eksperimentalno i koje treba da olakšaju početne simulacije. Međutim, za operativnu upotrebu modela u nekom regionu i za karakterističan sortiment potrebno je obaviti dodatnu *kalibraciju* modela. Kalibracija se obavlja korišćenjem setova podataka koji su, obično, rezultat brižljivo organizovanih eksperimenata i koji sadrže sve ulazne i izlazne podatke jednog modela. Tada se vrednosti parametara u modelu menjaju sve dok se ne dobiju rezultati koji se u zadovoljavajućoj meri slažu sa izmerenim vrednostima posmatranih veličina.

Nakon obavljene kalibracije, potrebno je proveriti tačnost simulacija u različitim vremenskim situacijama, na različitim tipovima zemljišta i sortama, poređenjem simuliranih i izmerenih vrednosti. To se zove *validacija* modela. Prilikom validacije je veoma važno koristiti setove podataka koji nisu korišćeni prilikom kalibracije. Validacija modela treba da pokaže da li model i dalje ima zadovoljavajuće karakteristike kada se koristi u uslovima koji se razlikuju od uslova u kojima je izvršena kalibracija. To omogućava primenu modela u širem spektru sličnih uslova, pod kojima možemo verovati da će model dati pouzdane rezultate.

Prilikom validacije modela obično se upoređuju simulirane i izmerene vrednosti prinosa, biomase, datuma nastupanja fenoloških faza, sadržaja vlage i azota u zemljištu i indeksa lisne površine (slika 11.4). Ovi rezultati su često dostupni iz prethodnih poljskih eksperimenata obavljenih u različitim godinama i na različitim lokacijama. Da bi kompenzovali uticaj varijabilnosti vremenskih uslova u pojedinim godinama na izabranim lokacijama, preporučuje se upoređivanje sa rezultatima osmatranja iz najmanje tri do deset godina. Performanse modela se testiraju korišćenjem niza statističkih testova od kojih se najčešće koriste:

– srednja apsolutna greška (MAE) koja meri apsolutno odstupanje simulirane od izmerene vrednosti posmatrane veličine:

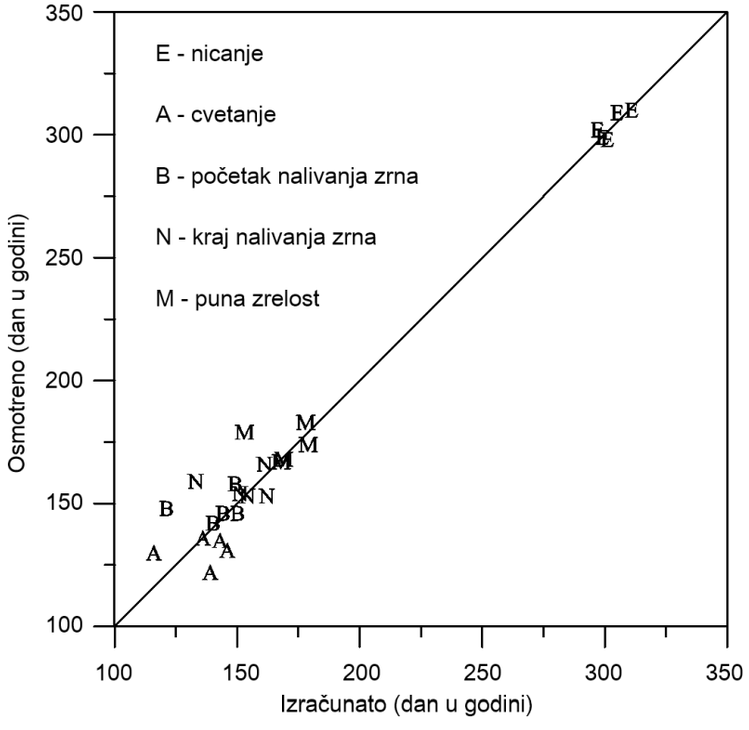
(11.2)

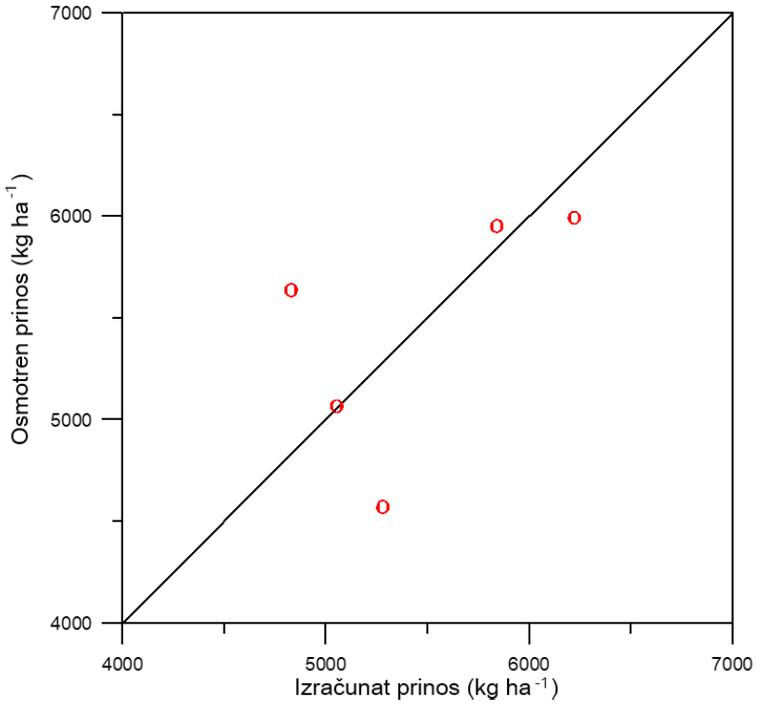
gde je X_i izmerena vrednost, X_s modelom simulirana vrednost posmatrane veličine, a N je broj merenja;

– koren srednje kvadratne greške (RMSE)

(11.3)

daje veliku specifičnu težinu velikim odstupanjima (jer su greške kvadrirane pre nego što su uprosečene) i ima niže vrednosti kada su simulacije bolje;

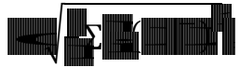




Slika 11.4.

Poređenje datuma nastupanja fenoloških faza i prinosa ozime pšenice na Rimskim šančevima (Srbija) izračunatih modelom SIRIUS i osmotrenih tokom vegetacije sorte Anastazija u periodu 2001–2005. godine (Lalić et al., 2012)

– standardna devijacija (σ) za izmerene (s_i) i simulirane vrednosti (s_s)



(11.4)

pokazuje koliko ove vrednosti odstupaju od srednje vrednosti () analiziranih podataka (izmerenih ili simuliranih);

– relativna vrednost korena srednje kvadratne greške (RRMSE) se izračunava tako što se RMSE podeli sa srednjom vrednošću izmerenih vrednosti;
– Vilmotov (Willmott et al., 1985) indeks slaganja (d)

(11.5)

je standardizovana mera odstupanja modela od stvarne, odnosno, izmerene vrednosti posmatrane veličine. Indeks može imati vrednosti od 0 (nema nikakvog slaganja) do 1 (savršeno slaganje) i veoma je osetljiv na ekstremne vrednosti jer se razlika izmerene i simulirane vrednosti kvadrira.

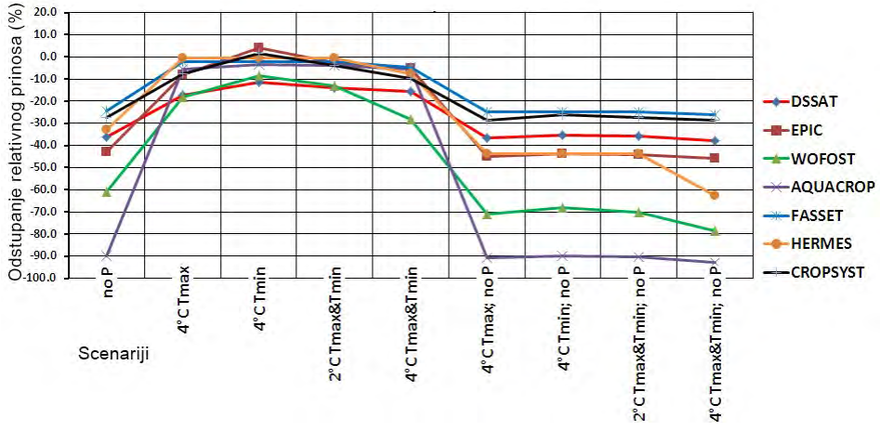
Simulacija se smatra dobrom ako je RMSE < s_o i s_s < s_o i ako je indeks slaganja blizu 1. Takođe, simulacija se smatra odličnom ako je RRMSE < 10%, dobrom ako je 10% < RRMSE < 20%, zadovoljavajućom ako je 20% < RRMSE <30%, a lošom ako je RRMSE > 30%.

11.5. Osetljivost modela biljne proizvodnje na ekstremne vremenske uslove

Kako različiti modeli biljne proizvodnje koriste različite pristupe za simuliranje određenih procesa, tako se razlikuju i rezultati simulacije. Analiza osetljivosti modela i upoređivanje različitih modela prilikom obavljanja iste simulacije, mogu ukazati na slabosti modela ili ograničenost njihove primene, kao i aspekte u kojima će, možda, biti potrebna dodatna poboljšanja modela.

Slika 11.5 prikazuje odstupanja simuliranih prinosa kod sedam različitih modela primenjenih za simulaciju rasta i razvoja kukuruza. Ta odstupanja su posledica značajne suše i toplotnog talasa od maja do avgusta na lokaciji koja se nalazi u semiaridnom regionu Austrije. Značajne razlike između razmatranih modela mogu se videti u konačnim simuliranim prinosima u slučaju sušnog stresa tokom leta, dok su razlike u osetljivosti modela bile mnogo manje u slučaju ekstremnih temperatura. Ovo ide u prilog pretpostavci da je simulacija sadržaja vode u zemljištu i stres zbog suše kod useva i dalje glavni faktor neizvesnosti u rezultatima simulacije. Razlozi za ovakvo ponašanje su mnogostruki. To može da bude rezultat slabosti u simulaciji procesa rasta i sadržaja vode u zemljištu, kao i različitih parametrizacija stresnih uslova (npr. utvrđivanja kritične granice suše ili toplotnog stresa za procese rasta useva).

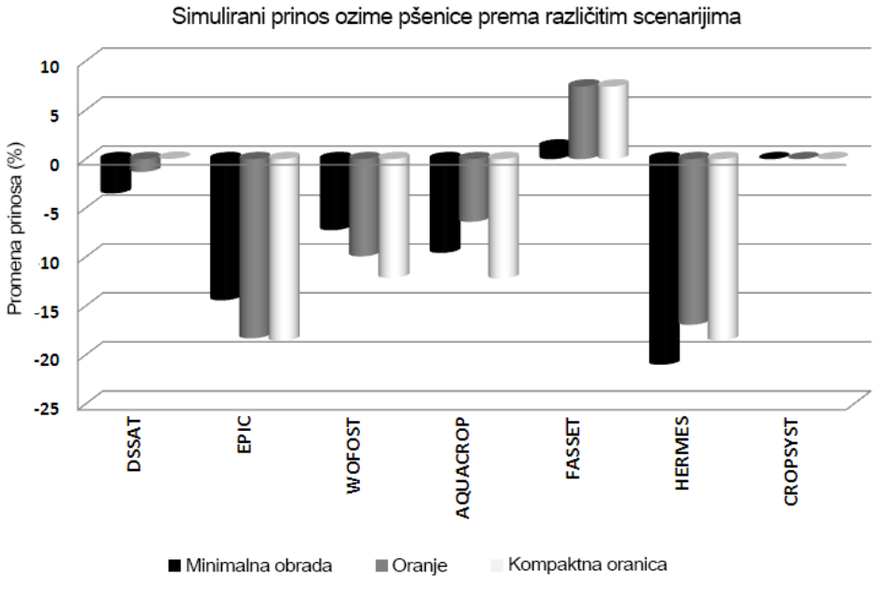
Karakteristike zemljišta (kao što su zapreminska gustina i kapacitet zemljišta za zadržavanje biljkama pristupačne vode) mogu značajno uticati na rezultate simulacije. Obrada zemljišta značajno utiče na njegovu zapreminsku gustinu i kapacitet skladištenja vode. Osetljivost modela na promene obrade zemljišta u različitim scenarijima sa sušom prikazana je na slici 11.6.



Slika 11.5.

Simulirana reakcija prinosa kukuruza na sušne i tople uslove tokom cvetanja kod modela biljne proizvodnje u uslovima semiaridne klime u Austriji (Tekst u kolonama označava primenjene promene vremenskih parametara tokom dve nedelje cvetanja u poređenju sa stvarnim vremenskim prilikama: noP = bez padavina,
T = povećanje dnevnih temperatura)

U nekim slučajevima, modeli biljne proizvodnje reaguju različito na primenjeni metod obrade zemljišta. U slučaju ozime pšenice, nije postojala ujednačena reakcija ispitivanih modela. Osim jednog, svi modeli su pokazali opšti pad prinosa u scenariju sa izostavljenim padavinama tokom cvetanja. Međutim, veličina pada prinosa se menjala u zavisnosti od primenjenog metoda obrade zemljišta. S jedne strane, može se zaključiti da se modeli ponašaju veoma različito u pogledu simuliranog smanjenja prinosa kao rezultata nedostatka vode, dok je uticaj ekstremnih temperatura u datim uslovima bio mnogo manji. Sa druge strane, u uslovima malog stresa zbog nedostatka vode, kao što je slučaj sa ozimim usevima (ili navodnjavanim usevima), uticaj ekstremne temperature na simulirani prinos može biti dominantan. Zato treba biti pažljiv prilikom primene modela biljne proizvodnje u studijama uticaja klimatskih promena, posebno u slučaju lokalnih ili regionalnih studija gde su ispravna kalibracija i validacija osnovni preduslovi.



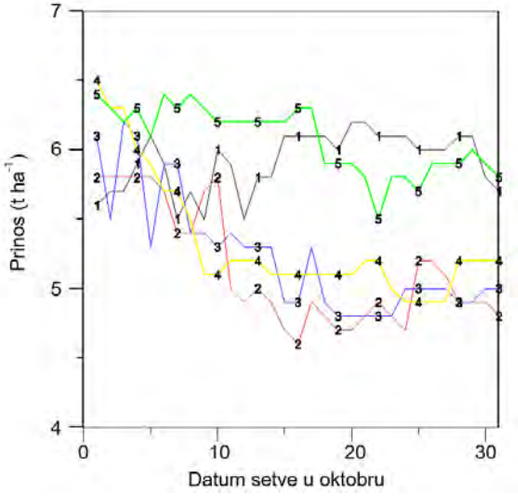
Slika 11.6.

Reakcija simuliranog prinosa ozime pšenice na različite metode obrade zemljišta uz izostavljanje padavina tokom dve nedelje cvetanja ozime pšenice u uslovima semiaridne klime u Austriji 2003. godine

11.6. Primena modela biljne proizvodnje

Modeli biljne proizvodnje mogu se primeniti u istraživanju i u agronomskoj praksi. Međutim, glavno područje primene je u oblasti istraživanja, posebno za procenu uticaja klimatskih promena na buduće potencijalne prinose useva, uticaj na životnu sredinu, različite rizike u uzgoju ili korišćenju vodnih resursa za proizvodnju ratarskih kultura. Primeri praktične primene sreću se pri kratkoročnim planiranju navodnjavanja i đubrenja ili kratkoročnom do srednjoročnom prognoziranju prinosa. Takođe, moguće je analizirati, recimo, uticaj rokova setve na prinos kao što je to prikazano na slici 11.7. Svaka tačka na prikazanom grafikonu pokazuje koliki se prinos mogao očekivati (simulirani prinos) u posmatranoj godini da je setva obavljena izabranog dana. Jasno se uočava koliki je uticaj roka setve na očekivani prinos i koliko se varijacija menja u zavisnosti od specifičnih meteoroloških uslova u pojedinim godinama.

Primeri primene modela biljne proizvodnje za procenu uticaja klimatskih promena na prinos i dinamiku vegetacije, korišćenjem rezultata klimatskih simulacija, mogu se naći u poglavlju 12.4.



Slika 11.7.

Uticaj rokova setve ozime pšenice na potencijalni prinos sorte Anastazija na Rimskim šančevima (Srbija) izračunati modelom SIRIUS za period 2001–2005. godina

11.7. Modeliranje pojave bolesti i štetočina

Modeliranje pojave štetnih organizama (biljnih bolesti i štetočina) je disciplina koja se intenzivno razvija u poslednjih pola veka. Od prvih statističkih i empirijskih modela koji su razvijeni 60-ih godina 20. veka, učinjeno je mnogo teških koraka da bi se došlo do sofistikovanih mehanicističkih modela zasnovanih na sistemima prognostičkih diferencijalnih jednačina i neuralnim mrežama. Današnji modeli, za razliku od svojih prethodnika, mogu da računaju na sofistikovane izvore podataka koji stižu sa satelita (stanje biljke domaćina, zemljišta i atmosfere) i brojnih mreža automatskih meteoroloških stanica. Međutim, sofistikovanost modela i napredne tehnike koje stoje iza njega ne podrazumevaju pouzdane prognoze razvoja štetnog organizma. Kao i modeli biljne proizvodnje tako i modeli za simulaciju pojave štetnih organizama u velikoj meri zavise od bioloških osmatranja. Dakle, bez vizuelnih pregleda biljke domaćina i štetnog organizma, ukomponovanih sa informacijama koje opisuju stanje njihove životne

sredine, nije moguće razvijati, testirati i primenjivati modele koji opisuju razvoj štetnog organizma niti davati preporuke za integralnu zaštitu bilja.

Komplementarna priroda stohastičkih i determinističkih modela o kojoj je bilo govora u poglavlju 11.2 u punoj meri dolazi do izražaja kada se radi o modeliranju pojave štetnih organizama. Kada postoje vremenske serije meteoroloških i bioloških podataka za neko područje koje uključuju višegodišnja osmatranja biljke domaćina i štetnog organizma, stohastički modeli mogu pružiti korisnu informaciju o povoljnosti uslova (recimo meteoroloških) za pojavu posmatranog štetnog organizma. Ovakvi modeli, kada se u njih uključe informacije o strukturi setve ili poznati raspored zasada, mogu biti dragoceni izvor informacija za procenu rizika proizvodnje i organizovanje lokaliteta na kojima će se obavljati merenja i osmatranja tokom budućih eksperimenata ili operativnog praćenja stanja štetnih organizama u usevima i zasadima.

Prilikom korišćenja rezultata simulacija važno je imati u vidu da svaki model predstavlja pojednostavljenu verziju stvarnosti, a da svaki tim koji razvija model pokušava da ustanovi minimalni obim procesa koji mora da se uzme u obzir da bi se došlo do valjane informacije o biološkom sistemu koji je predmet interesovanja. Kada se radi o modeliranju pojave štetnih organizama, jedan od najtežih zadataka je utvrditi koji faktori dominantno utiču na razvoj posmatranog organizma. Drugi važan zadatak je ispravno definisanje problema, odnosno informacija koju model treba da pruži o štetnom organizmu. Većina modela se razvija sa ciljem da reši jedan (ili više) od sledećih zadataka:

- predvideti vreme pojave štetnog organizma;
- predvideti intenzitet napada i, ako je moguće, oštećenja biljke domaćina odnosno očekivano smanjenje prinosa;
- proceniti verovatnoću da dođe do više pojava štetnog organizma tokom jednog vegetacionog perioda;
- uključiti mere zaštite u rešavanje zadataka a)–c) i omogućiti poređenje efikasnosti različitih mera.
- *Ulazni podaci* u modelima za simulaciju pojave štetnih organizama su:
- karakteristike biološkog sistema (recimo, prisustvo i zastupljenost inokuluma ako se radi o biljnim bolestima; prisustvo i zastupljenost jaja ako se radi o štetočinama);
- karakteristike sorte (hibrida) sa stanovišta otpornosti na određene bolesti ili poželjnosti za određene štetočine;
- faza razvića biljke domaćina (štetni organizam je „zainteresovan" za biljku samo u određenim fazama njenog razvoja);
- prisustvo više mogućih biljaka domaćina i rotacija useva;
- karakteristike sredine u kojoj se i biljka domaćin i štetni organizam razvijaju, a pre svih meteorološki uslovi.

Nema nikakve sumnje da su meteorološki uslovi pokretačka snaga razvoja štetnih organizama. Naime, ukoliko štetni organizam i biljka domaćin postoje na nekom mestu, meteorološki uslovi dominantno utiču na brzinu razvoja štetnog organizma. Rezultati brojnih eksperimenata pokazuju da su padavine, temperatura i relativna vlažnost vazduha najznačajniji meteorološki elementi sa stanovišta razvoja štetnih organizama, dok je vetar odgovoran za njihovo širenje.

Kada se radi o atmosferskim pojavama, recimo padavinama, njihovo vreme pojavljivanja i trajanje je jednako važno kao i promena koju izazivaju (vlaženje listova biljaka, povećanje vlažnosti vazduha i zemljišta, pad temperature). Recimo, Makhardi (MacHardy, 1996) je ustanovio da noćne padavine dovode do oslobađanja manje zrelih askospora, koje izazivaju čađavu krastavost jabuke, nego ako se iste padavine pojave tokom dana.

Jedan od najznačajnijih faktora za razvoj patogena je raspoloživa vlaga (dovoljna je kap vode) na površini biljke, obično lista. Zadržana vlaga može da potiče od kiše ili rose i opisuje se pomoću veličine koja se zove –dužina trajanja vlaženja lista. Ova veličina je važna promenjiva u većini modela koji simuliraju razvoj patogena iako je nije lako ni izmeriti ni izračunati. Naime, koliko vode će se zadržati na površini lista, kolika površina lista će biti prekrivena vodom i koliko dugo će vlaženje trajati zavisi od: površine lista, karaktera površine (glatka, hrapava, ...), oblika i nagiba listova, gustine biljnog sklopa, senčenosti listova, kao i meteoroloških uslova unutar biljnog sklopa (pre svega brzine vetra, vlažnosti i temperature vazduha) koji utiču na isparavanje vode sa površine lista.

Uloga temperature vazduha, odnosno temperature sredine u kojoj se razvija štetni organizam, od nesumnjivog je značaja za početak i intenzitet njegovog razvoja. Svaki organizam ima svoje gornje i donje granične temperature, optimalne i kritične temperature koje su ograničavajući faktori procesa u svakom modelu. Temperatura sredine direktno utiče na procese kao što su početak klijanja, infekcija i trajanje inkubacije. Recimo, Njutn (Newton, 1989) je pokazao da se efikasnost infekcije prouzrokovačem pepelnice ječma smanji za više od 50% kada se temperatura vazduha smanji sa 20 °C na 7 °C.

U modelima koji se bave prognozom pojave biljnih bolesti, veza između faze razvoja bolesti i meteoroloških elemenata je ključni element prognoze. Problem je, što je u mnogim modelima to i jedini element na kome se zasniva prognoza.

Model. Model za prognozu pojave i razvoja štetnog organizma je matematička formulacija faza u razvoju štetnog organizma koja treba da dâ odgovor na neko od ranije postavljena, četiri pitanja. Model može da se sastoji od nekoliko empirijskih formula koje povezuju razvoj posmatranog organizma sa nekim od bitnih faktora (obično su to meteorološki uslovi) ili da bude prognostički sistem koji se sastoji od niza diferencijalnih jednačina koje za svaki vremenski trenutak daju očekivano stanje štetnog organizma i njegovu zastupljenost.

Primer empirijskog modela koji ima za cilj da izračuna trajanje inkubacije je Milerov model za prognozu pojave *plamenjače vinove loze*.

Prema Mileru, do primarne infekcije u vinogradu može doći ako su zadovoljeni sledeći uslovi:

- ima zrelih klijavih oospora,
- lišće je široko najmanje 2-3 cm,
- tokom dva dana je palo najmanje 10 mm kiše,
- srednja dnevna temperatura je tokom ovih dana bila veća od 12 °C (Čamprag, 1983).

Samo kada su svi ovi uslovi ispunjeni može da dođe do ostvarenja primarne infekcije. Tada, na osnovu Milerove tabele (tabela 11.1) i jednačine (11.6), može da se odredi trajanje inkubacionog perioda, tj. kada će izbiti konidije. Jednačina ima oblik

(11.6)

gde je: a – zbir inkubacija određenih za svaki dan na osnovu srednje dnevne temperature i Milerove inkubacione krive, počevši od dana primarne infekcije, b – broj dana proteklih od dana nastupanja zaraze do onog dana do kog se vrši izračunavanje, c – broj koji pokazuje koliko će još dana trajati inkubacija. Pri tom treba imati u vidu da ukoliko tokom inkubacionog perioda dođe do pada temperature ispod 12 °C onda se taj dan ne uzima u obzir i račun se nastavlja tek kada temperatura ponovo pređe 12 °C. Naravno, pretpostavlja se da krajem maja, vreme pri kome je temperatura vazduha niža od 12 °C ne može da traje više od 1–2 dana u kontinuitetu.

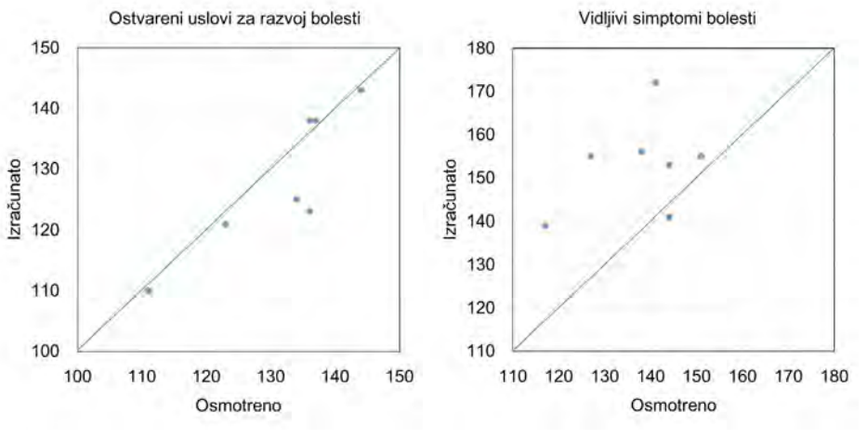
Tabela 11.1.

Vrednosti Milerove inkubacione krive izražene u danima trajanja inkubacije na određenim temperaturama (Čamprag, 1983)

	Trajanje inkubacije (dan)									
T (°C)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
12	13,0	12,8	12,5	12,3	12,0	11,8	11,6	11,5	11,2	11,1
13	10,9	10,7	10,5	10,4	10,2	10,1	10,0	9,9	9,7	9,5
14	9,4	9,3	9,2	9,0	8,9	8,8	8,7	8,5	8,4	8,3
15	8,2	8,1	8,0	7,9	7,8	7,6	7,5	7,4	7,3	7,2
16	7,1	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7	6,6	6,5	6,5	6,4
17	6,3	6,2	6,1	6,1	6,0	5,9	5,8	5,8	5,7	5,6
18	5,6	5,5	5,4	5,4	5,3	5,3	5,2	5,1	5,1	5,0
19	5,0	4,9	4,9	4,8	4,8	4,7	4,7	4,6	4,6	4,5
20	4,5	4,4	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
21	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
22	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
23	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
24	4,0	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2	4,2
25	4,3	4,3	4,3	4,4	4,4	4,5	4,5	4,5	4,6	4,6
26	4,7	4,7	4,7	4,8	4,8	4,9	5,0	5,0	5,1	5,2
27	5,3	5,3	5,4	5,5	5,6	5,6	5,7	5,7	5,9	6,0
28	6,1	6,2	6,3	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,3

Prema Mileru, u računu za trajanje inkubacionog perioda, prema gore navedenoj relaciji, uzimaju se u obzir samo dani, tokom perioda inkubacije, u kojima je srednja dnevna temperatura bila veća od 12 °C. Obrazovanje sporonosnih organa obavlja se noću. Za pojavu konidija je potrebno da je temperatura posle ponoći veća od 12 °C (optimum 17–21 °C), a relativna vlažnost vazduha da je veća od 80% (optimum 90–100%). U osnovi, konidije mogu da klijaju na temperaturama između 3 i 30 °C, ali je optimum temperature 22–24 °C.

Primer validacije modela za prognozu pojave štetnih organizama prikazan je na slici 11.8. Prikazani rezultati jasno pokazuju da model dobro predviđa ostvarivanje meteoroloških i bioloških uslova za razvoj bolesti, ali da su vidljivi simptomi bolesti, sistematski uočavani ranije nego što je to model predviđao. Dakle, potrebno je korigovati deo modela koji predviđa ovaj događaj i potom ponoviti validaciju modela na novom setu podataka.



Slika 11.8.

Osmotrene i izračunate vrednosti ostvarenih bioloških i meteoroloških uslova za pojavu plamenjače vinove loze i vidljivih simptoma bolesti

11.8. Agroklimatski i agrometeorološki indeksi

Agroklimatski i agrometeorološki indeksi se koriste za opisivanje agrometeoroloških i agroklimatskih karakteristika područja. Ovi indeksi se zasnivaju na vrednostima jednog ili više meteoroloških ili klimatskih elemenata, i određuju se sa ciljem da se utvrdi povoljnost područja (trenutna ili dugoročna) za gajenje pojedinih biljnih vrsta. Vrednosti nekih indeksa su specifične za pojedine biljne vrste, ali mogu zavisiti i od fenološke faze biljke. Agroklimatski indeksi se, takođe, koriste i kako bi se utvrdili efekti promena klime. Naime, na nekim područjima se srednje godišnje i srednje mesečne temperature i padavine u dva klimatološka perioda ne razlikuju mnogo, ali zato agroklimatski indeksi mogu biti značajano različiti (vidi poglavlje 12.4).

Više od polovine indeksa koji se danas koriste odnose se na procenu intenziteta suše, toplotni stres i mraz, kao i dužinu vegetacionog perioda jarih useva. U nastavku poglavlja navešćemo samo neke od njih.

Broj dana sa ekstremnim vrednostima temperature vazduha (tokom meseca ili sezone), a naročito broj dana sa jakim mrazom (T_{min} < -10 °C) i broj dana sa ekstremnim temperaturnim stresom (T_{max} > 35 °C u periodu april–jun), izračunati na osnovu klimatoloških podataka, ukazuju na verovatnoću pojave ekstremnih temperaturnih uslova (tabela 11.2). Imajući u vidu kritične temperature vazduha za pojedine fenološke faze, vrednosti ovih indeksa ukazuju na povoljnost uslova za gajenje određene biljne vrste odnosno na rizike proizvodnje. U tom smislu se

na području Srbije naročito izdvajaju april i oktobar kada je prosečan broj letnjih i mraznih dana približno isti i, naravno, letnji meseci jul i avgust sa velikim brojem letnjih dana. Granične vrednosti temperatura za karakteristične dane (mrazni dan, letnji dan, tropski dan) mogu se naći u tabeli E3.2 u okviru glave „Numerički primeri“ na kraju ove knjige.

Tabela 11.2.

Prosečan broj dana sa ekstremnim vrednostima temperature vazduha u Srbiji u periodu 1971–2000 (MD–mrazni dan, LD–letnji dan, TD–tropski dan)

Meteorološka stanica	III MD	IV MD	IV LD	V LD	VI LD	VI TD	VII LD	VII TD	VIII LD	VIII TD	IX LD	IX TD	X MD	X LD
Novi Sad	10	2	2	10	16	4	22	9	23	9	12	2	2	2
Sombor	12	2	2	10	16	5	23	9	23	10	12	2	4	3
Požega	16	4	2	8	15	4	21	7	20	8	11	2	4	2
Kraljevo	11	1	2	10	17	5	23	9	23	10	12	2	3	3
Kruševac	12	2	2	10	17	5	23	10	22	11	13	3	3	3
Ćuprija	13	4	3	11	18	6	23	10	23	12	13	3	4	3
Niš	10	1	3	11	19	7	24	12	25	14	15	4	2	4
Zaječar	15	4	2	11	20	6	25	12	25	12	14	3	4	3
Dimitrovgrad	15	4	2	7	15	3	21	8	21	9	12	2	4	2
Vranje	12	2	1	8	17	4	23	10	24	11	14	2	3	2

Tabela 11.3.

Prosečno trajanje vegetacionog perioda i prosečne sume temperature vazduha iznad 0 °C (SumT_0) i 5 °C (SumT_5) u Srbiji u periodu 1971-2000.

Meteorološka stanica	VP1 (dan)	VP2 (dan)	VP3 (dan)	SumT_0 (°C)	SumT_5 (°C)
Novi Sad	131	182	237	3994,3	2542,6
Sombor	121	174	228	3896,7	2464,1
Požega	100	168	216	3620,0	2256,3
Kraljevo	122	180	237	3971,1	2545,8
Kruševac	124	177	228	3898,0	2470,3
Ćuprija	110	170	221	3804,2	2427,2
Niš	128	183	239	4182,1	2665,5
Zaječar	121	170	220	3750,1	2423,4
Dimitrovgrad	102	166	217	3614,2	2209,9
Vranje	116	176	233	3893,4	2432,0

Dužina vegetacionog perioda kao agroklimatski, odnosno, agrometeorološki indeks se određuje kao trajanje perioda u kome su ispunjeni specifični uslovi kada se radi o temperaturi vazduha (tabela 11.3). Kriterijumi koji se najčešće sreću su a) trajanje perioda između poslednjeg prolećnog i prvog jesenjeg mraza i b) početak, završetak i trajanje perioda sa: $T_{sr} > 15$ °C i $T_{min} > 5$ °C (VP1); $T_{sr} > 10$ °C i $T_{min} > 2$ °C (VP2); $T_{sr} > 5$ °C i $T_{min} > -2$ °C (VP3).

Sume temperature vazduha iznad izabrane granične vrednosti (obično 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C) ili u opsegu optimalnih temperatura za izabranu biljnu vrstu ili štetni organizam ukazuju na dinamiku razvoja posmatranog organizma. Od izuzetnog je značaja period u kome su ostvarene određene granične temperature i brzina akumumulacije toplotnih jedinica jer to ukazuje na brzinu odvijanja vegetacije i vreme kada može da se očekuje pojava štetnog organizma. Naime, nikako ne treba zaboraviti da je razvoj štetnih organizama usklađen sa razvojem biljaka. Blage zime i ranije otpočinjanje vegetacije u proleće (ili pre nego što počne proleće) dovešće do ranije pojave štetnih organizama koji su vrlo prilagodljivi i čiji razvoj može da se očekuje ponekad i na nešto nižim temperaturama od uobičajenih.

12. Klima, klimatske promene i poljoprivreda

Klima i njene promene predstavljaju jedan od najvećih izazova sa kojima se čovek susreće u 21. veku. Ublažavanje promena klime i adaptacija na promene predstavlja pitanje opstanka civilizacije i načina života koji danas poznajemo. Istraživanje klime i njenih promena, poslednjih decenija, prati mnogo nesporazuma i, ponekad, potpuno pogrešnih interpretacija. U poglavlju koje sledi otklonićemo neke od nesporazuma. Ipak, neke tvrdnje zavređuju da odmah budu razjašnjene.

U naučnoj javnosti nikada nije postojala dilema da li postoje klimatske promene. Klima nekog područja i cele planete se određuje na određeni način i ako se tridesetogodišnji prosek izabranih klimatoloških elemenata promeni u dva klimatološka perioda onda smatramo da se klima promenila. Među naučnicima postoji neslaganje u pogledu uzroka klimatskih promena i mere u kojoj je čovek uticao na njih. Tako postoje oni koji smatraju da je uticaj čoveka zanemarljiv, oni koji smatraju da je taj uticaj dominantno odredio smer i intenzitet promena klime na Zemlji od Industrijske revolucije do danas i, naravno, većina koja smatra da uzroci leže između ova dva ekstremna scenarija.

Druga tvrdnja na koju se često nailazi u javnosti, ali ponekad i u stručnoj literaturi, je da su ekstremne vremenske pojave (suše, poplave) uzrokovane klimatskim promenama. To nije tačno. Klima ne može da bude uzrok vremena. Naravno, ukoliko se određene (ekstremne) vremenske prilike češće javljaju u nekom regionu i utiču na temperaturu i količu padavina, recimo, to će sigurno dovesti do promena prosečnih vrednosti ovih veličina i do promene klime.

12.1. Vreme i klima

Vreme, u meteorološkom smislu, opisuje trenutno stanje atmosfere na nekom mestu. Za kvantifikovanje ovog stanja koriste se meteorološki elementi kao

što su temperatura i vlažnost vazduha i zemljišta, padavine i prisustvo snežnog pokrivača, atmosferski pritisak, brzina i pravac vetra, oblačnost i osunčavanje.

Ukoliko se dovoljno dugo mere i osmatraju vrednosti meteoroloških elemenata, moguće je utvrditi preovlađujuće vremenske uslove odnosno „prosečno vreme" na nekom mestu - njegovu *klimu*. Po definiciji, klima predstavlja skup meteoroloških elemenata i atmosferskih procesa koji definišu srednje fizičko stanje atmosfere određenog područja. Razlikuje se od vremena koje se stalno menja i čije promene se vezuju isključivo za kratkoročne (uglavnom dnevne a nekad i časovne) promene meteoroloških elemenata.

Prostorne razmere na kojima se definiše klima menjaju se od kontinentalnih do regionalnih (npr. klima Panonske nizije), lokalnih (npr. klima gradova), pa čak i mikro razmera (npr. mikroklima biljnog sklopa vinograda ili voćnjaka). Razvoj satelitskih osmatranja pre više decenija i njihova upotreba za osmatranje stanja i karakteristika atmosfere, omogućio je upotrebu satelitskih merenja za opisivanje klime na različitim prostornim razmerama.

Za kvantifikovanje karakteristika klime koriste se vrednosti meteoroloških elemenata osrednjene tokom dužeg niza godina (normalne vrednosti), kao i frekvencija njihovih karakterističnih vrednosti (prosečan broj mraznih ili tropskih dana, npr.), verovatnoća pojave (padavina, ekstremnih vremenskih događaja) i percentili (verovatnoća odstupanja od višegodišnjeg proseka). Važan preduslov za opisivanje klime nekog područja je raspolaganje kontinuiranim vremenskim nizovima meteoroloških elemenata koji su dovoljno dugi da opišu statističke karakteristike njihovih distribucija. Međutim, idealna dužina vremenske serije zavisi od područja čija se klima opisuje i od karakteristika same klime. Ipak, da bi klimatske analize bile uporedive, Svetska meteorološka organizacija (SMO) (World Meteorological Organization - WMO) je odredila 30 godina kao period koji je potreban za opisivanje klimatskih karakteristika nekog područja. Srednje vrednosti meteoroloških elemenata izračunate tokom ovog perioda nazivaju se klimatološki srednjaci ili normalne vrednosti i koriste se kao referentne vrednosti meteoroloških elemenata. Posebno su značajni u istraživanjima klimatskih promena kada se, pored ostalih karakteristika, porede i normalne vrednosti istih meteoroloških elemenata u različitim klimatološkim periodima. Tako možemo da poredimo klimatske karakteristike nekog područja u periodu 1961–1990. sa, trenutno, najnovijom klimom za period 1981–2010. kako bi utvrdili da li je došlo do promena nekih karakteristika vremenskih serija meteoroloških elemenata. Dakle, klimatske promene mogu da se definišu i kao promena klimatskih obrazaca na globalnom ili regionalnom nivou. Do zaključka da li se klima menja ili ne, dolazi se poređenjem rezultata statističke obrade meteoroloških elemenata izmerenih tokom dva različita perioda od po 30 godina. U poslednjim decenijama kao najznačajniji indikator promene klime izdvojio se porast temperature

vazduha osmotren na različitim prostornim razmerama (npr. promena globalne temperature vazduha za 3 ili 4,5 °C) kao i količina padavina. Međutim, to nije univerzalni kriterijum. U mnogim regionima u svetu prosečne godišnje temperature i količine padavina se ne menjaju mnogo niti se njihove godišnje vrednosti mnogo razlikuju od normalnih, ali se ovi regioni ipak sve češće sreću sa sušom ili učestalim toplotnim talasima.

12.2. Klasifikacija i regionalizacija klime

Tokom istorije, počev još od helenističkih vremena, a naročito nakon što su meteorološka merenja postala dostupna na globalnom nivou, razvijen je veliki broj klasifikacija klime. Uloga klasifikacije klime je da organizuje i klasifikuje klimatološke podatke u cilju identifikovanja i poređenja regiona sa istim ili sličnim klimatskim karakteristikama. Postoje tri osnovna tipa klasifikacije klime koja se koriste u klimatologiji za identifikaciju klimatskih zona:

- Empirijske klasifikacije klime su zasnovane na osmotrenim meteorološkim elementima, tipu vegetacije i njihovom odgovoru na klimu, ali i primeni iskustva u klasifikaciji. Kepenova (Köppen) klasifikacija, opisana u daljem tekstu, je jedan od primera emprijske klasifikacije zasnovane na temperaturi i padavinama.
- Generičke klasifikacije klime su zasnovane na uzrocima formiranja različitih tipova klime kao što su: geografske karakteristike područja, energetski bilans površine i dominantne vazdušne mase. Ova klasifikacija se unapređuje u skladu sa novim podacima o klimi.
- Kombinovane (primenjene) klimatske klasifikacije proistekle su iz problema vezanih za klimu i mogu imati empirijske i/ili generičke osnove. Klasifikacija Torntvajta je zasnovana na potencijalnoj evapotranspiraciji i često se koristi u oceni vodnog bilansa regiona ili potencijalne količine vode koja se koristi u ljudskim aktivnostima.

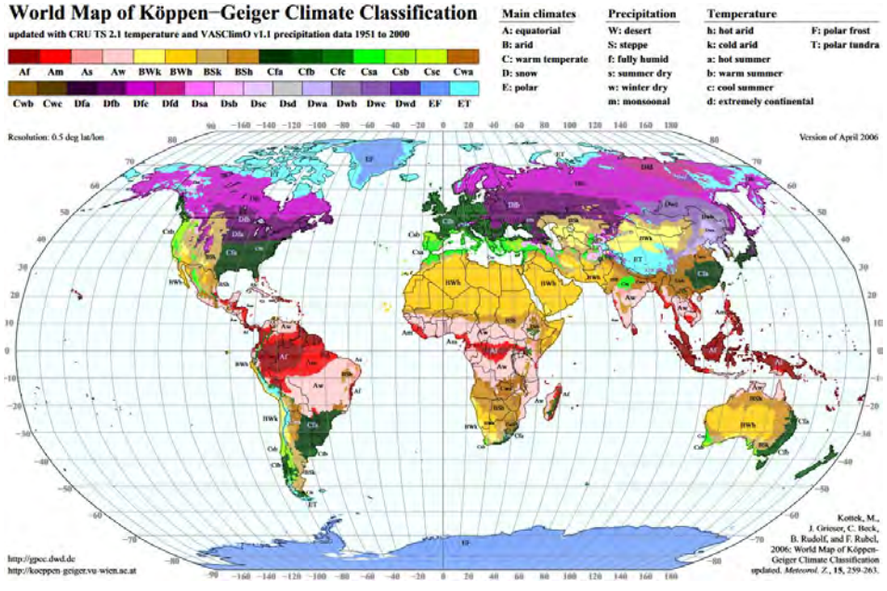
Za izvođeje klimatskih klasa se koriste mnogobrojne kombinacije meteoroloških elemenata, izvedenih veličina i indeksa:

- na osnovu upadnog sunčevog zračenja razlikujemo polarne, umerene i tropske zone (empirijski/generički tip);
- prema geografskom položaju moguće je identifikovati regione sa „sličnom" klimom (empirijski tip);
- na osnovu hidroloških karakteristika, kao što je vrsta sezonskog toka reka, moguće je identifikovati različite tipove klime (empirijski/kombinovani tip);

- potencijalna evapotranspiracija je osnova za dva tipa klasifikacije klime koje su ustanovili Torntvajt i Budiko (Budyko) (empirijski/primenjeni/generički tip);
- kombinacija meteoroloških elemenata (temperature i padavina) i vrste vegetacije poslužili su Kepenu kao indikatori klime (empirijski tip);
- kombinacije isključivo meteoroloških elemenata, kao što su sezonska i/ili mesečna temperatura vazduha i količina padavina (empirijski tip);
- kombinacija parametara za potrebe agroklimatske klasifikacije klime pored izabranih meteoroloških elemenata i njihovih karakterističnih vrednosti (npr. srednje i ekstremne mesečne temperature, broj sušnih dana, prosečno trajanje snežnog pokrivača) uključuje i karakteristike biljne vrste na koju se klasifikacija odnosti kao što je, recimo, dužina vegetacionog perioda ili perioda gajenja određenih useva (kombinovani tip).

Prilikom klasifikacije klime često se koriste indikatori, izračunati iz meteoroloških i klimatoloških elemenata, kao osnova za definisanje, zoniranje i mapiranje tipa klime (kao što su tropska, semi-humidna itd.) ili se tip klime određuje direktno iz srednjih vrednosti meteoroloških elemenata, kao što su srednje godišnje ili mesečne temperature vazduha i sume padavina, izračunate na osnovu podataka dobijenih sa meteoroloških stanica.

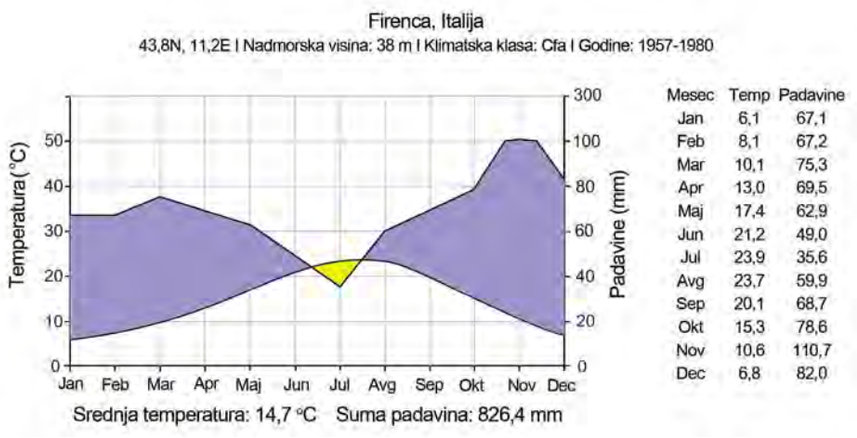
Po pravilu, klimatske zone se prikazuju na geografskim kartama. Karte najčešće prikazuju i srednje vrednosti klimatoloških elemenata na kojima se bazira prikazana klasifikacija. Različite klasifikacije klime često su crtane kao karte sa različitim rezolucijama i štampane za klimatološke atlase, ili pridružene podacima sa meteoroloških stanica kao klimatski dijagrami. Međutim, od vremena digitalizacije mogućnosti za izradu klimatskih dijagrama i mapa postale su neograničene. Ipak, danas se i dalje koriste neke od „starih“, ali unapređenih, klasifikacija klime kao zajednički standard, u prvom redu Kepen-Gajgerova (Köppen-Geiger) klasifikacija klime (slika 12.1) i klimatski dijagrami lokaliteta prema Valteru (Walter) i Litu (Lieth), poznatiji kao Valterovi klima dijagrami (slika 12.2).



Slika 12.1.

Kepen-Gajgerova klimatska mapa sveta za period 1953-2000
[izvor: Kottek et al., 2006, http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/]
(uključuje i animiranu kartu, koja pokazuje razvoj prema budućim klimatskim scenarijima)

Valterovi klima dijagrami su zasnovani na normalnim mesečnim temperaturama i srednjoj količini padavina na posmatranom lokalitetu. Specifičnost ovih dijagrama je prikazivanje temperatura i padavina na zajedničkom grafikonu korišćenjem razmere na kojoj 1 °C odgovara 2 mm padavina. Na osnovu međusobnog odnosa krivih koje prikazuju godišnji hod padavina i temperatura na Valterovom klima dijagramu moguće je analizirati vodni bilans i aridnost područja. Kada se kriva padavina nalazi ispod krive temperature to ukazuje na negativan vodni bilans i aridnost lokaliteta u posmatranom periodu. U suprotnom, kada se kriva padavina nalazi iznad krive temperature to ukazuje na pozitivan vodni bilans područja u posmatranom periodu. Originalni Valterovi dijagrami su dizajnirani tako da mogu sadržati i niz dodatnih informacija, kao što su godišnje padavine ili ekstremne vrednosti u različitim mesecima. Jedan primer Valterovog dijagrama sa brojnim dodatnim informacijama može se videti na slici 12.2 na kojoj je prikazano suvo leto mediteranske klime u Firenci (Italija).



Mesec	Temp	Padavine
Jan	6,1	67,1
Feb	8,1	67,2
Mar	10,1	75,3
Apr	13,0	69,5
Maj	17,4	62,9
Jun	21,2	49,0
Jul	23,9	35,6
Avg	23,7	59,9
Sep	20,1	68,7
Okt	15,3	78,6
Nov	10,6	110,7
Dec	6,8	82,0

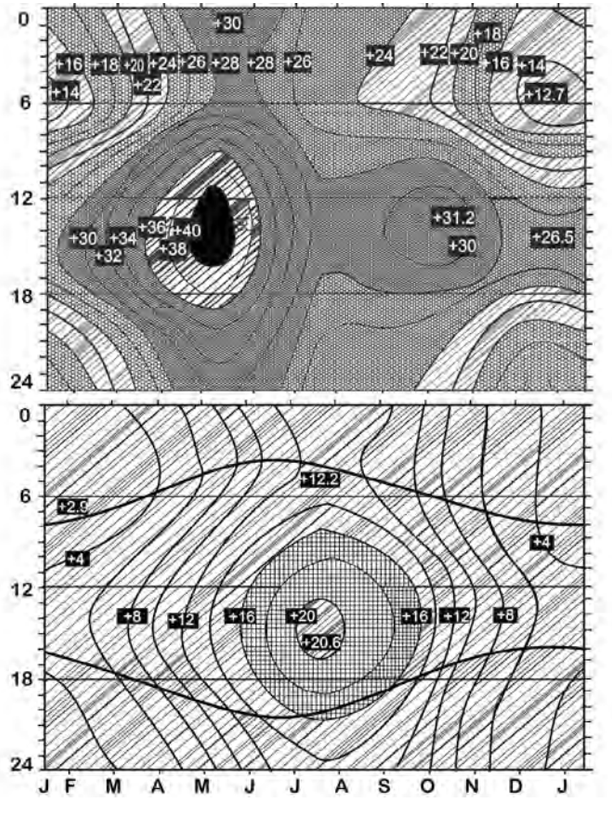
Slika 12.2.

Klimatski dijagram prema za Firencu, Italija
[modifikovano, izvor: https://climatecharts.net/]

Čak i jednostavni klimatski dijagrami, kao što je Valterov dijagram, mogu pružiti vredne informacije o sezonskim karakteristikama klime koje su od posebnog značaja za poljoprivrednu proizvodnju.

Drugačiji tipovi klimatskih dijagrama mogu kombinovati i druge klimatske elemente značajne za poljoprivredu. Na primer, na slici 12.3 predstavljena je kombinacija srednjih dnevnih i godišnjih temperatura i dužine dana na dva različita lokaliteta koji jasno ukazuju na različite uslove gajenja.

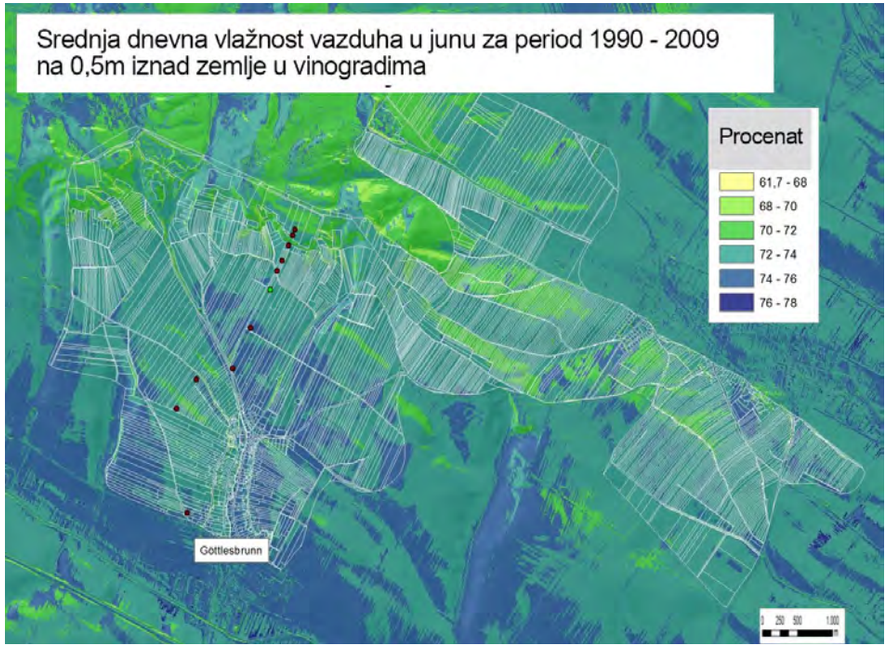
Međutim, u mnogim slučajevima proizvođačima su potrebni lokalni klimatski uslovi visoke prostorne rezolucije koji se usled, recimo, uticaja reljefa i vrste podloge mogu znatno razlikovati od podataka iz udaljenih meteoroloških stanica ili vrednosti dobijenih mapiranjem na velikim prostornim razmerama. Ovakve potrebe javljaju se kod uzgoja vinove loze i proizvodnje vina da bi se definisali regioni koji su sa stanovišta klime pogodni za proizvodnju. U tom slučaju, potrebno je uložiti dodatne napore da se generišu podaci i utvrde topografski uticaji na lokalnu klimu. Mogu se primenjivati različiti pristupi kao što su: horizontalna gradijentna merenja mikroklimatskih elemenata na ograničenom području, uključivanje podataka dobijenih daljinskim merenjima (engl. *remote sensing*) i izvođenje algoritama za izračunavanje promene temperature vazduha na malim razmerama zbog uticaja blizine velikih vodenih površina (jezera, reka, mora), kao i orijentacije i nagiba terena.



Slika 12.3.

Kombinacija dnevnog i godišnjeg hoda temperature i dužine dana za Nagpur (tropska klima) i Oksford (atlantska klima) kao važnih faktora za gajenje useva.

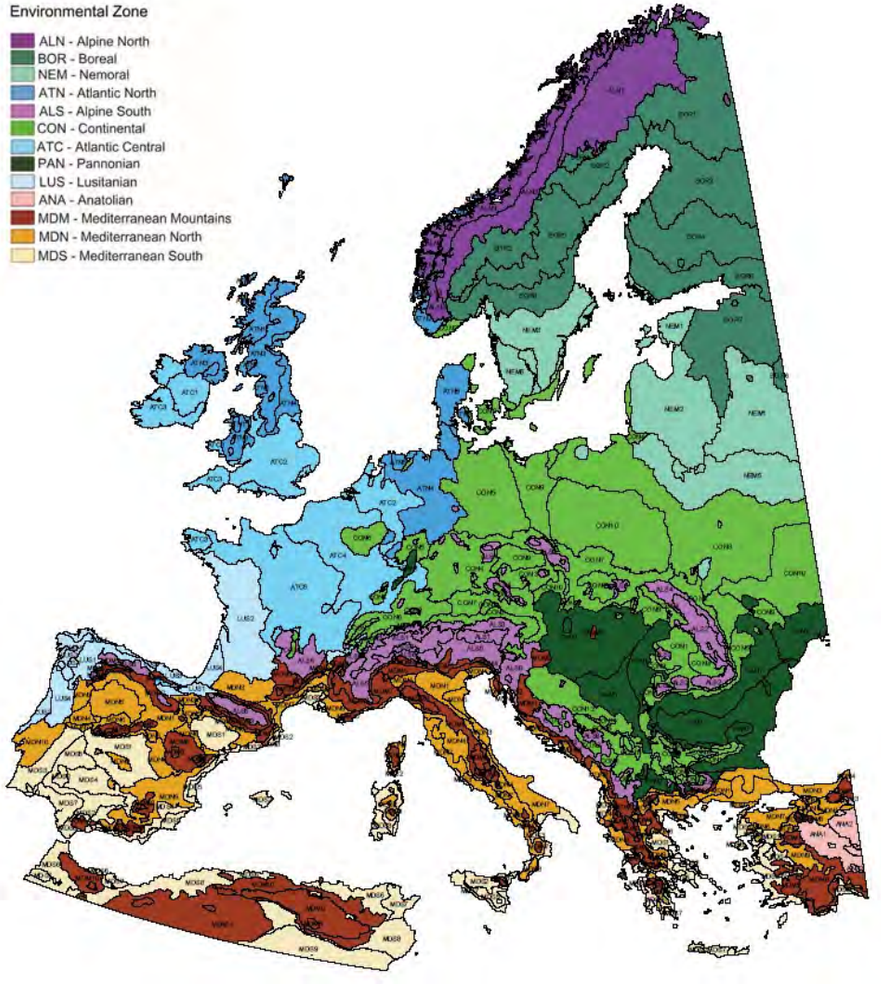
Jedno istraživanje ove vrste je sprovedeno u vinogradarskom regionu Karnuntum u Austriji sa ciljem da se izradi karta sa karakteristikama teroara (klima, zemljište, podloga) kao glavnim faktorima vinogradarstva. Kao ishod istraživanja, kroz različite tematske slojeve (tradicionalno korišćene sorte, način proizvodnje i dr.) i analize geografskih podataka opisane su geoekološke karakteristike ovog vinogradskog regiona i izdvojene su homogene višeslojne jedinice mapirane pomoću Geografskog informacionog sistema (Geographic Information System - GIS). Rezultati su pretvoreni u interaktivne internet mape (http://www.geologie.ac.at/en/research-development/mapping/substrate-floor/natural-region-carnuntum/).



Slika 12.4.

Prikaz srednje vrednosti relativne vlažnosti vazduha na malim razmerama (parametrisano na mikroklimatske uslovime u vinogradima) u junu u vinogradarskoj regiji Austrije (bele linije predstavljaju vinograde) [izvor: BOKU-Met]

U novije vreme je dizajnirano nekoliko sofistikovanih mapa za različite uslove životne sredine (engl. environmental map) u koje je uvršćen veći broj parametara koji opisuju i klimatske karakteristike područja. Iz tog razloga ove mape se mogu koristiti kao referentne mape prilikom izrade studije uticaja klimatskih promena. Primer je mapa stratifikacije životne sredine Evrope (Metzger et al., 2005) u kojoj je uz klimatske faktore uzeta u obzir i geomorfologija, geologija, zemljište, vegetacija i životinjski svet posmatranog područja kao glavne komponente ekosistema (slika 12.5). Podaci prikazani u tabeli 12.1 u ovom poglavlju odgovaraju podacima prikazanim na ovoj mapi.



Slika 12.5.

Raspodela zona životne sredine u Evropi (Metzger et al., 2005)

12.3. Klimatske promene

Klimatski sistem Zemlje je dinamički sistem koji obuhvata atmosferu, hidrosferu, kriosferu, biosferu i litosferu, a karakterišu ga varijacije koje nisu u potpunosti predvidljive. Neophodno je naglasiti da su globalne klimatske promene

proces koji se neprestano odvija pod uticajem kako prirodnih tako, od nedavno, i ljudskih faktora. Varijacije i promene[27] klime cele planete vidljive su u rasponu od nekoliko miliona godina pa do nekoliko decenija (IPCC, 2013).

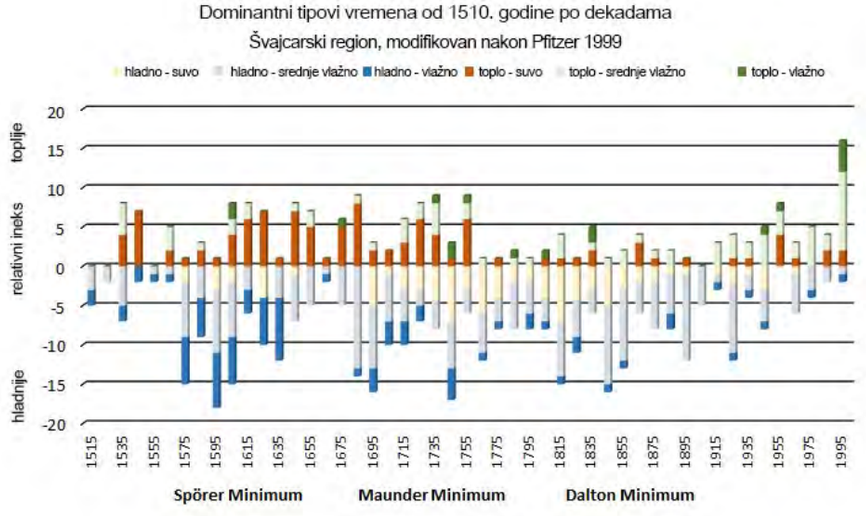
Jedan od najupečatljivijih efekata promene klime na Zemlji je smena ledenih doba čiji se uzroci i efekti posmatraju u vremenskom periodu od nekoliko milenijuma. Objašnjenjenje pojave ledenih doba koje je danas opšteprihvaćeno u nauci dao je 1920. godine srpski naučnik Milutin Milanković. Prema njegovoj teoriji, koja se zasniva na tri astronomska ciklusa, glavni uzroci pojave ledenog doba su: a) promene ekscentričnosti Zemljine orbite (od kruga do izdužene elipse), b) promena nagiba Zemljine ose rotacije i c) precesija odnosno revolucija Zemljine ose rotacije. Ova tri (Milankovićeva) ciklusa su prirodni faktori koji se sporo menjaju, ali dramatično utiču na količinu i raspodelu energije koja u nekom trenutku stiže od Sunca do gornje granice atmosfere a potom i do tla. Izmene apsorbovane količine sunčevog zračenja menjaju temperaturu vazduha što dovodi do promena globalne atmosferske cirkulacije, okeanskih struja i kriosfere, pored ostalog, a time utiču i na klimu planete, njenu varijabilnost i promene.

U savremeno doba, tokom perioda od nekoliko godina, uobičajene su fluktuacije globalne površinske temperature od nekoliko desetih delova jednog stepena. Neke od ovih fluktuacija vezane su za aktivnost sunca, velike erupcije vulkana, El Ninjo – južnu oscilaciju (ENSO), severnoatlantsku oscilaciju (NAO) i druge prirodne pojave. Pored antropogenih faktora, solarna i vulkanska dejstva su dva dominantna prirodna faktora koja doprinose globalnim klimatskim promenama tokom industrijske ere (IPCC, 2013).

Primer prirodnih klimatskih promena tokom proteklih 500 godina prikazan je na slici 12.6. Ove klimatske promene obuhvataju „malo ledeno doba" tokom srednjeg veka u Evropi u kome se izdvajaju tri perioda sa povećanim brojem veoma hladnih godina nazvani Sporerov (Spörer), Maunderov (Maunder) i Daltonov (Dalton) minimum. Počev od 19. veka koji odgovara početku industrijalizacije, vidljiv je značajan dodatni signal zagrevanja usled čovekovih aktivnosti vezanih za sagorevanja velike količine fosilnih goriva. Sa sigurnošću se može reći da je srednji godišnji porast temperature nastao u 20. veku, promenio dugoročne trendove hlađenja koji su postojali tokom proteklih 5000 godina na srednjim i velikim geografskim širinama severne hemisfere, što navodi i IPCC (2013). To ne znači da ljudi nisu uticali na klimu i u ranijim vremenima, na primer, krčenjem šuma i promenama namene zemljišta, ali su te promene ostajale uglavnom na

[27] Varijacije ili varijabilnost klime se odnosi na odstupanje klimatskih elemenata od višegodišnjeg proseka tokom kraćeg vremenskog perioda (mesec, godišnje doba, vegetacioni period) i ne mora da dovede do promene klimatoloških srednjih vrednosti. Kllimatske promene se uvek odnose na promene višegodišnjeg proseka posmatranih elemenata tokom najmanje 30 godina, posmatrano u odnosu na neki prethodni 30-o godišnji period.

regionalnom nivou (npr. promena regionalne klime) i svakako nisu bile glavni faktor u izazivanju globalnih klimatskih promena.



Slika 12.6.

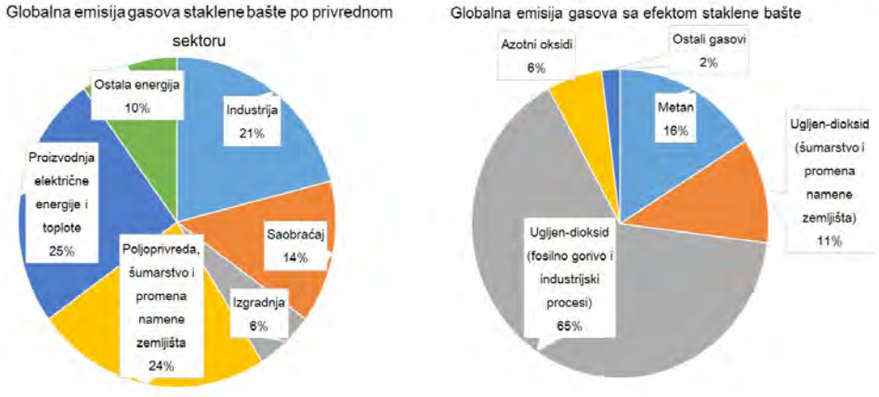
Godišnji vremenski uslovi po dekadama tokom perioda 1505-2000 (opis klasifikovanja: toplo-suvo (crveno); toplo vlažno (tamnozeleno); toplo (svetlozeleno), hladno-suvo (žuto); hladno-vlažno (tamnoplavo); hladno (svetloplavo) (prema Pfister, 1999, iz Eitzinger et al., 2009)

Osnovni problem koji je povezan sa tada započetim zagrevanjem je da se ono odvija relativno brzo, da utiče na mnoge ekološke procese i da, u kombinaciji sa drugim ljudskim aktivnostima, može direktno i indirektno uticati na pogoršanje životnih uslova čitavog ljudskog društva na Zemlji u budućnosti.

Većina naučnika smatra da su emisije ugljen-dioksida (CO_2), metana (CH_4), azot-suboksida (N_2O) i drugih gasova staklene bašte glavni pokretači današnjeg trenda globalnog zagrevanja. Ovi gasovi (slika 12.7b) emituju se u atmosferu kao posledica ljudskih aktivnosti u različitim privrednim delatnostima (slika 12.7a) i mogu izazvati trajne promene klime. Vrlo je verovatno da su ljudske aktivnosti izazvale više od polovine uočenog porasta globalne površinske temperature u periodu 1951–2010. godine, o čemu temeljno svedoče rezultati mnogobrojnih istraživanja dobijeni različitim naučnim metodama (IPCC, 2014).

Koncentracija CO_2 u atmosferi porasla je za oko 33% od predindustrijskog vremena (oko 407 ppm u 2017. godini, sa trendom rasta do danas) uglavnom usled sagorevanja fosilnih goriva i promene namene podloge (npr. krčenje šuma). Povećanje koncentracije gasova staklene bašte od 1750. godine do danas dovelo je

do povećane apsorpcije dugotalasnog zračenja (razlika između dolaznog i odlaznog dugotalasnog zračenja povećala se za 2,2 W m^{-2}) sa tendencijom zagrevanja površine i promena klime.



Slika 12.7.

Udeli u stvaranju globalnih emisija gasova staklene bašte (zasnovani na ekvivalentu CO_2) prema privrednim delatnostima (levo) i udeli različitih gasova staklene bašte u ukupnom sadržaju gasova staklene bašte (desno)
[izvor: IPCC, 2014]

Pokazalo se da su neki od Evropskih agroekosistema i privrednih sektora posebno osetljivi na nove trendove promene temperature i padavina (Alexandrov et al., 2011). Fenomeni koji su proučavani uključuju (IPCC, 2013; APCC, 2014; Eitzinger et al., 2009):

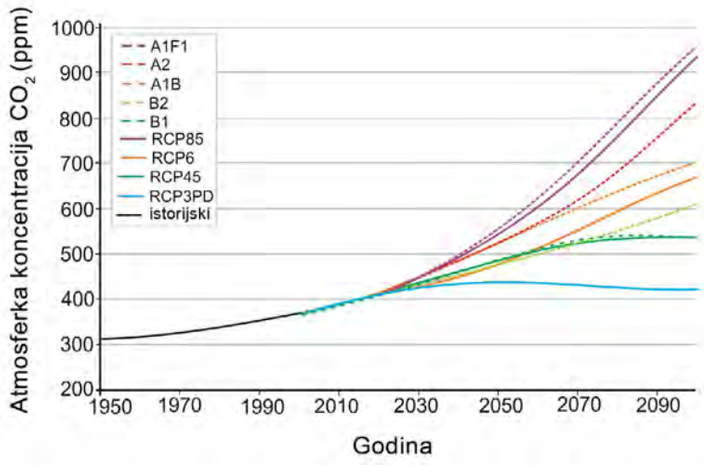
- pomeranje granice šuma prema većim geografskim širinama;
- fenološke promene (raniji početak prolećne vegetacije i produženje vegetacionog perioda);
- povećanje produktivnosti šuma i njihovog usvajanja atmosferskog ugljenika;
- promene u tipovima vegetacije na visokim planinama i pojave nove alpske vegetacije na planinskim vrhovima;
- povećan stres kod useva tokom toplijih, sušnijih leta i povećani rizik od grada u severnoj Evropi;
- raniji početak vegetacionog perioda za većinu voćnih vrsta u Nemačkoj;
- povećanje površina na kojima se gaji silažni kukuruz u Velikoj Britaniji i južnoj Skandinaviji kao i povoljniji uslovi za poljoprivrednu proizvodnju koji su posledica viših temperatura tokom leta;

- produžena sezona gajenja vinove loze u Francuskoj dovela je do promene kvaliteta vina.

Globalne klimatske promene imaće uticaja na sve privredne delatnosti, ali poljoprivredna proizvodnja je verovatno najosetljivija i najugroženija, jer je klima primarni faktor koji utiče na produktivnost. Svetska poljoprivreda, kako u zemljama u razvoju tako i u razvijenim zemljama, i dalje u velikoj meri zavisi od klimatskih uslova. Poljoprivreda u Evropi čini samo mali deo bruto domaćeg proizvoda (BDP), tako da privreda, uopšteno posmatrano, nije u velikoj meri pogođena uticajima klimatskih promena na poljoprivredu. Međutim, lokalni uticaji na društvo mogu biti veoma veliki i nikako ne treba da budu zanemareni.

Pitanje globalne i regionalne klimatske varijabilnosti i promena, kao i njihovog uticaja na ekosisteme, nepobitno je jedno od najvažnijih pitanja vezanih za očuvanje životne sredine sa kojima se čovek suočava na početku 21. veka (IPCC, 2013). Promene klime u budućnosti mogu se proceniti, na osnovu pretpostavljene vremenske promene faktora koji utiču na bilans dolaznog i odlaznog zračenja (emisija GHG i promena namene podloge) i pomoću globalnih klimatskih modela (klasičnim klimatskim modelima koji simuliraju procese u atmosferi i okeanu pridodati su modeli biogeohemijskih procesa). Rezultati ovih izračunavanja, koja izvode i primenjuju različite istraživačke grupe koristeći različite modele mogu se pronaći u Petom izveštaju IPCC (IPCC, 2013; IPCC, 2014).

Globalne klimatske simulacije, koje su deo današnje strategije u adaptaciji na klimatske promene, uključuju četiri moguća scenarija kada se radi o promeni koncentracije gasova staklene bašte (nazvanom RCP – engl. *Representative Concentration Pathways*). Prema ovim scenarijima, najveće promene u koncentraciji i najznačajniji efekti se očekuju nakon 2040. godine (slika 12.8).



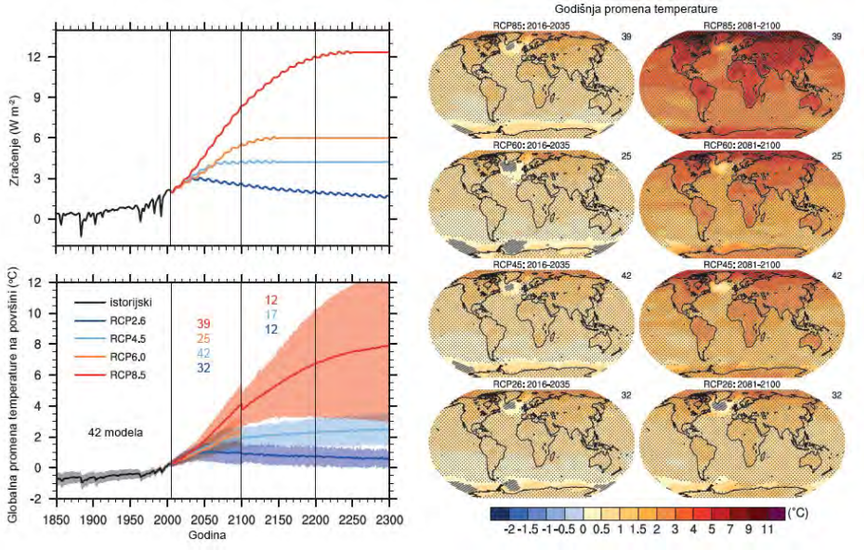
Slika 12.8.

Očekivana koncentracija CO_2 u atmosferi iz SRES[28] scenarija i aktuelnih RCP scenarija (modifikovano, prema Kotlarski and Truhetz, 2017)

Samo kod najniže od ovih krivih, globalno zagrevanje bi najverovatnije ostalo u okviru globalno definisanog cilja maksimalnog zagrevanja od 2 °C. Ovaj scenario podrazumeva intenzivno smanjenje emisije gasova staklene bašte. Najviša kriva vodi do porasta temperature za oko 4,5 °C (globalna srednja vrednost) od druge polovine 19. veka do 2100. godine (sa tendencijom daljeg rasta). Do približno 2040. godine, razlike između krivih nisu značajne ali su očekivanja za drugu polovinu 21. veka različita. Zagrevanje se razlikuje regionalno, ali i globalno posebno između površine zemljišta i okeana (slika 12.9).

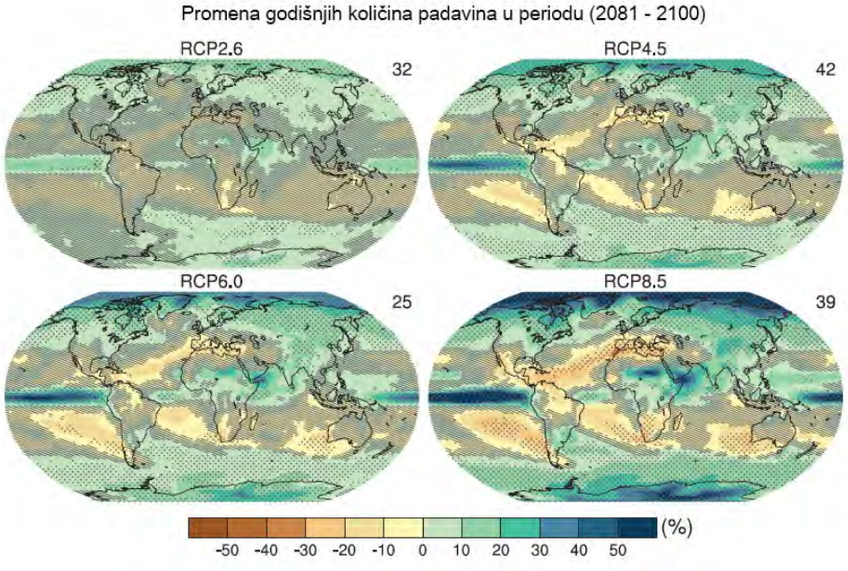
Očekivane promene količine padavina i njene prostorne distribucije su takođe neujednačene (slika 12.10). Brojni scenariji predviđaju da će inače vlažni regioni i godišnja doba sa velikom količinom padavina, verovatno, dobiti dodatnu količinu padavina, a suvi manju (slika 12.9). Takođe se očekuje širenje suvih regiona prema većim geografskim širinama. Zagrevanje okeana i topljenje leda vodi ka povećanju nivoa mora, za koje se očekuje da bude u rasponu od 0,25 m do 1,0 m do 2100. godine.

[28] SRES (engl. Special Report on Emissions Scenarios) je skraćenica, ali i često korišćeni naziv za izveštaje o izmerenim i očekivanim emisijama GHG koje je u više navrata objavio Međunarodni panel o klimatskim promenama (IPCC)



Slika 12.9.

Intenzitet upadnog zračenja prema različitim scenarijima emisija (levo gore) i odgovarajući simulirani trendovi srednje globalne temperature do 2100. godine dobijeni upotrebom više klimatskih modela (osenčena površina sa rasponom rezultata modela) (levo dole). Raspodela simuliranih promena srednje globalne temperature u svetu za dva perioda i četiri različita klimatska scenarija (desno) (IPCC, 2013)



Slika 12.10.

Raspodela očekivanih promena godišnjih količina padavina u periodu 2081–2100. i četiri RCP klimatska scenarija (IPCC, 2013)

Klimatske simulacije su rezultat rada klimatskih modela koji uključuju različite scenarije emisije gasova staklene bašte, urbanizacije, promene u naseljenosti i stanju biosfere. Rezultati simulacija, obavljenih sa više globalnih klimatskih modela, dostupni su u obliku ansambla[29] datoteka. Uobičajeno je da se rezultati ovakvih simulacija koriste kao ulazni meteorološki podaci u modelima biljne proizvodnje za simulaciju prinosa i dinamike vegetacije različitih useva. U daljem tekstu će biti prikazani rezultati simulacija različitih klimatskih modela ili će ovi rezultati biti korišćeni za procenu uticaja klimatskih promena na prinos nekih kultura. Na slikama i u tabelama će ovi podaci biti označeni kao „klimatskih scenariji" i skraćenice koje su korišćene su uobičajene oznake za brojne modele koji se koriste u analizi očekivanih promena klime. Neke od oznaka na koje će čitalac najčešće nailaziti su: ECHAM3, ECHAM4, NCAR i HadCM3, koje označavaju klimatske modele dok, recimo, SRES A2 označava scenario emisije GHG koji je korišćen u simulacijama klime.

[29] U ovom kontekstu reč "ansambl" se odnosi na više datoteka sa vrednostima meteoroloških elemenata za nekoliko decenija unapred koje su dobijene na osnovu simulacija klimatskih modela. Svaka datoteka se odnosi na isti period i reprezentuje različite, moguće realizacije klime tokom najmanje 30 godina.

Neodređenosti simulacija globalnih klimatskih modela značajne su na lokalnom nivou. Naime, globalni klimatski modeli rade simulacije za velike prostorne razmere. Iako je rezolucija globalnih modela sve veća (manja od nekadašnjih 100 km), oni i dalje često ne mogu da sadrže važne informacije jer je na tako velikim razmerama nemoguće precizno predstaviti topografiju ili vrstu podloge. Zbog toga su razvijeni statistički modeli i regionalni klimatski modeli veće prostorne rezolucije koji imaju zadatak da na osnovu rezultata globalnih klimatskih simulacija daju informaciju o promenama klime na manjim prostornim razmerama. Ovi modeli su od posebnog značaja kod određivanja uslova za razvoj biljaka u ekstremnim vremenskim uslovima. Međutim, izvesno je da će i globalni klimatski modeli imati, s vremenom, sve bolju prostornu rezoluciju.

12.4. Uticaj klimatskih promena na poljoprivredu

Poslednjih godina 20. veka postali su uočljivi efekti klimatskih promena u Evropi, ali i u čitavom svetu. Uočene promene su u skladu sa projekcijama uticaja antropogenih faktora na klimu. Trend globalnog zagrevanja i promena prostorne raspodele padavina su već imale značajnog uticaja na mnoge ekosisteme (npr. Orlandini et al., 2008; IPCC, 2013).

U očima javnosti često se javlja pitanje: „Zašto je povećanje temperature od 3 °C u periodu od 30 godina problem, kada se iste promene redovno javljaju tokom jednog dana?" Odgovor na ovo pitanje je vezan za nekoliko važnih činjenica koje treba imati u vidu kada se radi o promenama klime i globalnom zagrevanju. Prvo, kada se govori o promeni temperature uvek se misli na prosečnu promenu na celoj planeti. Prema tome porast globalne temperature od 3 °C znači da na jednom mestu temperatura može da poraste za 1 °C, dok na drugom može da poraste i za 5 °C. Drugo, treba imati u vidu toplotu koja je zadržana u atmosferi da bi njena temperatura porasla za, recimo, 3 °C. Ta toplota je potpuno neravnomerno raspoređena i može biti potrošena na različite procese (topljenje leda, isparavanje sa slobodne vodene površine, povećanje temperature morskih struja, itd.). Male promene temperature u određenim periodima mogu da utiču na živa bića preko kumulativnih efekata, kao što su akumulisani stresni dani ili sume temperatura koje definišu fenologiju.

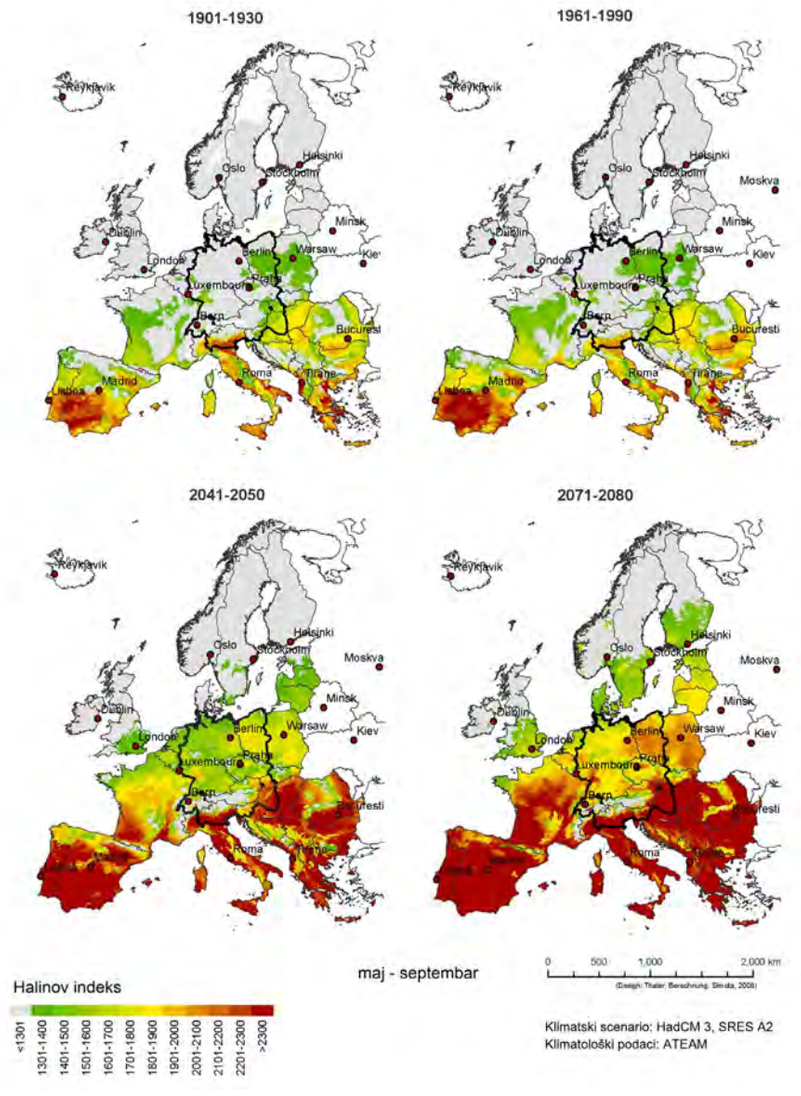
Potencijalni uticaj budućih klimatskih promena na poljoprivredu i proizvodnju hrane su, generalno gledano, složeni i sadrže mnogo neodređenosti. Procesno orijentisani modeli (vidi glavu 11) predstavljaju najnaprednije alate za izradu studija uticaja klimatskih promena na biljnu proizvodnju i složene interakcije u sistemu zemljište–biljka–atmosfera. Međutim, i ovi modeli takođe predstavljaju samo pojednostavljenje različitih procesa i oslanjaju se na definisane granične uslove. Zbog toga je primenljivost rezultata dobijenih u ovim studijama ograni-

čena. U poljoprivredi su, primenom agroklimatskih modela različite složenosti, istraživani uglavnom specifični aspekti uticaja klimatskih promena, kao što je uticaj ovih promena na prinos ili dinamiku vegetacije. Takođe, ispitivan je i uticaj tipova zemljišta i primenjenih agrotehničkih mera na prinos pri različitim scenarijima klimatskih promena.

Generalno gledano, rezultati ovih studija uticaja klimatskih promena pokazuju da bi u mnogim regionima srednje i južne Evrope sve češći i dugotrajniji letnji sušni periodi (prema većini scenarija klimatskih promena) mogli uticati na visinu prinosa usled smanjenja raspoloživih rezervi vode u zemljištu, posebno u uslovima lošeg zemljišta (npr. kod niskog vodnog kapaciteta zemljišta). S druge strane, doći će do negativnog uticaja na prinose usled povišene temperature i skraćivanja perioda gajenja na mnogim lokalitetima, što će se delimično moći nadoknaditi efektom porasta nivoa CO_2 u atmosferi kroz povećanje intenziteta fotosinteze i efikasnosti korišćenja vode. U regionima sa povećanim količinama padavina ili na područjima koja nemaju ograničenu količinu vode za useve, povišene temperature mogu povećati proizvodni potencijal za mnoge useve (npr. produženim vegetacionim periodom za višegodišnje useve ili otklanjanjem ograničavajućih temperaturnih faktora za rast useva).

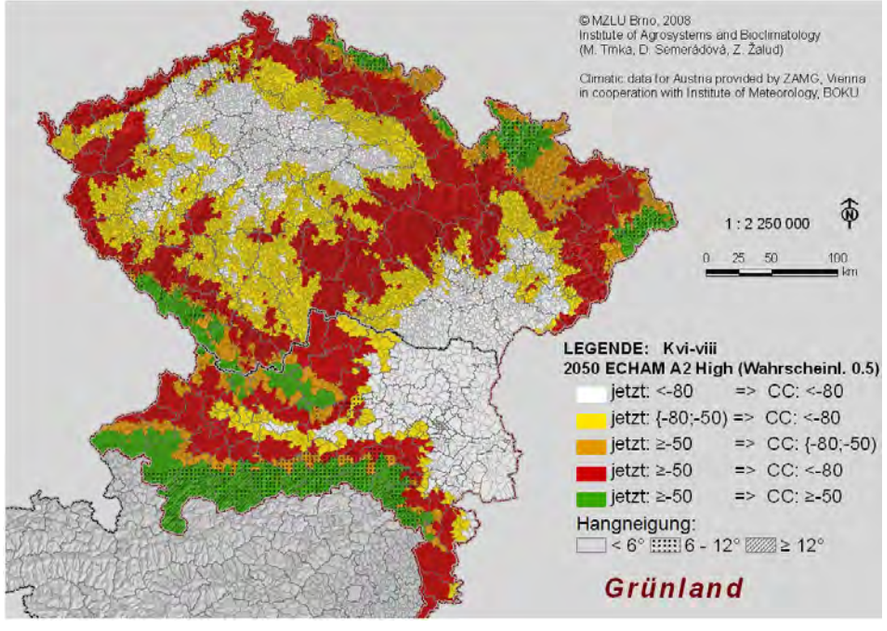
Agroklimatski indikatori ukazuju na uticaj klime i klimatskih promena na promene specifičnih uslova gajenja kao što su, recimo, promene akumulisanih stepen dana tokom vegetacionog perioda, promena dinamike razvoja useva, učestalost rizika od mraza ili rizika od erozije zemljišta. Na slici 12.11, na primer, prikazana je očekivana promena Halinovog indeksa određena na osnovu očekivanih suma temperatura vazduha (vidi glavu 8). Prikazani rezultati ukazuju na povoljnost pojedinih regiona za gajenje vinove loze u prošlosti i budućnosti. Očekivani trend porasta temperature u Evropi u toplom delu godine bi mogao da pomeri granicu potencijalne klimatske podobnosti područja za gajenje vinove loze na više geografske širine. Slični rezultati istraživanja dobijeni su, korišćenjem procesno orijentisanih modela biljne proizvodnje i za druge useve, naročito one kojima je za rast i razvoj potrebna viša temperatura, kao što su silažni kukuruz i semenski kukuruz, soja i suncokret.

Agroklimatski indeksi se takođe mogu kombinovati da bi se opisala kritična klimatska ograničenja za gajenje određenih useva ukoliko su svi ostali uslovi optimalni. Takav primer je prikazan na slici 12.12 koja pokazuje promene vodnog bilansa i proizvodni potencijal višegodišnjih travnjaka izračunate na osnovu očekivanih temperatura i padavina prema A2 (pesimističnom) klimatskom scenariju.



Slika 12.11.

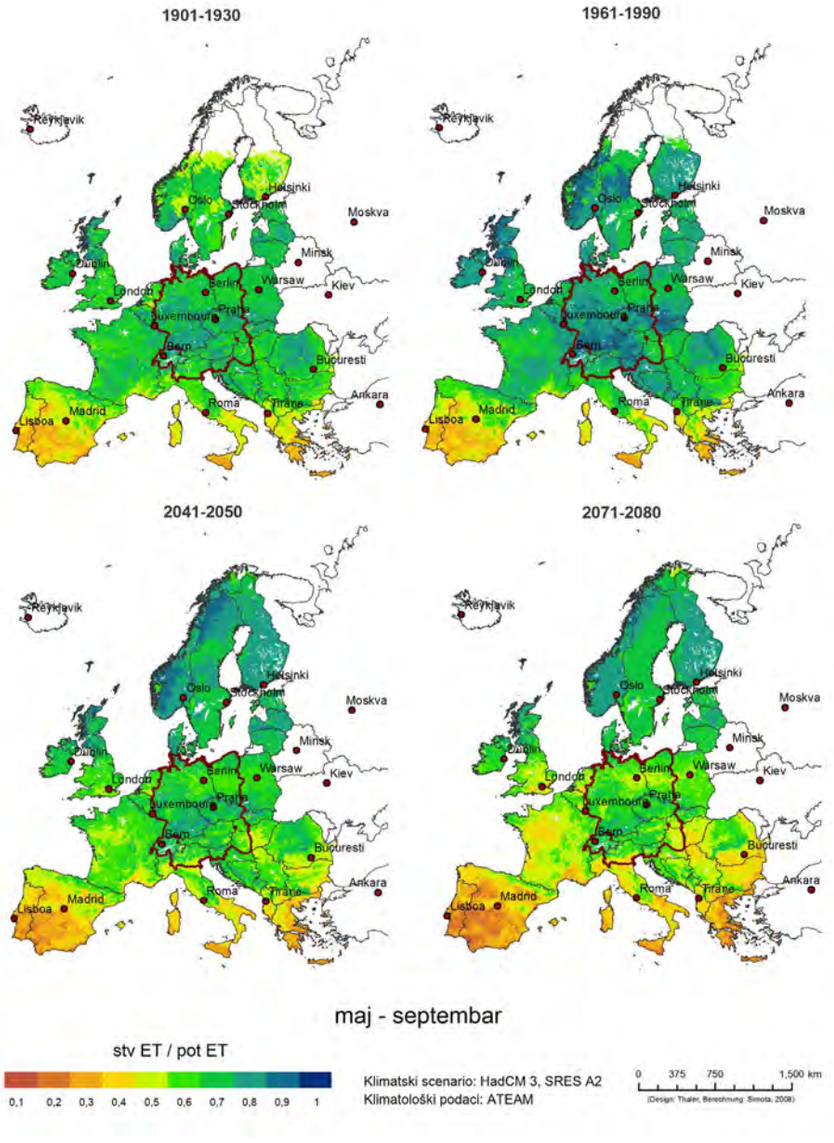
Halinov indeks za Evropu za različite klimatološke periode u prošlosti i budućnosti (zeleno: niže sume temperatura, crveno: više sume temperatura) (prilagođeno iz Eitzinger et al., 2009).



Slika 12.12.

Promena vodnog bilansa prema indikatorima za period gajenja višegodišnjih travnjaka usled klimatskih promena (A2 scenario za 2050. godinu) u Austriji i Češkoj (zelena= bez promena ili poboljšani uslovi; druge boje: povećanje negativnog vodnog bilansa tokom leta što vodi ka opadanju potencijala prinosa) (prilagođeno od Eitzinger et al., 2009)

Na slici 12.13 prikazana je varijacija prosečnog broja sušnih dana za travnate površine u Evropi u prošlosti i budućnosti. Sušni dani, odnosno intenzitet suše je određen na osnovu odnosa stvarne i potencijalne evapotranspiracije. U Evropi se jasno izdvajaju regioni sa izraženim trendom sušenja, odnosno povećanja vlažnosti tokom 20. i 21. veka. Na prikazanim mapama se naročito ističe južnoevropski (Sredozemni) region koji bi prema svim scenarijima klimatskih promena trebao da postane značajno suvlji.



Slika 12.13.

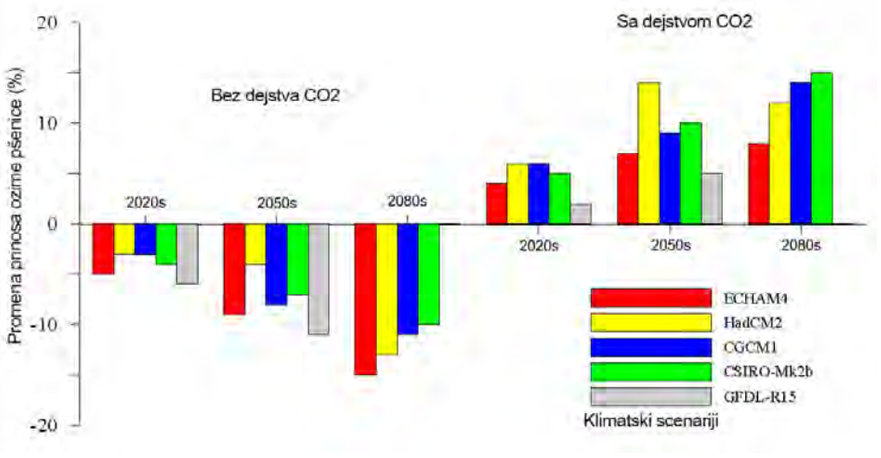
Odnos stvarne i potencijalne evapotranspiracije stalnih travnjaka u periodu od maja do septembra kao indikatora sušnosti (0,1-veoma suvo, 1-vlažno) u uslovima prošle i buduće klime za teritoriju Evrope (prilagođeno iz Eitzinger et al., 2009)

Uticaj klimatskih promena na poljoprivrednu proizvodnju u Evropi ispitivan je uz pomoć procesno orijentisanih modela biljne proizvodnje u mnogim istraživanjima sa različitim prostornim razmerama, za različite klimatske scenarije i načine poljoprivredne proizvodnje (White et al, 2011; Olesen et al., 2011). U većini studija razmatran je uticaj promena klimatskih elemenata (temperature, padavina, relativne vlažnosti vazduha, intenziteta sunčevog zračenja), korišćenjem njihovih simuliranih vrednosti kao ulaznih meteoroloških podataka u modelima biljne proizvodnje. Na ovaj način je moguće sagledati efekat suše i ekstremnih temperatura ali ne i grada ili poplava (Rötter et al., 2018) jer ove veličine nisu uključene u procesno orijentirane modele biljne proizvodnje. Pored toga, mnoge studije se oslanjaju na aktuelnu tehnologiju proizvodnje i sorte koje se trenutno koriste, dok se efekat povećanja koncentracije CO_2 na rast biljaka često ne uzima u obzir ili je neizvestan u zavisnosti od sorte. Takođe, poznato je da se očekuje promena koncentracije ostalih gasova staklene bašte kao što je npr. ozon, koji mogu značajno da utiču na prinos u narednim godinama a koji još uvek nisu direktno uključeni u modele biljne proizvodnje.

Povećanje koncentracije CO_2 može značajno uticati na prinos useva i zato je važno da je reakcija useva na ove promene, u modelima biljne proizvodnje, što realističnije prikazana. Na primer, studija simulacije uticaja klimatskih promena na ozimu pšenicu (Alexandrov et al., 2002) pokazuje povećanje prinosa u budućim klimatskim scenarijama u Austriji samo ako se uzme u obzir efekat „atmosferskog đubrenja" sa CO_2 i ako ne dođe do promene tehnologije proizvodnje (slika 12.14). Kako je efekat povećanja nivoa CO_2 neizvestan, jer zavisi od sorte, dugoročnih efekta u klimatskom sistemu i stanja životne sredine, moguće je i odsustvo reakcije useva na ove promene. U tom slučaju, u semi-humidnoj klimi Austrije (slika 12.14) i sam efekat promene klimatskih elemenata doveo bi do smanjenja prinosa, uglavnom zbog skraćenog vegetacionog perioda pojedinih sorti, čak i ako se uzmu u obzir raniji datumi setve. Međutim, u mediteranskoj klimi koja je leti suva, skraćeni vegetacioni period može dovesti i do povećanja prinosa žitarica, jer će usevi izbeći značajan temperaturni stres i sušu koja se javlja krajem proleća i početkom leta.

Uticajem klimatskih promena na promene vodnog bilansa i vodni stres kod useva na teritoriji Evrope bavilo se više istraživačkih grupa. Na primer, u klimatskim uslovima centralne Evrope ispitivana je proizvodnja ozime pšenice u severoistočnoj Austriji (e.g. Thaler et al., 2012) pomoću modela CERES-Wheat, koji uključuje i efekat „đubrenja" sa rastućim koncentracijama CO_2. Rezultati su pokazali da je, uprkos većim simuliranim prinosima, transpiracija useva opala u odnosu na trenutno stanje. Dobijeno povećanje prinosa je rezultat pretpostavljenog povećanja koncentracije CO_2 od dva puta, povećanja efikasnosti korišćenja vode i smanjenja ukupne potencijalne evapotranspiracije kao rezultat skraćenja

vegetacionog perioda. Kao krajnji rezultat, model je simulirao manji vodni stres za datu kulturu.



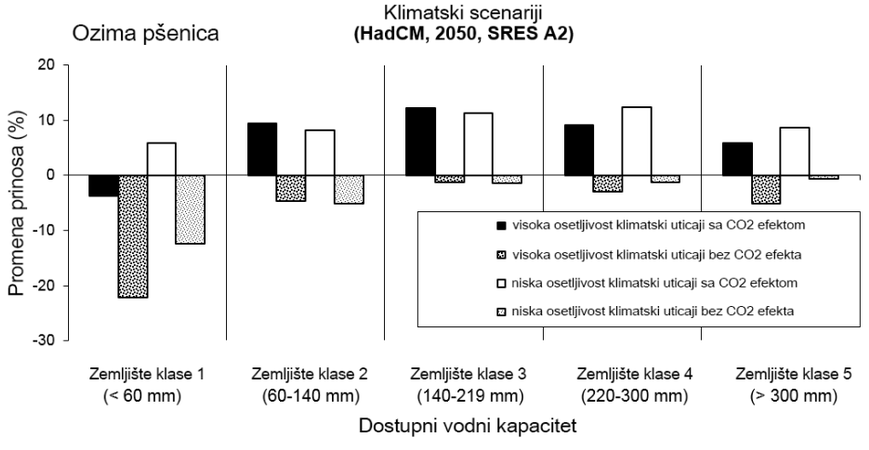
Slika 12.14.

Simulirani uticaj različitih scenarija klimatskih promena na prinos ozime pšenice u semi-humidnoj istočnoj Austriji sa efektom i bez efekta „atmosferskog đubrenja" sa CO_2, uz nepromenjenu tehnologiju proizvodnje i konstantne datume setve (prilagođeno iz Alexandrov et al., 2002)

Analize osetljivosti pokazuju da vodni kapacitet zemljišta može imati velik uticaj na potencijalni prinos u uslovima očekivanih promena klime, posebno na lokalitetima gde je voda ograničavajući faktor tokom perioda gajenja, kao što je slučaj u severoistočnoj Austriji. Slika 12.15 pokazuje rezultate simulacije za ozimu pšenicu za isto područje, prikazujući niz potencijalnih reakcija prinosa uzimajući u obzir različite klimatske scenarije, tipove zemljišta i direktan efekat CO_2. Primetno je da su simulirani trendovi prinosa negativni uglavnom na zemljištu sa niskim vodnim kapacitetom, ali i da će se negativni trend prinosa znatno povećati pod uticajem manjih koncentracija CO_2. Slični rezultati pretežno pozitivnih uticaja na prinose (osim na peskovitim zemljištima i suvim oblastima) predstavljeni su i u drugim istraživanjima na žitaricama u Evropi, uglavnom uz pretpostavku o povećanoj koncentraciji CO_2 (e.g. Kersebaum and Nendel, 2014). Slične rezultate dale su i simulacije kultura koje nisu žitarice, npr. krompira.

U poređenju sa C_3 kulturama, C_4 biljke kao što je kukuruz, bi trebale da imaju malu reakciju na dalje povećanje nivoa CO_2. Većina istraživanja na kukuruzu ukazuje stoga na povećanje potencijala prinosa u hladnijim i/ili vlažnim regionima usled povišenih temperatura (npr. severna Evropa, alpska regija) i na smanjenje proizvodnog potencijala u većini regiona južne Evrope, uglavnom

zbog povećanja učestalosti letnjih suša i uslova temperaturnog stresa. Međutim, eksperimentalni podaci dobijeni sa oglednih polja kukuruza pokazuju da pozitivan uticaj povećanja koncentracije CO_2, koji se ogleda kroz povećanje efikasnosti iskorišćenja vode, još uvek nije dobro opisan u modelima biljne proizvodnje (Durand et al. 2017). Takođe, značajan negativan efekat promena klime na prinos i dodatna potreba za navodnjavanjem mogu se, generalno, očekivati i za još nekoliko drugih useva u južnoj Evropi ili u regionima sa slabom dostupnošću vode iz zemljišta (Lobell and Field, 2007).



Slika 12.15.

Simulirani prinos ozime pšenice pri različitim klimatskim scenarijama, efektima „đubrenja" sa CO_2 i zemljištima različitih vodnih kapaciteta u severoistočnoj Austriji (Marchfield) [izvor: BOKU-Met]

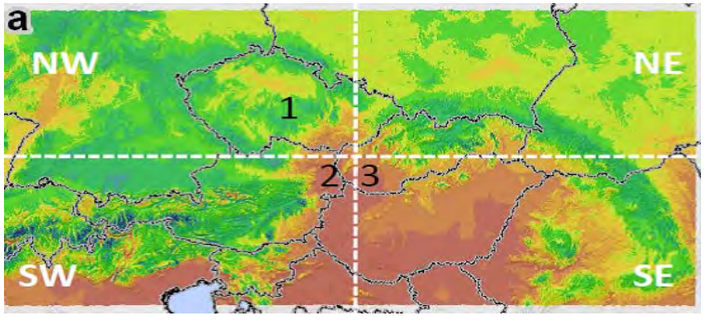
Jari usevi koji se, generalno, ne navodnjavaju imaju veći rizik po prinose zbog povećanja učestalosti i intenziteta letnjih suša i temperaturnog stresa koji su očekivani prema većini klimatskih scenarija. Ove kulture će biti još ugroženije i više će zavisiti od rezervi vode u zemljištu jer, za razliku od ozimih useva, ne mogu tokom zimskog perioda da koriste vodu iz zemljišta ili plićih podzemnih voda. Gubici usled evapotranspiracije tokom leta bi trebali znatno da se povećaju zbog povišenih temperatura. Takođe, mnoge studije zaključuju da ako se poveća učestalost i trajanje suše, na šta ukazuju novija istraživanja, ili se smanje rezerve vode u zemljištu i rezerve podzemnih voda (npr. smanjenim rečnim tokovima iz alpske regije tokom leta), nestašice vode bi leti postale češće, što bi na regionalnom nivou takođe moglo ograničiti dostupnost vode za navodnjavanje useva.

Faktor na koji usevi reaguju	Scenario i period integracije	Domen simulacije a	Usevi	Trend (+/0/-)	Komentari
Efektivno globalno zračenje	Svi do 2050.	NW, NE, SW, SE	Svi	++, +, -, -	Uticaj će biti negativan pogotovo u Panonskoj niziji
Suša / vodni stres		NW, NE, SW, SE	Svi	+, -, +, -	Povećava se nestašica vode tokom leta širom domena
Huglinov indeks		Svi	grožđe	+	Poboljšani uslovi gajenja.
Zimski uslovi		Svi	ozimi usevi i višegod. biljke	+	Poboljšanje zimskih uslova. Nala promena za uslove vernalizacije i rizik od kasnog mraza. Povećan rizik od erozije zemljišta.
Prolećni uslovi		SE, NW, NE, SW	Svi usevi	+, -, ++, -	Prolećni uslovi se poboljšavaju ili pogoršavaju u zavisnosti od regiona. Jesenji i ženveni uslovi se uglavnom poboljšavaju
Ispiranje nitrata (model biljne proizvodnje)	Svi do 2035.	Austrija – Marchfeld	ozima pšenica	++	Posebno na peskovitom zemljištu
			jari ječam	+	Posebno na peskovitom zemljištu
Štetočine – kukuruzni moljac	Svi do 2050.	NW	kukuruz	--	Veća najezda na kukuruz zbog novog prisustva štetočina na još neutvrđenim područjima. Pored toga, porast broja generacija štetočina u regionima sa dugoročnim prisustvom štetočina.
		NE		--	Slično kao u severozapadnom regionu.
		SW		-	Mali rast broja generacija.
		SE		-	Slično kao u jugozapadnom regionu.
Štetočine – kromirova zlatka	Svi do 2050.	NW	krompir, paradajz	--	Porast broja generacija.
		NE		--	Slično kao u severozapadnom regionu.
		SW		+	Hrvatska i sever Italije – povlačenje štetočina kao reakcija na visoki temperaturni stres.
		SE		+	Srbija i Mađarska – slično kao u jugozapadnoj oblasti.
Visina prinosa (indirektni uticaj)	SRES-A2 2050 visok ECHAM	Republika Češka – obradivo zemljište	ozimi ječam, ozima raž, ozima repica	-	Uglavnom negativan uticaj u nizijama
	SRES-A2 2050 visok HadCM			--	
	SRES-A2 2050 visok NCAR			-	
	Svi 2050.		jari ječam, jara pšenica, ovas	--	Posebno u regionima podložnim sušama (npr. Južnomoravski kraj, Češka)
Visina prinosa (kombinovani uticaji procenjeni modelima biljne proizvodnje)	Svi 2050.	Republika Češka – obradivo zemljište (1)b	ozimi ječam, ozima raž, ozima repica	++	Pozitivan uticaj posebno u regionima na većim nadmorskim visinama sa kvalitetnim zemljištem
	Svi 2035.	Austrija-Marhfeld (2)b	ozima pšenica	+	Stalan pozitivan uticaj na svim ispitivanim nadmorskim visinama
			jari ječam	+	Zavisi od tipa zemljišta (najizrazitiji prinos na srednjim zemljištima); dodatna potreba za vodom 30-40 mm.
				0	
	SRES A1B ARPEGE 2021-2051, 2071-2100.	Slovačka (Dunavska i Zagorska nizija (3)b)	ozima pšenica	+	Najviše ograničeno na peskovitom zemljištu; dodatna potreba za vodom
			jari ječam	+	Zavisi od tipa zemljišta (najstabilniji prinosi na černozemu)
			semenski kukuruz	-	Zavisi od tipa zemljišta (najstabilniji prinosi na černozemu); veća varijabilnost prinosa u periodu 2010–2051.
					Periodi suša tokom sezone gajenja smanjili prinos na svim posmatranim zemljištima; Veća varijabilnost prinosa u periodu 2010–2051.

Tabela 12.1.

Uticaj klimatskih promena na poljoprivrednu proizvodnju u centralnoj Evropi, izveden iz studija agroklimatskih indikatora, modela za simulaciju štetočina i simulacija biljne proizvornje (prilagođeno iz Eitzinger et al., 2013) (a = sektori posmatranog domena simulacije u Tabeli 12.1 odnose se na Sliku 12.16; b = odnosi se na regione prikazane na Slici 12.16)

Na osnovu simulacija izvedenih različitim pristupima u modeliranju, jedno istraživanje dalo je pregled efekata klimatskih promena u centralnoj Evropi (Eitzinger et al., 2013). Na slici 12.16 predstavljene su referentne vrednosti globalnog sunčevog zračenja kao primarnog faktora proizvodnje, a u tabeli 12.1 simulirane promene agroklimatskih indeksa i prinosa useva za različite očekivane scenarije klimatskih promena.



Slika 12.16.

Mapa srednje godišnje sume globalnog zračenja za period 1961–1990 (Sektori posmatranog domena simulacije: NW = severozapad; NE = severoistok; SW = jugozapad; SE = jugoistok, 1 = Republika Češka, 2 = Austrija (Marchfield), 3 = Slovačka (Dunavska i Zagorska nizija)) (prilagodjeno iz Eitzinger et al., 2013

12.5. Neodređenosti u studijama uticaja klimatskih promena na poljoprivredu

U izvođenju studija uticaja često je, usled nedostatka podataka ili metoda, nemoguće uzeti u obzir sve potencijalno značajne faktore životne sredine i informacije vezane za agrotehničke mere ili socio-ekonomske okvire, što predstavlja izvor neodređenosti pri procenjivanju uticaja klimatskih promena u budućnosti. Izvori neodređenosti mogu se naći na svim nivoima primene modela, uključujući neodređenosti zasnovane na predstavljanju posmatranih procesa u modelu, kao i na ulaznim podacima modela. Primer za prvu vrstu neodređenosti, na nivou biljne proizvodnje, je već pomenuti potencijalni efekat povećanja koncentracije atmosferskog CO_2 na rast biljaka i prinos ili neodređenost u predstavljanju rasta korena u modelima. Neodređenosti vezane za ulazne podatke mogu se zasnivati na greškama merenja ili neodređenostima ulaznih podataka (pogotovo ukoliko su zasnovane na rezultatima drugih modela, kao što su klimatološki scenariji izračunati globalnim klimatskim modelima).

U osnovi, primena modela je uvek kompromis između pojednostavljivanja procesa prikazanih u modelu (neodređenost rezultata simulacije raste sa povećanjem pojednostavljivanja simuliranih procesa) i potrebe za ulaznim podacima (u složenijim modelima neodređenost simuliranih rezultata raste sa povećanjem broja ulaznih parametara, koji nisu uvek dostupni ili postoji visok stepen neodređenosti u samim podacima).

Generalno posmatrano, mnoge neodređenosti su povezane sa problemom skaliranja[30] kada, recimo, postoje značajne razlike između ulaznih podataka u modelu i njihovih vrednosti skaliranih na razmere njive. Primer ovakve neusklađenosti je situacija u kojoj se ulazni podaci u modelu, koji se odnose na karakteristike zemljišta, uzimaju iz mape zemljišta visoke rezolucije, a ulazni podaci o vremenu iz podataka sa udaljenih stanica ili iz klimatskih modela niske rezolucije. Takođe, mnoge ekstremne vremenske pojave, kao što je grad, koje mogu imati dodatni negativni uticaj na visinu prinosa, nisu direktno predstavljene u klimatskim modelima. Simulacije regionalnih klimatskih modela se mogu znatno razlikovati od simulacija globalnih klimatskih modela i mogu mnogo bolje predstavljati lokalne uslove (npr. sezonska kolebanja temperature i padavina), mada često sa većim stepenom neodređenosti. Zbog toga bi za regionalne simulacije prinosa trebalo koristiti metode skaliranja na manji prostorni razmer, ako su pouzdane i dostupne. Često je izlaze iz regionalnih modela neophodno proveriti i korigovati u odnosu na istoriske podatke o meteorološkim elementima. Međutim, ovakva korekcija mora da uključi i vezu između meteoroloških elemenata.

12.6. Stručne procene kao dodatni izvor informacija

Da bi se smanjile navedene neodređenosti i nedostaci u rezultatima simulacija, potrebno je koristiti komplementarne izvore informacija. Prva opcija je da se za procenu uticaja kombinuju rezultati modela izvedeni iz različitih pristupa modeliranja (kao što su agroklimatski modeli/indeksi, modeli za štetočine i bolesti i procesno orijentisani modeli, kao što je prikazano u tabeli 12.1). Druga ili dodatna opcija je prikupljanje stručnih procena za određenu ciljnu oblast, da bi se obezbedilo ili poboljšalo prikazivanje simuliranih rezultata ili otklonila njihova ograničenja. U okviru jedne zajedničke akcije Evropskih stručnjaka (COST734) obavljena je analiza, dosada registrovanih, efekata klimatskih prome-

[30] U ovom kontekstu reč „skaliranje" se odnosi na izračunavanje vrednosti neke veličine na jednom prostornom razmeru na osnovu poznavanja njenih vrednosti na drugom. Recimo, na osnovu temperature izračunate za prostor dimenzija 10×10 km moguće je, uz poznavanje karakteristika tog prostora, izračunati temperaturu za svaki kvadrant dimenzija 1×1 km i time dobiti precizniju i verovatno tačniju informaciju. To je primer skaliranja sa većih na manje razmere. Obrnut slučaj je izračunavanje prinosa pšenice u nekom regionu na osnovu prosečnih prinosa izračunatih na pojedinačnim parcelama.

na na poljoprivrednu proizvodnju (Eitzinger, 2011). Svi zaključci su izvedeni na osnovu iskustava i rizika uočenih od strane lokalnih stručnjaka i proizvođača ili njihovih očekivanja nakon što su upoznati sa očekivanim promenama klime. Na slici 12.17 skala boja označava stepen pozitivnih (zelena) ili negativnih (crvena) efekata procenjenih od strane stručnjaka na osnovu očekivanih promena klime. Skraćenice navedene u prvoj koloni se odnose na pojedine evropske regione i preuzete su iz klasifikacije zona životne sredine koje su prikazane na slici 12.15.

Kao što se može videti prema prikazanoj stručnoj proceni najveći rizici, koji su posledica klimatskih promena, za gajenje izabrana tri useva u posmatranim regionima su: sezonske promene i varijabilnost klime, rizici od suše, ekstremnih temperatura, pojačana pojave postojećih ili pojave novih štetočina i bolesti, erozija zemljišta i grad. Pritom se mogu uočiti jasne razlike među regionima. Pozitivni trendovi koji su posledica promena klime mogu da se uoče kod poboljšanih uslova prezimljavanja, smanjenog rizika od mraza, promene trajanja perioda rasta i uslova žetve. Ako se ovakve stručne procene, koje se uglavnom zasnivaju na proučavanjima aktuelnih regionalnih trendova, slažu sa rezultatima simulacija,

	Dužina rasta	Prezimljavanje	Mraz	Odgovarajuća žetva	Sezonske varijacije	Suša	Temperaturni stres	Grad	Bolesti i štetočine	Korov	Erozija	Gubitak azota
a (ALN – nema podataka)												
BOR	1											
NEM	0		-1	0,5	1	1	0	0,5	1	1	1	1,5
ATN	1,3		-1	0	0,5	0,3	0	1	1,5	0	1	-1
ALS	0		0	1	1	1,7	1,3	1	1,5	0,5	1	0,5
CON	-0,9		-0,8	0,4	0,7	1,2	0,6	0,3	1,3	0,6	1	0,6
ATC	0,3		-1	-1	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7	1,3	0,3
PAN	0		0	0,4	1,7	2	1,5	1	1	1,5	0,8	0,5
LUS	-2		-1	1	1	2	2	0	0	1	1	0
MDM	-1			0	0	-1	-1	-2	0	0	0	1
MDN	-0,8		-0,7	-0,3	0,3	1,3	1	-0,1	0,5	0,8	0,8	0,8
MDS	-1		-0,3	0,3	0	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3
b												
ALN	2	-2	0	-1	2	0	1	0	-1	1	0	1
BOR	2	0,5	0	0,3	1,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,8

NEM	1,3	-1	-0,3	0,5	1	1	0,5	0,3	0,8	0	0	0,3
ATN	1,6	-0,6	0	0,5	0,8	1	0,4	0	0,3	1	0,3	0,5
ALS	1,1	0	0	1,1	1,3	1,8	1,3	0,5	1	0,3	0,5	0,7
CON	0,7	-0,4	-0,1	0,6	0,6	1,2	1	0	0,5	0,6	0,3	0,4
ATC	0,8	0	-0,3	0	1	0,5	-0,3	0	-0,3	0,3	0	0,3
PAN	0,7	0	0	0,3	1,5	1,3	1	0,5	0,7	0	0	0,3
LUS	1		0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
MDM	0	0	0	0,5	0,5	1	0	0	0	0	0	0
MDN	0,5	-0,3	0	0,3	0,8	0,8	0	0,3	0	0,5	0,5	0,5
MDS	0,5	0	0	0,3	0,3	0,8	0	0	-0,3	0,2	-0,3	0
c (ALN, BOR, NEM – nema podataka)												
ATN	1,5	-1	-1	1	1	0,5	0	1	1,5	0	1	1
ALS	0	-0,5	0	0	1	2	2	1	1,5	1	0	0
CON	-0,2	-0,8	-0,3	-0,2	1,3	0,6	0,4	0,5	1	0,3	1,2	1
ATC	0,3	0	-0,3	0,3	1	0,7	0,3	1	1	0,5	1	0,5
PAN	0,3	-0,7	0	0,4	1,7	0,4	0,5	1	0,8	1	0,8	0,5
LUS	-1		1	1	1	0	0	1	0	1	1	0
MDM	-1	0	0	-1	0	-1	-1	-2	-2	0	0	1
MDN	-1	-0,3	0,3	-0,3	0,3	1	0,8	0,3	0	0,8	0,8	0,8
MDS	-0,3	0,3	0,8	0,5	0,3	0,6	0,4	0,8	-0,3	-0,1	0,5	0,3

Slika 12.17.

Očekivani efekat klimatskih promena na faktore biljne proizvodnje za tri odabrana useva (a-semenski kukuruz; b-travnjaci; c-vinova loza) u različitim evropskim regionima (vidi sliku 12.5). Siva boja predstavlja površinu bez podataka (Nejedlik and Orlandini, 2008)

ove procene, ali i simulacije imaju sve veću težinu. One takođe mogu dopuniti rezultate simulacija rizika koji nisu uzeti u obzir ili mogu pružiti objašnjenja za odstupanja između simulacija i osmatranja na regionalnom nivou.

Na kraju, procene uticaja čine osnovu za razvoj mera adaptacije u poljoprivredi, sa ciljem da se smanji osetljivost poljoprivrede na aktuelne klimatske promene i smanje rizici u proizvodnji, kao što je navedeno u nastavku teksta.

12.7. Adaptacija poljoprivrede na klimatske promene

Vremenski i klimatski uslovi, kao najvažniji faktori poljoprivredne proizvodnje, umnogome određuju mere u organizaciji poljoprivredne proizvodnje. Poljo-

privrednici pokušavaju da se prilagode ovim uslovima da bi zadržali maksimalnu produktivnost i efikasnost korišćenja resursa, istovremeno smanjujući proizvodne rizike. Drugi važni ciljevi su održivost proizvodnje hrane (od poljoprivrednih gazdinstava do regiona) i zaštita biodiverziteta i ekosistema. Korišćenje raspoloživih poljoprivrednih tehnologija treba da obezbedi održivu proizvodnju u okviru datih klimatskih i vremenskih uslova kroz odgovarajuću organizaciju korišćenja prirodnih resursa ili uslova prilagođenih specifičnim poljoprivrednim sistemima.

Procena efekata mera adaptacije u poljoprivredi, prema očekivanim klimatskim scenarijima, je još složenije usled uticaja ljudskog faktora i drugih faktora neodređenosti. Međutim, postoje jednostavne i efikasne mere adaptacije koje se lako mogu sprovesti. Recimo, proizvodni potencijal se može održati pri toplijoj klimi prelaskom na useve ili kulture koje imaju više optimalne temperature rasta ili ranije vreme prolećne setve. Još jedna mogućnost je uvođenje novih hibrida i sorti, otpornih na stresne uslove indukovane klimatskim promenama (npr. suša i temperaturni stres, ozon, štetočine, bolesti itd.). Odabir, recimo, sorti kukuruza sa dužim periodom nalivanja zrna ili prelazak na sorte koje pri povećanim temperaturama imaju potrebu za povećanim akumulisanim stepen-danima mogu takođe doprineti adaptaciji.

Buduće mere adaptacije uključuju, pre svih, optimizaciju: tehnologije gajenja, korišćenja vodnih i zemljišnih resursa, kao i unapređenje genetičkih resursa razvojem sorti otpornih na ekstremne temperature i sušne uslove. Pored toga, ruralni socio-ekonomski uslovi i drugi uslovi koji prelaze granice poljoprivrednog gazdinstva, kao što su infrastruktura, raspoložive tehnologije proizvodnje, mogućnosti osiguranja i agrarna politika, igraju značajnu ulogu u izvođenju mera adaptacije. Nekoliko istraživanja, na primer, ističu da uticaji organizacije proizvodnje i socio-ekonomski uslovi mogu nadmašiti uticaj samih klimatskih promena.

Mere adaptacije vezane za klimatske resurse. Promene klime i klimatske varijabilnosti utiču na mikroklimatske uslove na različite načine. Međutim, odabir kultura, plodosmena, združena setva (npr pasulja i kukuruza) i tehnologija gajenja u velikoj meri mogu modifikovati ove uticaje. Na primer, u semi-aridnim sistemima sa malim ulaganjima u proizvodnju poznati su primeri ne samo poboljšanja vodnih resursa, već i optimizacije režima temperature i osunčavanja. Klasičan primer su agroekosistemi oaza sa složenim kombinacijama i rasporedima useva, pomoću kojih se omogućava efikasno korišćenje sunčevog zračenja na malom prostoru, sa ciljem da se poveća vlažnost vazduha za useve koji su zasenjeni i izbegnu ekstremne varijacije dnevne temperature vazduha. Vetrozaštitni pojasevi ili žive ograde se često koriste na semi-aridnim područjima Evrope da bi se smanjila brzina vetra i evapotranspiracija.

Agrošumski sistemi (slika 12.18) su široko rasprostranjena mera u poljoprivrednoj proizvodnji, ne samo radi smanjenja intenziteta vetra i evapotranspiracije, nego i u cilju poboljšanja mikroklimatskih uslova. Najčešće se primenjuju u subtropskim i tropskim klimatskim uslovima gde vladaju ekstremne temperature vazduha i/ili veliko dnevno kolebanje meteoroloških elemenata. Kako usevi najviše reaguju na ekstremne meteorološke uslove, svaka mera da se ekstremi smanje u većini slučajeva ima akumulirajući pozitivan uticaj na visinu prinosa. Na primer, temperaturni stres se može smanjiti zasenjivanjem, što se pokazalo kao značajan faktor prinosa za mnoge kulture. U literaturi postoje opisani različiti tipovi agrošumskih sistema proisteklih iz specifičnosti agroekosistema (klima, zemljište, način proizvodnje, nivo ulaganja u poljoprivredu, socio-ekonomski okvir).

Slika 12.18.

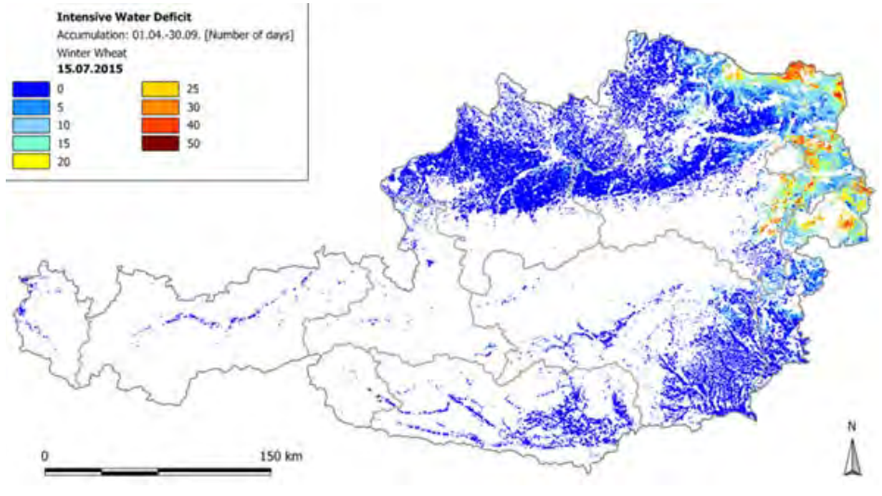
Agrošumski sistem sa topolama u semi-aridnom regionu Kine (Eitzinger et al., 2009)

Zasenjivanje drvećem takođe može sprečiti štete na usevima izazvane velikim intenzitetom sunčevog zračenja (ožegotine) i evapotranspiracije, ali i niskim temperaturama. Naime, agrošumski sistemi smanjuju intenzitet zemljinog izračivanja tokom noći a time i intenzitet mraza.

U novije vreme, mere adaptacije sve više uključuju tehnike agrometeorološkog monitoringa i prognoze na pojedinim lokalitetima ali i na širem području. Uglavnom se koriste za planiranje navodnjavanja, praćenje uslova za pojavu bolesti i štetočina u cilju njihovog boljeg suzbijanja, kao i praćenje rizika od suše i

drugih rizika vezanih za gajenje useva. Ove tehnike uključuju primenu GIS tehnologije sa podacima o zemljištu, usevima, štetnim organizmima i meteorološkim uslovima koji su poznati na veoma malim prostornim razmerama (recimo, 1×1 km).

Praktična primena dobijenih rezultata može značajno pomoći proizvođačima u donošenju odluka, smanjiti troškove navodnjavanja, đubrenja i primene hemikalija i povećati prinos i produktivnost useva. Primer operativnog praćenja i predviđanja rizika od suše za specifične useve koji se primenjuje u Austriji prikazan je na slici 12.19.



Slika 12.19.

Primer austrijskog operativnog Sistema za informisanje o rizicima u poljoprivredi (ARIS) koji se ažurira na dnevnoj bazi. Na slici je prikazan broj akumuliranih dana intenzivnog vodnog deficita za ozimu pšenicu [izvor: BOKU-Met]

Ukratko, adaptacija u smislu uvođenja sistema za rano prepoznavanje kratkoročnih (upozorenja) i dugoročnih (saveti) rizika presudna je za sve strane uključene u lanac proizvodnje hrane. Dokazano je da je adaptacija koja se bazira na predviđanju i merama predostrožnosti efikasnija i jeftinija od adaptacije koja je prinudna i sprovodi se kada je nepovoljna pojava već nastupila. Istraživanja koja se bave uticajem klimatskih promena i adaptacijama na klimatske promene na regionalnom nivou pokazuju veliku prostornu varijabilnost potencijalnih uticaja, u zavisnosti od specifičnih agroekosistema, stanja zemljišta, klimatskih regiona i poljoprivrednih sistema, što ukazuje na značaj regionalno prilagođenih

mera adaptacije. Adaptacija poljoprivrede na globalnom nivou uslovljena je brojnim faktorima koji prevazilaze nivo poljoprivrednog gazdinstva.

12.8. Mere ublažavanja efekata klimatskih promena u poljoprivredi

Emisije gasova staklene bašte izazvane ljudskim aktivnostima su glavni uzročnik antropogenih klimatskih promena. Poljoprivredne aktivnosti značajno doprinose globalnoj emisiji gasova staklene bašte, posebno emisiji ugljen-dioksida (CO_2), metana (CH_4) i azot-suboksida (N_2O). U svrhu pojednostavljenja izračunavanja, sve emisije različitih gasova staklene bašte pretvaraju se, prema njihovoj relativnoj efikasnosti da apsorbuju dugotalasno zračenje, u takozvani jedinični ekvivalent CO_2.

Pre nego što stigne do naših tanjira, hrana se proizvodi, skladišti, prerađuje, pakuje, transportuje, priprema i servira. U svakoj fazi snabdevanja hranom, oslobađaju se gasovi staklene bašte u atmosferu. Konkretno, poljoprivreda oslobađa značajne količine CH_4 i N_2O. Metan uglavnom proizvodi stoka (tokom varenja usled unutrašnje fermentacije i oslobađa se podrigivanjem) ili se oslobađa tokom proizvodnje pirinača u uslovima stalnog potapanja. Metan se takođe može osloboditi sa odloženog stajnjaka i organskog otpada na deponijama. Emisije N_2O su indirektan proizvod organskih i mineralnih azotnih đubriva (EEA, 2016).

Na osnovu jediničnog ekvivalenta CO_2 i na osnovu procena za 2010. godinu, poljoprivredne aktivnosti na globalnom nivou stvaraju 24% ukupne globalne emisije gasova staklene bašte, pri čemu je značajan deo (oko 10%) vezan za spaljivanje šuma (promenom korišćenja zemljišta prirodne šume pretvaraju se u poljoprivredno zemljište, čime su najviše zahvaćene tropske prašume), gajenje pirinča i proizvodnju stoke. Ova procena ne obuhvata CO_2 koji ekosistemi uklanjaju iz atmosfere vezivanjem ugljenika u biomasu i organsku materiju u zemljištu, čime se poništava oko 20% emisija iz poljoprivrednog sektora.

U evropskim zemljama, poljoprivreda ima manji udeo u ukupnoj emisiji gasova staklene bašte - oko 10%. Oko 4% emisije potiče od unutrašnje fermentacije, 1,5% od upotrebe stajnjaka, a još oko 4% od emisije iz poljoprivrednog zemljišta (uglavnom CO_2 i N_2O). Sagorevanje fosilnih goriva od poljoprivrednih mašina ili saobraćaja imaju marginalnu ulogu i dopunjuju bilans do navedenih 10%.

U poljoprivredi, međutim, osim gasova staklene bašte, i drugi faktori kao što su emisije amonijuma nastale iz stajnjaka, mogu imati značajne negativne uticaje na životnu sredinu. Značajno smanjenje grla stoke, efikasnija primena đubriva i bolja upotreba stajnjaka smanjili su emisije EU iz poljoprivrede za 24% u periodu između 1990. i 2012. godine.

Međutim, poljoprivreda u ostalim delovima sveta kreće se u suprotnom smeru kada se radi o emisiji gasova staklene bašte. U periodu između 2001. i

2011. godine, globalne emisije iz ratarske i stočarske proizvodnje porasle su za 14%. Povećanje se desilo uglavnom u zemljama u razvoju, usled povećanja ukupne poljoprivredne proizvodnje (EEA, 2016).

Gotovo sve mere za smanjenje emisija gasova staklene bašte ili za adaptaciju na klimatske promene u ovim sektorima imaju, osim predviđenih, i druge socio-ekonomske ili ekološke posledice. Ovakve povratne informacije takođe mogu uticati na potencijalno smanjenje gasova staklene bašte primenom mera za ublažavanje efekata klimatskih promena. Jedan primer je smanjenje emisije gasova staklene bašte upotrebom bioenergije umesto fosilnih goriva, na šta su značajno uticale direktne i indirektne sistemske povratne informacije vezane za korišćenje zemljišta, kao što su promene u šumskim područjima nastale verovatno usled promena na područjima sa obradivim zemljištem.

U poljoprivrednom sektoru postoji veliki broj mera za smanjivanje emisije gasova staklene bašte, konkretno, u ishrani preživara, upotrebi stajnjaka, smanjenju gubitaka azota i povećanoj efikasnosti usvajanja azota od strane biljaka. Povećana proizvodnja bioenergije u poljoprivredi može doprineti smanjenju emisije gasova staklene bašte, posebno kada se sprovodi nakon integrisane optimizacije proizvodnje hrane i energije, kao i višestruke upotrebe biomase.

Sektor šumarstva je ključni faktor strategije ublažavanja efekata gasova staklene bašte koji su vezani za korišćenje zemljišta. Šumarstvo može doprineti ublažavanju efekata klimatskih promena vezivanjem ugljenika, kao i obezbeđivanjem resursa sa niskim sadržajem ugljenika (materijala, energije). Iz tog razloga potrebno je razmotriti sistemske međuzavisnosti između proizvodnje i vezivanja ugljenika u šumama. Socio-ekonomski, kao i ekološki i klimatski efekti mogu se poboljšati kroz integrisanu optimizaciju proizvodnje u šumama i višestruku upotrebu biomase.

Danas je dostupan širok spektar aktivnosti za ublažavanje efekata klimatskih promena u poljoprivrednom sektoru, ali ove mere tek treba da se usvoje u razmeri i intenzitetu potrebnim za trajno smanjenje emisija.

Najvažniji primeri mera ublažavanja efekata klimatskih promena u poljoprivredi za razvijene zemlje predstavljeni su u nastavku (EPA, 2018).

1) Obrada zemljišta i agrotehničke mere:
- prilagođavanje metoda obrade zemljišta i gajenja useva (npr. metode i vreme primene agrotehničkih mera, plodored);
- đubrenje useva sa preciznom količinom azota potrebnog za proizvodnju useva, kako be se izbegla prekomerna primena azota koja može dovesti do većih emisija N_2O bez porasta prinosa;
- drenaža vode iz močvarnog zemljišta pod pirinčem tokom sezone gajenja da bi se smanjile emisije CH_4;
- izbegavanje drenaže močvarnog zemljišta.

2) Organizacija stočarske proizvodnje:

- prilagođavanje načina ishrane stoke i drugih metoda organizacije uzgoja da bi se smanjila količina emitovanog CH_4 kao rezultat unutrašnje fermentacije;
- poboljšanje kvaliteta ispaše da bi se povećala produktivnost životinja, što može smanjiti količinu emisije CH_4 po jedinici mase grla. Takođe, poboljšani uslovi uzgoja mogu dovesti do povećanja produktivnosti u stočarskoj proizvodnji;

3) *Upotreba stajnjaka:*
- kontrolisanje načina na koji se stajnjak odlaže da bi se smanjile emisije N_2O i CH_4;
- usvajanje CH_4 nastalog od dekompozicije stajnjaka za proizvodnju obnovljive energije;
- rukovanje stajnjakom kao čvrstom materijom ili odlaganje na pašnjacima umesto skladištenja u sistemu tečnog stajnjaka, kao što je laguna. Ovakva praksa bi verovatno smanjila emisije CH_4, ali može povećati emisije N_2O.

Ukratko, najvažniji globalni zadaci adaptacije i ublažavanja efekata klimatskih promena mogu biti grupisani na sledeći način:
- prilagođavanje datuma setve;
- razvoj novih sort i hibrida;
- uvažavanje plodoreda;
- razvoj sistema za snabdevanje vodom i navodnjavanje;
- upravljanje ulaganjima u proizvodnju (đubrenje, obrada zemljišta, sušenje žitarica);
- suzbijanje štetočina i bolesti;
- modifikacije na mikroklimatskom nivou: stimulisanje razvoja agrošumarstva;
- smanjenje rizika po bezbednost hrane;
- identifikovanje trenutno ugroženih oblasti poljoprivrede;
- prilagođavanje i jačanje prioriteta u poljoprivrednim istraživanjima;
- jačanje poljoprivrednih savetodavnih i komunikacionih sistema;
- poboljšanje obuke i obrazovanja u ruralnim područjima;
- poboljšanje ruralne infrastrukture i pristupa tržištu za proizvođače;
- borba protiv (ruralnog) siromaštva.

13. Metode merenja u agrometeorologiji

13.1. Osnovne tehnologije senzora

Mehanički senzori. Mehanički senzori rade na principu pretvaranja promene izabrane fizičke veličine u mehaničku promenu. Danas su dominantni elektronski senzori. U većini slučajeva merenje fizičkih veličina za potrebe meteorologije, upotrebom ovih senzora se svodi na pretvaranje promene izabrane veličine u električni signal. Ipak, mehanički senzori se još uvek mogu naći u upotrebi naročito kada se radi o standardizovanim merenjima na meteorološkim stanicama koje su deo nacionalnih osmatračkih sistema.

Vrednosti meteoroloških elemenata merene pomoću mehaničkih senzora mogu se prikazati na skali (npr. termometra) ili zapisati na traci pomoću pisača (termograf). Pre 1980-ih, najveći broj meteoroloških stanica širom sveta radio je sa mehaničkim senzorima, uključujući i nacionalne mreže meteoroloških stanica. U mnogim zemljama u razvoju ove vrste merenja se i dalje koriste na meteorološkim stanicama. U tom slučaju posmatrač mora očitati podatke sa senzora tri puta dnevno u terminima osmatranja, a vrednosti upisati u tabele, kao što to propisuje SMO. Mnogi istorijski zapisi su do danas digitalizovani te su ovi podaci dostupni u elektronskoj formi. Primeri konvencionalnih mehaničkih senzora za merenje meteoroloških elemenata su:

– termometri koji rade na principu promene zapremine tečnosti (živa, alkohol) u staklenoj kapilari ili deformacije bimetalne pločice usled promene temperature;

- psihrometri koji koriste kombinaciju vlažnog i suvog termometra gde se vlažnost vazduha sagledava preko efekta hlađenja vlažnog termometra isparivanjem;
- termohigrografi koji mere temperaturu vazduha na osnovu istezanja bimetala, a vlažnost vazduha na osnovu promene dužine ljudske vlasi;
- mehanički anemometri za merenje brzine vetra imaju pokretne kalote koje se okreću pod uticajem vetra. Njihovo okretanje, tj. put koji pređu tokom perioda merenja se prikazuje na skali ili zapisuje na traci;
- mehanički instrumenti za merenje vazdušnog pritiska (barometri) rade na principu uspostavljanja hidrostatičke ravnoteže između pritiska stuba žive u barometru i atmosferskog pritiska. Na osnovu visine stuba žive, pri uspostavljenom ravnotežnom stanju izračunava se atmosferski pritisak;
- kišomer sakuplja vodu od padavina, a zapremina vode se meri menzurom;
- trajanje osunčavanja odnosno trajanje direktnog sunčevog zračenja meri se pomoću heliografa. Najčešće korišćeni je heliograf Kempbel-Stoksa (Campbell-Stokes). Prijemni deo heliografa je staklena kugla koja prelama sunčeve zrake koji padaju na nju i sakuplja ih u jednoj tački koja se nalazi iza kugle i u kojoj je papirna heliografska traka. Zraci progorevaju heliografsku traku, a dužina tragova je srazmerna dužini trajanja direktnog sunčevog zračenja.

Elektronski senzori. Elektronski senzori su u široj upotrebi na meteorološkim stanicama od osamdesetih godina prošlog veka. Tome je naročito doprineo razvoj računara, elektronskih sistema za čuvanje i sistema za prenos podataka. Današnje automatske meteorološke stanice (AMS) se sastoje od senzora koji promenu neke fizičke veličine, koja opisuje stanje vazduha, tj. meteorološkog elementa, pretvaraju u električni signal koji može biti sačuvan u memoriji samog uređaja, ali i prenesen na veće udaljenosti i sačuvan u nekoj bazi podataka. Energija potrebna za rad stanice se, danas, uglavnom obezbeđuje pomoću solarnih baterija. Više detalja o elektronskim merenjima i korišćenju AMS naći ćete u narednim poglavljima.

13.2. Metode merenja

Agrometeorološka merenja obično se odnose na specifična mikrometeorološka merenja u usevima i zasadima i zbog toga ne moraju obavezno uzimati u obzir sve SMO standarde za klimatološke stanice koje se koriste u nacionalnim osmatračkim mrežama. Ovi standardi uključuju, recimo, unapred definisane zahteve za visinu na kojoj se mere vrednosti meteoroloških elemenata, površinu lokacije na kojoj se obavljaju merenja i slično (WMO, 2008, 2011), koje ponekad

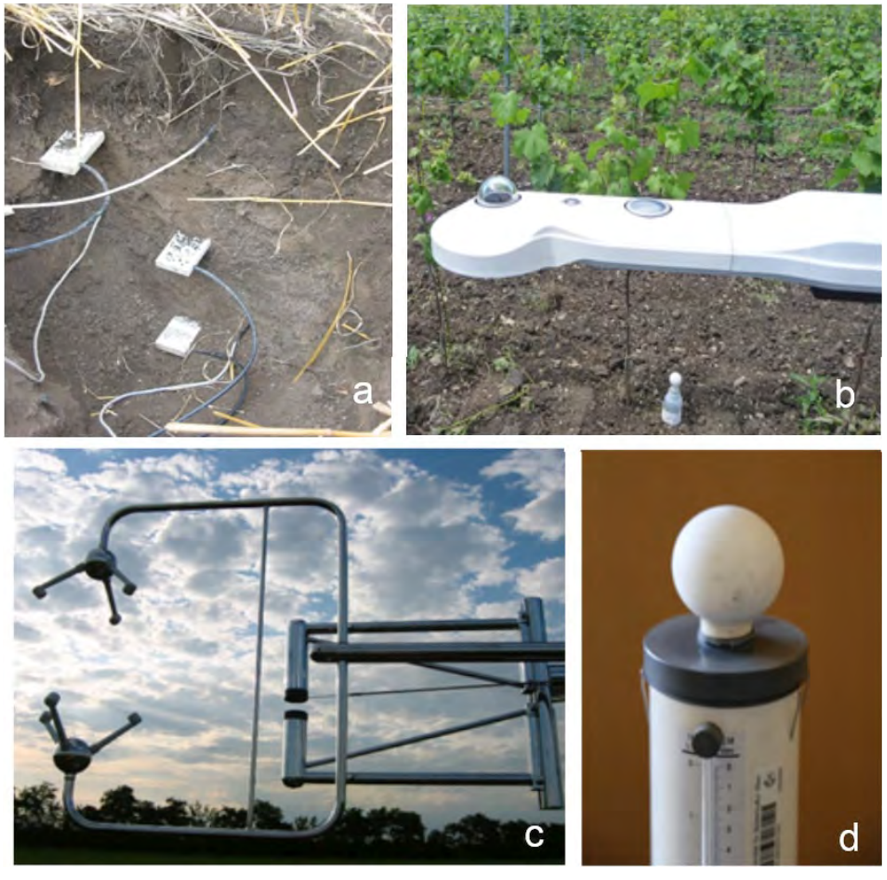
nije moguće ispuniti kada se radi o agrometeorološkim merenjima. U tom slučaju visinu merenja i izbor lokaliteta treba opredeliti tako da rezultat merenja što bolje odražava pojavu koja je predmet analize i zbog koje se merenje organizuje, dok se u pogledu kvaliteta senzora preporučuje poštovanje SMO standarda.

Pre započinjanja bilo kakvih lokalnih merenja potrebno je imati na umu dva osnovna zahteva: a) merenja se moraju obavljati na takav način da je njihov uspeh osiguran, a njihov cilj postignut; b) proces merenja mora biti što efikasniji u pogledu utrošenog vremena, ljudskih i finansijskih resursa. Karakteristike senzora (inercija, rezolucija, i sl.) treba odabrati u skladu sa metodom koja će se koristi i očekivanim kvalitetom podataka. Takođe, treba imati u vidu da agrometeorološka merenja mogu biti organizovana za, isključivo, naučnu primenu i/ili za praktične, odnosno operativne namene u primenjenoj agrometeorologiji.

Agrometeorološka merenja za naučne svrhe moraju biti organizovana u skladu sa ciljem eksperimenta i na način koji je ponovljiv i proveriv. U skladu sa postavljenim naučnim ciljem, za uspešno organizovanje eksperimentalnih merenja potrebno je imati u vidu sledeće aspekte:

- broj i tip fizičkih veličina koje se mere;
- minimalna tačnost i inercija senzora;
- vreme merenja, odnosno period između dva uzastopna merenja i period osrednjavanja (sekunde, sati, dani) ;
- broj mernih mesta koji je potreban ukoliko se eksperiment odnosi na veće prostorne razmere;
- trajanje eksperimenta (kratkoročni ili dugoročni);
- zahtevi u pogledu čuvanja i prenosa podataka (memorijski kapacitet instrumenta, troškovi prenosa podataka na daljinu);
- potrebe mernog sistema u pogledu izvora i količine energije;
- potrebe mernog sistema u pogledu održavanja;
- potrebe u vezi rukovanja dobijenim podacima i analize podataka (stručnost, troškovi rada);
- izbor lokaliteta u kome će se merenja obavljati.

U tekstu koji sledi prikaznao je nekoliko primera agrometeoroloških merenja organizovanih u istraživačke svrhe.



Slika 13.1.

(a) Merenje profila vlage i temperature na različitim dubinama zemljišta; (b) senzor za merenje bilansa zračenja na osnovu izmerenih intenziteta kratkotalasnog i dugotalasnog zračenja; (c) merenja turbulentnog transporta pomoću ultrazvučnog senzora visoke frekvencije; (d) merenje intenziteta isparavanja i temperature vazduha

Merenje mikrometeoroloških elemenata u biljnom sklopu često obuhvata:

- merenje evapotranspiracije, flukseve toplote i vodene pare, kao i bilansa zračenja (slika 13.1a-d);
- merenje flukseva gasova (npr. emisije gasova sa efektom staklene bašte iz zemljišta)

- merenje vertikalnih profila[31] mikrometeoroloških elemenata, detektovanje faktora koji utiču na varijacije meteoroloških elemenata na malim razmerama, kao što su uticaji živica ili zaštitnih drvoreda, agrošumski sistemi ili uticaj topografije na mikrometeorološke uslove u usevu (slike 13.2 i 13.3.);
- merenje brzine vetra i temperature vazduha unutar sklopa (naročito je važno registrovati i intenzitet inverzije u jezerima hladnog vazduha koja mogu da se formiraju);

Slika 13.2.

Merenje profila mikrometeoroloških elemenata u vinogradu (temperature vazduha i zemljišta, vlažnosti vazduha, isparavanja) na brdovitom terenu u Austriji

Organizacija agrometeoroloških merenja u operativne svrhe pored kvaliteta i kontinuiteta merenja mora da zadovolji još jedan važan uslov - povraćaj ulaganja. Troškovi organizacije merenja i nabavke opreme treba da budu manji od ušteda koje mogu da se ostvare na osnovu informacija dobijenih merenjem. Pitanje „vrednosti", odnosno isplativosti agrometeoroloških informacija kao što je vremenska prognoza za potrebe poljoprivrede i merenja za agrometeorološke svrhe ispitivana je u nekoliko studija. Čest zaključak je da se u sferi upozorenja

[31] Promena posmatrane veličine sa visinom.

na ekstremne pojave, prognoze pojave štetočina i bolesti, i plana navodnjavanja useva, investicije u agrometeorološka merenja na terenu mogu isplatiti u roku od nekoliko godina, ako se pravilno primjenjuju.

Slika 13.3.

Merenje vertikalnog profila vetra i isparavanja niz vetar u odnosu na vetrozaštitni pojas u Austriji

Na primer, od 1992. godine u Austriji postoji mreža agrometeoroloških stanica koja obezbeđuje podatke Adcon addVANTAGE sistemu namenjenom za praćenje plamenjače i pepelnice. Ovaj sistem koristi različite modele kako bi stručnjacima za zaštitu bilja i proizvođačima pružio podršku pri donošenju odluka o primeni mera zaštite. Stanice su raspoređene na području od preko 1.500 ha. Prikupljanje i obradu podataka obavlja lokalna kancelarija Agencije za poljoprivredu Austrije, čiji službenici šalju upozorenja. Za ovu uslugu, članovi plaćaju vrlo nisku godišnju naknadu od samo 10 evra. Iskustvo poslednjih 16 godina pokazalo je da proizvođači koji koriste ovu uslugu mogu postići prosečno smanjenje broja prskanja od 35%. Broj tretmana u proseku iznosi 5-6, a u nekim godinama sa niskim intenzitetom napada bolesti čak i do 3 tretmana, dok standardni postupci prema planu zaštite preporučuju 8–12 tretmana po sezoni. Čak i bez trajne podrške proizvođačima od strane Poljoprivredne komore, kupovina opreme bi se brzo isplatila, jer bi čak i mala farma od 5 ha mogla ostvariti godišnju uštedu od cca. 600 evra ili 200 evra po tretmanu, tako da se troškovi nabavke stanice vraćaju za manje od 4 godine.

Dok se sa tehničke tačke gledišta praćenje mikrometeoroloških elemenata pomoću automatske meteorološke stanice može smatrati najsavremenijom praksom, ona je daleko od toga da bi se mogla smatrati široko prihvaćenom. Kada se radi o planu navodnjavanja, čak i u zemljama u kojima je suša česta pojava, kao što je Australija, manje od 10% od ukupnog broja poljoprivrednih proizvođača koristi meteorološke stanice i senzore za merenje vlažnosti zemljišta kako bi poboljšali svoju dnevnu praksu navodnjavanja. Iako većina proizvođača rado koristi ažuriranu vremensku prognozu kada odlučuje o prskanju i navodnjavanju, samo mali procenat zapravo koristi meteorološke stanice na gazdinstvu i senzore za merenje vlažnosti zemljišta.

Dva agrometeorološka metoda koji su u širokoj upotrebi i koji mogu efikasno da unaprede upotrebu vode u poljoprivrednoj proizvodnji koriste: a) AMS koje, pored ostalog, mogu obezbediti podatke za izračunavanje evapotranspiracije i b) senzore za direktno praćenje vlage u zemljištu. Obe tehnike imaju svoje prednosti i mane, i svaka ima svoje pobornike i protivnike. Ipak, kada se pažljivije pogleda, nije teško shvatiti da ih treba posmatrati kao komplementarne tehnologije, a ne kao alternative.

Automatske meteorološke stanice postavljene u usevima i zasadima treba da „odgovore" na brojne izazove. Naime, pored vremenskih prilika koje često stresno deluju na senzore i prateću elektroniku, stanice su izložene i hemikalijama kao što su insekticidi i fungicidi, kao i povremenom „tuširanju" od strane sistema za navodnjavanje. Osim toga, stanice su često na udaru prašine i peska, koji ne samo da deluju abrazivno, već i formiraju slojeve koji ometaju rad senzora. U prašini i pesku mogu da se nađu i tragovi đubriva (nakon njihove primene) što dodatno menja okruženje u kome se senzori nalaze. Za uspešno funkcionisanje sistema AMS od ključnog značaja je održavanje (kalibracija senzora, otklanjanje manjih nedostataka, čišćenje opreme) i provera pouzdanosti izmerenih podataka.

Sve ove faktore treba uzeti u obzir pri projektovanju i instalaciji meteorološke stanice u usevu ili zasadu (slika 13.4). Preduslovi za efikasnu eksploataciju stanice mogu se sumirati na sledeći način:

- oprema mora biti veoma robusna, ali ipak dovoljno precizna;
- oprema mora biti sposobna da održi propisani kvalitet merenja u uslovima ekstremnih vremenskih prilika koje su očekivane na izabranoj lokaciji;

– oprema mora biti otporna na hemijska sredstva koja se uobičajeno koriste u poljoprivredi;
– oprema mora obezbediti dugotrajnu stabilnost, uz malu varijaciju izmerenih vrednosti tokom eksploatacije;
– zamena senzora mora da bude brza i jednostavna.

Na ovom mestu treba naglasiti da niska cena ne treba da bude ključni kriterijum u izboru AMS, već i povoljan odnos cene i performansi, a posebno ukupni troškovi eksploatacije u prvih 10 godina. U troškove eksploatacije treba uračunati koliko puta je neophodno obići stanice na lokaciji, koliko rekalibracija uraditi, koliko senzora zameniti, itd. Skuplja i efikasnija oprema može se na dugi rok pokazati povoljnijom od jeftinijih uređaja.

Senzori koji se najčešće koriste u agrometeorološke svrhe navedeni su u daljem tekstu. Kao smernice za kvalitet senzora, treba proveriti njihove sledeće karakteristike:

– rezolucija: najmanja vrednost merene veličine koju instrument može prikazati (ovo ne treba pomešati sa tačnošću);
– tačnost: odstupanje izmerene vrednosti od tačne vrednosti merene veličine (određuje se prilikom proizvodnje senzora ali je neophodna i provera greške tokom eksploatacije);
– histerezis[32]: odsustvo histerezisa ili njegove male vrednosti ukazuju na sposobnost senzora da izmeri istu vrednost posmatrane veličine kada se eksperiment ponovi pod istim uslovima;
– vreme odziva i potrošnja energije: što je reakcija senzora brža, to je potrošnja energije manja;
– „drift" senzora (sporo ali prisutno povećanje greške merenja): prisutan je kod svakog senzora i posledica je promene karakteristika materijala od koga je napravljen senzor tokom perioda eksploatacije. Kvalitet senzora se ogleda u tome da li se vreme u kome će „drift" senzora biti primetan meri mesecima ili godinama eksploatacije. Uobičajeni period u odnosu na koji se posmatra ova karakteristika senzora je 5 godina.

[32] Histerezis se u ovom kontekstu odnosi na sposobnost senzora da vrednost koju će izmeriti (prikazati na izlazu) ne zavisi samo od vrednosti veličine koju meri (ulazna vrednost na senzoru) već i prethodnih merenja koja je obavio tj. od njegove predistorije. Pojava histerezisa je veoma loša osobina senzora.

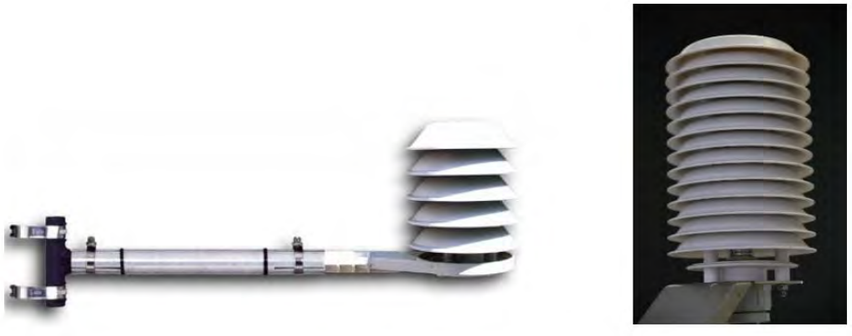
Slika 13.4.

Primer komercijalne automatske agrometeorološke stanice na solarni pogon za merenje standardnih meteoroloških elemenata i bežični prenos podataka

Temperatura vazduha. Dok su NTC (Negative Temperature Coefficient – veća toplotna provodljivost sa povećanjem temperature) termistori (THERMally-sensitive resISTOR) dostupni po veoma niskoj ceni, senzori zasnovani na platinskim otpornicima (pt100, pt500 ili pt1000) su, definitivno, bolji izbor. Ovi senzori nude linearni izlaz u punom temperaturnom opsegu i pokazali su se prilično robusnim čak i pri teškim uslovima eksploatacije. Njihovom upotrebom se izbegava česta potreba za rekalibracijom zbog povećanja greške merenja senzora. Prilikom izbora senzora treba voditi računa da imaju dovoljno velik opseg da mogu da se koriste za potrebe upozorenja na pojavu mraza, praćenje niskih temperatura, merenja potrebnih za kontrolu štetnih organizama i druge svrhe. Uobičajeni raspon temperature se kod mnogih proizvođača kreće od -40 °C do +60 °C. Tačnost treba da bude jednaka ili bolja od 0,5 °C, a željena vrednost je 0,1 °C.

Senzor za merenje temperature se štiti od direktnog sunčevog zračenja tako što se stavlja iza rebraste zaštite koja je obično neventiliranog tipa, kao što je prikazano na slici 13.5.

Većina proizvođača instalira svoje temperaturne sonde zajedno sa senzorom za relativnu vlažnost vazduha da bi smanjili troškove ugradnje uređaja za modifikovanje i pojačanje signala. Prilikom svakodnevne upotrebe, ovo ima ne samo pozitivan uticaj u pogledu cene, već olakšava instalaciju i čini nepotrebnim ugrađivanje zaštite za drugi senzor.



Slika 13.5.

Pasivna zaštita od direktnog sunčevog zračenja

Vlažnost vazduha. Ovaj meteorološki element se obično meri dovoljno precizno pomoću standardnog senzora za relativnu vlažnost vazduha. Većina elektronskih senzora koristi kondenzatorske elemente za ovu svrhu. Međutim, ovi senzori imaju tendenciju povećanja greške merenja pri maksimalnom opterećenju, odnosno pri graničnim vrednostima vlažnosti vazduha. S obzirom da se većina AMS koristi za različite potrebe i merenja u uslovima velikih varijacija vlažnosti vazduha, posebnu pažnju treba obratiti na izbor senzora za merenje relativne vlažnosti vazduha. Kondenzatorski elementi senzora su veoma osetljivi na promene vremenskih uslova. Na njih loše utiču slojevi prašine, a naročito hemijska sredstva koja se koriste u poljoprivredi. Ovi uređaji su, generalno, podložni odstupanju i obično pokazuju veće vrednosti vlažnosti vazduha od stvarnih. Smatra se da je kvalitet senzora zadovoljavajući ako u toku prvih pet godina eksploatacije maksimalno odstupanje ne prelazi 5%. Ako je nekom senzoru potrebna česta rekalibracija, u datim uslovima (ili zamena) onda to treba raditi u idealnom slučaju svake druge godine. Slika 13.6 prikazuje tipični kapacitivni/kondenzatorski čip za merenje vlažnosti vazduha.

Slika 13.6.

Kondenzatorski čip za merenje vlažnosti vazduha

Kao što je već spomenuto, senzori za merenje temperature i vlažnosti vazduha obično se instaliraju zajedno u istom kućištu. Da bi zaštitili osetljive delove senzora od direktnog izlaganja uslovima okoline, ugrađuje se zaštitna kapica koja je obično izrađena od guste žičane mrežice ili specijalnog filter papira, kao što je prikazano na slici 13.7.

Slika 13.7.

Zaštitne kapice od žičane mreže ili filter papira

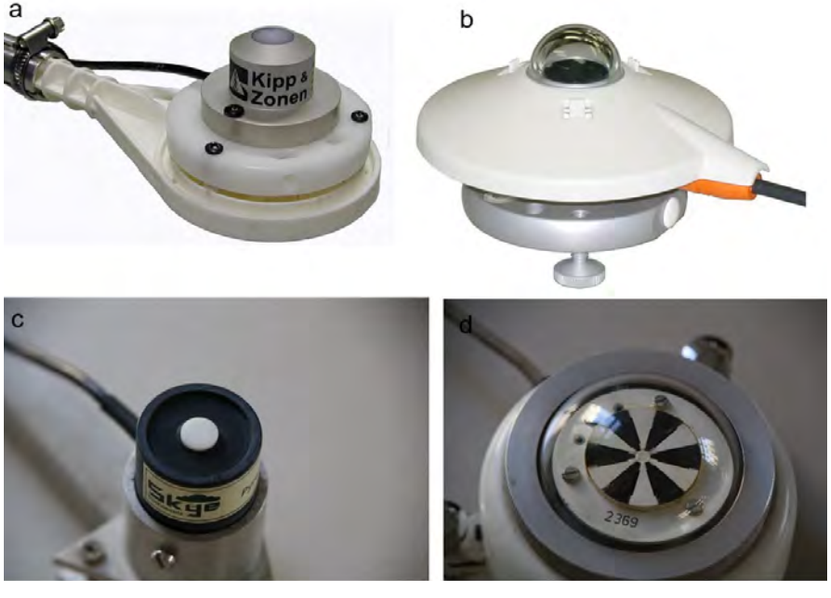
Zaštitne kapice senzora treba često menjati jer u njima može da se nakuplja prašina, hemijska sredstva i vlaga. U takvim okolnostima u ovim kapicama se formira poseban, vlažniji ambijent što može znatno uticati na tačnost merenja. Ovo je od posebnog značaja kada je u pitanju relativna vlažnost vazduha, jer dovodi do netačnih (obično previsokih) izmerenih vrednosti koje meri senzor smešten u vlažan ili čak plesniv filter papir. Ovako, pogrešno, izmerene vrednosti relativne vlažnosti vazduha dovode do podcenjivanja intenziteta evapotranspiracije.

Vlažnost listova. Senzori za merenje vlažnosti listova su relativno jednostavni. Njihov zadatak je da prate trajanje i stepen vlažnosti listova „skeniranjem" površina koje igraju ulogu lista (slika 13.8). Informacije o trajanju vlažnosti listova su ključne za mnoge modele gljivičnih bolesti. Senzor se izrađuje u vidu pločice na koju dolazi voda od padavina ili kondenzacije vodene pare iz atmosfere isto kao na list biljaka. Merenjem provodnosti pojedinih delova pločice senzor meri koliko je pločica prekrivena vodom u nekom trenutku a potom se izračunava koliko dugo je voda bila prisutna. Pretpostavka je da vlažnost lista traje isto koliko i vlažnost pločice.

Slika 13.8.

Senzor za merenje trajanja vlažnosti listova [izvor: BOKU-Met]

Sunčevo zračenje. Merenje intenziteta sunčevog zračenja zahteva upotrebu vrlo preciznih piranometara za merenje ukupnog opsega sunčevog zračenja u opsegu talasnih dužina od 300 do 3000 nm, kako je definisano međunarodnim standardom ISO 9060. Standardne formule za izračunavanje intenziteta evapotranspiracije uključuju intenzitet sunčevog zračenja izmeren korišćenjem ovog tipa senzora. Standardni princip merenja je zasnovan na apsorpciji toplotne energije sunčevog zračenja i njenom pretvaranju u električnu energiju. Za to se koriste različite vrste senzora koji koriste termobaterije (sastoje se od više termoelemenata) i koji su po pravilu prilično skupi. Ovo je dovelo do toga da je tzv. silicijumski piranometar postao glavni izbor za agrometeorološka merenja. Silicijumski piranometri ne mogu da obuhvate čitav spektar talasnih dužina sunčevog zračenja, već samo interval od oko 300 do 1100 nm. Međutim, ovi senzori ipak obezbeđuju vrednosti intenziteta zračenja koje su dovoljno blizu tačnih vrednosti da mogu da posluže željenoj svrsi. Njihova proizvodna cena je mnogo niža, a pružaju dobru alternativu za agrometeorološka merenja. Na slici 13.9 prikazan je tipičan silicijumski piranometar (a) i piranometar sa termobaterijom klase 2 (b). Ovde treba pomenuti tipičnu grešku pri izboru senzora. Često se dešava da se, umesto silicijumskih piranometara, koriste senzori za merenje intenziteta fotosintetski aktivnog zračenja (FAZ) koji mere samo fotosintetski aktivno zračenje. Pošto FAZ spektar obuhvata samo opseg talasnih dužina od 400 do 700 nm, intenzitet izmerenog zračenja je značajno manji od onog koji bi bio izmeren da je pri istim uslovima korišćen silicijumski piranometar. Piranometri moraju biti postavljeni apsolutno horizontalno kako bi se izbegle greške izazvane senzorskim površinama nagnutim od ili ka suncu. Idealno je da je piranometer usmeren tačno na jug na severnoj hemisferi i tačno na sever na južnoj hemisferi. Treba ga postaviti tako da nikakva prepreka ne može zakloniti sunce dok traje obdanica.



Slika 13.9.

Silicijumski piranometar (a i c), piranometar sa termobaterijom klase 2 (b) i zvezdasti piranometar sa termobaterijom (d) [izvor: Pacher (a,b); BOKU-Met (c,d)]

Vetar. Merenje brzine i smera vetra je od izuzetnog značaja u agrometeorologiji mada automatske stanice koje se postavljaju u usevima i zasadima vrlo često nemaju ove senzore. Naime, sistemi navodnjavanja orošavanjem moraju biti isključeni kada je vetar prejak, primena fungicida i pesticida nije moguća (kako zbog efikasnosti, tako i zbog povećane opasnosti po zdravlje ljudi usled raznošenja hemikalija vetrom), a ventilacioni otvori na plastenicima i staklenicama moraju da budu zatvoreni.

U izradi senzora za merenje brzine vetra koristi se nekoliko konstruktivnih tipova, a najčešći su anemometar sa kalotama ili propelerom i ultrazvučni senzori (slika 13.10). Ultrazvučni senzori nadmašuju druge tipove senzora svojim ekstremno niskim početnim pragom (najmanja brzina vetra koju može da registruje) i, gotovo, potpunim odsustvom inercije jer nemaju pokretnih mehaničkih delova. Međutim, ovi senzori su i dalje prilično skupi i zahtevaju značajnu količinu energije za rad, te se u agrometeorologiji pretežno koriste anemometri sa kalotama i propelerima. Merni opseg ovih senzora može biti znatno ispod maksimalne brzine od 75 m s^{-1} koja je navedena u standardima SMO. Uobičajeni opseg merenja senzora za brzinu vetra, u poljoprivredi, je između 35 m s^{-1} i 55 m s^{-1}. Ono što je od većeg značaja je početni prag senzora koji bi trebao da bude znatno ispod 1 m s^{-1} jer čak i tako male brzine vetra mogu povećati intenzitet evapotranspiracije biljaka.

S obzirom na značaj merenja brzine vetra kao i izloženost senzora atmosferskim procesima i pojavama, hemikalijama i mikročesticama stalno prisutnim u usevima i zasadima, važno je odabrati instrument koji će se, pored zadovoljavajuće tačnosti odlikovati i robusnošću konstrukcije i otpornošću materijala od kojih su izrađeni. Recimo, mikro čestice su „prirodni neprijatelji" kugličnih ležajeva u senzorima za merenje brzine vetra; krupnije čestice koje se skupljaju unutar instrumenta usporavaju rotaciju, dok hemijska sredstva koja se koriste u poljoprivredi razgrađuju maziva što povećava habanje mehaničkih delova instrumenta. Zbog svega navedenog, senzore za merenje brzine vetra treba često (bar jednom godišnje, obično pred početak vegetacije) kontrolisati pomoću referentnog instrumenta.

Kada se radi o merenju smera vetra, prilikom instalacije je važno voditi računa o položaju senzora. Naime, na svakom vetrokazu, čak i kada se radi o ultrazvučnom senzoru, postoji oznaka koju treba usmeriti ka severu jer je, po konvenciji, pravac severa početna tačka kruga na kome se meri pravac vetra u stepenima (od 0° do 360°). S obzirom da poznavanje smera vetra nije od posebnog značaja u poljoprivredi, agrometeorološke stanice se često isporučuju bez ovog senzora.

Slika 13.10.
Senzori za merenje brzine vetra

Padavine. Kišomer je možda najstariji instrument koji se koristi u meteorologiji. Precizno i pouzdano merenje količine, trajanja i intenziteta padavina od neprocenjivog je značaja za poljoprivrednu proizvodnju. Kišomeri se izrađuju od različitih materijala i koriste različite principe merenja količine padavina: od posude koja se prazni kada se napuni vodom od padavina, preko promene zvučnog talasa usled prolaska kišnih kapi do primene laserske tehnologije. Naravno, u agrometeorologiji dominiraju mehanička rešenja jer obezbeđuju zadovoljavajuću tačnost i robusnost po prihvatljivim cenama uz minimalan utrošak energije (slika 13.11). Najčešće korišćeni je tip sa posudom za sakupljanje vode i pulsnim signalom na izlazu. Princip rada ovog kišomera je jednostavan: voda puni kašiku ili posudu dok se ne dostigne puna zapremina kada se prazni posuda. Tom prilikom, posuda ne samo da se prazni, već pokreće i magnetski prekidač, čime se zatvara strujno kolo i stvara impuls koji biva registrovan. U upotrebi se mogu naći modeli sa jednom ili dve posude. Oni se uglavnom razlikuju po tome kako se ponašaju kada se suoče sa kišom velikog intenziteta. U takvim slučajevima, količina vode koja prolazi kroz levak i dospeva u merni element može biti toliko visoka da se određena količina vode gubi tokom presipanja. Ovo se odnosi ne samo na modele sa jednom posudom već i na izuzetno precizne modele sa dve posude, u slučajevima kada intenzitet kiše pređe kapacitet aparata koji je naveo proizvođač opreme (obično izražen u mm h^{-1}). Zato je veoma važno da izbor

kišomera bude u skladu sa očekivanom količinom i intenzitetom padavina na lokalitetu na kom se kišomer postavlja. U područjima sa umerenim do normalnim intenzitetom padavina, mogu se instalirati modeli sa jednom ili dve posude i sa kapacitetom od 0,1 mm do 0,2 mm po pražnjenju. U područjima gde se mogu očekivati padavine velikog intenziteta, kao što su monsunski regioni, treba koristiti sisteme sa dvostrukim posudama i kapacitetom od 0,2 mm ili 0,5 mm. Uređaje sa otežanim postoljem treba koristiti u krajevima gde su jaki vetrovi uobičajena pojava, a kišomere sa dodatnim grejanjem treba birati za regione u kojima se često javlja mraz.

Izbor odgovarajućeg otvora kišomera je podjednako važan. Ne treba uzimati u razmatranje merače sa otvorima manjim od 200 cm^2. Proizvođači opreme za navodnjavanje često uz svoju opremu nude kišomere sa malim otvorom. Međutim, glavna svrha ovih senzora nije precizno određivanje količine padavina, već samo upozorenje korisniku opreme da isključi sistem za navodnjavanje jer je počela kiša.

Slika 13.11 prikazuje različite mehaničke kišomere, od jednostavnih modela sa jednom posudom do sistema sa dvostrukom posudom i integrisanom funkcijom samonivelisanja.

Slika 13.11.
Kišomeri sa posudama koje se prazne

Kod većine senzora, ispravna instalacija je ključ za dobijanje zadovoljavajućih rezultata. Očigledno je da model sa posudama koje se prazne prevrtanjem i koji se u velikoj meri oslanja na dobro izbalansiran rad posuda, ne sme da bude nagnut već mora biti postavljen u apsolutno horizontalnom položaju. Takođe, ovo je važno i zbog toga što svaki milimetar bočnog odstupanja smanjuje sposobnost uređaja da u potpunosti prihvati padavine koje stižu do njega.

U usevima i zasadima je preporučljivo da se odmah po instaliranju kišomera ugradi zaštita od ptica (slika 13.12). Praksa je pokazala da je uticaj zaštitne konstrukcije na merenje količine padavina minimalan (ako ga uopšte ima), dok su

prednosti značajne. Ptičiji izmet i perje može postati ozbiljan problem kada zapuše levak, a ptice grabljivice vole da se hrane i gnezde na kišomerima (slika 13.13).

Slika 13.12.
Zaštita od ptica

Slika 13.13.
Ptica koja se odmara na kišomeru

Vlažnost zemljišta. Veliki broj kompanija koje se bave proizvodnjom meteoroloških senzora, predstavio je širok spektar različitih senzora za merenje vlažnosti zemljišta, koji su sada dostupni za, takođe, širok spektar budžeta, tipova zemljišta i useva, i koji su zasnovani na različitim principima merenja vlažnosti zemljišta. Ne postoji senzor koji podjednako dobro može da meri vlažnost peskovitog i glinovitog zemljišta, u vinogradu, voćnjaku i na pašnjaku u ekvatorijalnim ili stepskim uslovima. Ali, među proizvodima dostupnim na tržištu, svako će moći da nađe uređaj koji, objektivno, zadovoljava potrebe merenja koje se planira.

Cilj direktnog merenja vlažnosti zemljišta je da se prati stvarni sadržaj vlage u aktivnoj zoni korena biljke i da se određuju trenutne potrebe biljke za vodom umesto da se ove veličine izračunavaju različitim tehnikama. Međutim, senzori za merenje vlage u zemljištu pružaju mnogo širi uvid u ono što se dešava u zemljištu i u zoni korena, od prostog utvrđivanja količine vlage u zemljištu. Oni ukazuju na stopu infiltracije vode od navodnjavanja i padavina, omogućuju procenu variranja sadržaja vlage, određivanja različitih agronomskih pragova kao što su tačka venjenja i poljski vodni kapacitet i pomažu da se pravilno odrede dimenzije aktivne zone korena i varijabilnost te zone u različitim fenološkim fazama. Naravno, sadržaj vlage u zemljištu može da ukaže na poljoprivrednu sušu. Pritom

treba uvek imati u vidu da su granične vrednosti različite za različite biljke i faze razvoja. Sadržaj vlage u zemljištu koji za jednu biljku karakteriše sušne uslove ne mora da ima isto značenje za drugu biljku.

Određivanje sadržaja vlage u zemljištu pomoću *in situ* senzora zasniva se, uglavnom, na dve metode: volumetrijskoj metodi i merenju vodnog potencijala zemljišta.

Volumetrijski metod. Većina senzora koji su trenutno u upotrebi koristi neku varijantu volumetrijske metode. Oni direktno mere sadržaj vode u zemljištu (jedinična zapremina vode po jedinici zapremine zemljišta, izražena u ml cm^{-3} ili u %), ali ne govore ništa o sposobnosti biljke da iskoristi vodu iz zemljišta. Tehnologija koja obezbeđuje ovu vrstu informacija je zasnovana na određivanju dielektrične konstante zemljišta, što ukazuje na sposobnost zemljišta da prenese elektromagnetni talas koji emituje senzor vlage u zemljištu. Sa poznatim vrednostima dielektrične konstante zemljišta (osušenog u peći) i vode, može se konstruisati kalibraciona kriva koja daje korelaciju između odgovora senzora i stvarnog sadržaja vlage u zemljištu.

Danas su u upotrebi dve vrste mernih sistema: frekventno-domenska reflektometrija (FDR) i vremensko-domenska reflektometrija (TDR). FDR senzori su dominantni na tržištu zbog svoje cene (slika 13.14).

Slika 13.14.

Sonde za merenje vlage u zemljištu

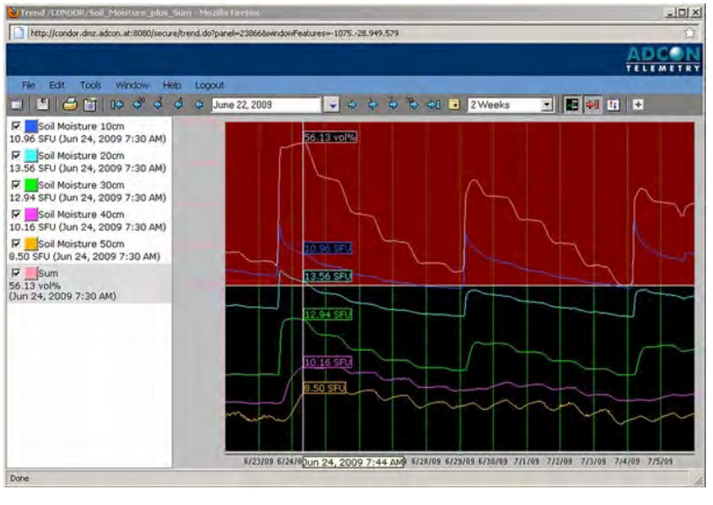
Merenje vodnog potencijala zemljišta. Ovaj metod meri silu koju po jedinici površine biljka mora da primeni kako bi usvojila vodu iz zemljišta. Jedinica mere je kilopaskal (kPa). Senzori koji rade na ovom principu su jeftiniji ali zahtevaju više pažnje i održavanja od volumetrijskih senzora. Njihova zajednička karakteristika je upotreba poroznih sredina kao što je gips, koje omogućavaju usvajanje vode iz zemljišta. Njihovi najčešći predstavnici su tenziometri, gipsani blokovi

i Watermark senzori (slika 13.15). Ovi senzori se razlikuju u mernom opsegu vodnog potencijala zemljišta, a potrebna im je, posebno za merenje apsolutnog vodnog potencijala zemljišta, redovna kalibracija za relevantne tipove zemljišta. U zavisnosti od materijala koji se koristi, životni vek ovih senzora je ograničen, posebno u slučaju jeftinih gipsanih blokova.

Slika 13.15.

Senzor za merenje vodnog potencijala za agrometeorološku upotrebu (primer: Watermark)

Na slici 13.16 je prikazan rezultat monitoringa vlage u zemljištu u okviru sistema sa pet senzora koji su postavljeni na svakih 10 cm. U softveru koji se koristi za vizuelizaciju rezultata svaki senzor je označen krivom različite boje.



Slika 13.16.

Grafikon praćenja vlažnosti zemljišta

Instalacija agrometeorološke stanice se značajno razlikuje od postavljanja sinoptičke stanice, naročito u pogledu izbora lokaliteta. Agrometeorološke stanice se obično postavljaju na ivicama polja (u slučaju kultura koje zahtevaju obradu zemljišta) ili direktno unutar useva i zasada. U svakom slučaju, agrometeorološka stanica treba da zauzme što manje prostora kako ne bi ometala redovne poslove kao što su prskanje, nega, orezivanje ili navodnjavanje, ali i da bude na poziciji čiji su mikrometeorološki uslovi dobar reprezent meteoroloških uslova u biljnom sklopu (slike 13.17 i 13.18).

Slika 13.17.

Agrometeorološka stanica u voćnjaku za praćenje pojave biljnih bolesti [izvor: PIS Vojvodina]

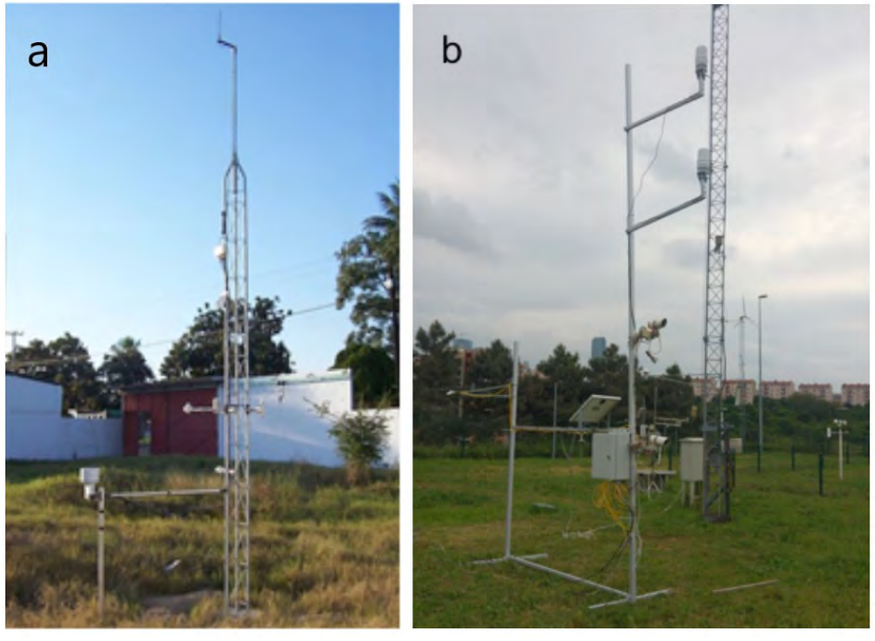
Slika 13.18.

Agrometeorološka stanica u polju lucerke za određivanje sadržaja vode u zemljištu [izvor: BOKU-Met]

Pravilan izbor lokacije za instalaciju je ključni faktor koji određuje ispravnost i reprezentativnost izmerenih podataka. Ovo je od posebnog značaja u planinskim područjima, koja mogu da ponude malo ravnog zemljišta, gdje se poljoprivredno zemljište smenjuje sa šumom, gde su reke i jezera deo pejzaža. Svi ovi spoljni faktori, a naročito obližnje vodene površine, mogu u velikoj meri uticati na izmerene vrednosti meteoroloških veličina i njihovu reprezentativnost.

Međutim, pojedina specijalna merenja imaju i specijalne zahteve. Recimo, merenja za potrebe izračunavanja stvarne i potencijalne evapotranspiracije, po preporuci FAO, treba da se obavljaju na ravnom terenu ravnomerno zasejanom travom koja štiti zemljište od sunčevih zraka i koje je optimalno obezbeđeno vlagom. Na slici 13.19 (levo) prikazana je meteorološka stanica za određivanje evapotranspiracije (ETo) instalirana prema FAO56 standardu na velikom travnjaku, sa kišomerom na posebnom stubu i telekomunikacionom antenom na vrhu tornja. Na slici 13.19 (b) je prikazana meteorološka stanica sa instrumentima za merenje temperature, relativne vlažnosti vazduha i brzine vetra na različitim

visinama instalirana za potrebe određivanja Bovenovog količnika. Definisan kao odnos flukseva osetne i latentne toplote, Bovenov količnik je često korišćen za određivanje komponenti energetskog bilansa u blizini zemljine površine.



Slika 13.19.
ETo stanica sa telemetrijskom opremom (a) i stanica za određivanje Bovenovog količnika (b)

14. Daljinska merenja u poljoprivredi

Primena daljinskih merenja u poljoprivredi otvorila je potpuno novo poglavlje agronomske nauke i prakse. Satelitska merenja koja omogućavaju uvid u stanje useva na celoj planeti i u bilo kom trenutku od neprocenjivog su značaja za donošenje strateških odluka u poljoprivredi. Ipak, treba imati u vidu ograničenja ovakvih sistema kada se radi o prostornim razmerama na koje se informacije odnose i greške koje mogu nastati u transferu elektromagnetnog zračenja od tla do satelita. Zato su daljinska merenja u kombinaciji sa direktnim merenjima na lokalitetu izvor informacija koje su dobar reprezent i lokalnih i regionalnih uslova.

14.1. In situ i daljinska merenja

Merenja meteoroloških elemenata se obično obavljaju postavljanjem odgovarajućeg mernog instrumenta na mesto na kome se želi obaviti merenje. U tom slučaju instrument se postavlja u meteorološki zaklon, radiosondu ili specijalno kućište na avionu i nalazi se u neposrednom kontaktu sa sredinom čiju karakteristiku treba da meri. Ovakva merenja se nazivaju *in situ* merenja.

Koncept daljinskih merenja je relativno jednostavan i sastoji se u merenju izabrane fizičke veličine na jednoj lokaciji korišćenjem uređaja koji se nalazi na drugoj lokaciji. Suštinska razlika u odnosu na klasične telemetrijske sisteme leži u činjenici da se na posmatranoj lokaciji ne postavljaju senzori, tako da ne postoji kontakt između senzora i sredine čiju on karakteristiku meri (kao u slučaju radiosondažnih i pilot balonskih merenja). Ovakva merenja se nazivaju daljinska merenja (engl. remote sensing).

Daljinska merenja se zasnivaju na merenju i interpretaciji efekata interakcije elektromagnetnih i akustičkih talasa sa atmosferom. Ukoliko sistem samostalno generiše ove talase onda se on naziva *aktivnim*, dok se u slučaju *pasivnih* daljinskih merenja ceo proces svodi na merenje i analizu talasa koji su generisani u

atmosferi ili od strane nekog drugog prirodnog izvora. Pasivna daljinska merenja se tipično koriste u slučaju meteoroloških satelita.

Za interpretaciju i kalibraciju rezultata dobijenih daljinskim merenjima važno je raspolagati osmotrenim vrednostima veličina koje se određuju na osnovu ovih merenja (npr., biomasa, sadržaj vlage u zemljištu, itd.).

Rezultati daljinskih merenja u poljoprivredi i agrometeorologiji se najčešće koriste za:

- određivanje temperature i vlažnosti zemljišta;
- određivanje albeda površine;
- mapiranje poljoprivrednih i agrošumskih terena;
- mapiranje karakteristika zemljišta;
- procenu stanja useva i monitoring suše.

Zaključci koji se izvode na osnovu daljinskih merenja zasnivaju se na informacijama koje su geometrijske i radiometrijske prirode. Geometrijske informacije ukazuju na prostorne razmere objekta i površinsko rasprostiranje i od značaja su prilikom mapiranja. Radiometrijske informacije se zasnivaju na:

- spektralnoj reflektivnosti površine;
- varijaciji rasejanja elektromagnetnog zračenja koje stiže na posmatranu površinu i reflektuje se od nje;
- emisivnosti površine kao funkciji materijala od koga je površina sačinjena;
- promeni navedenih osobina u prostoru i vremenu.

U glavi 2 ove knjige je već bilo reči o elektromagnetnom zračenju i njegovoj apsorpciji u atmosferi. Sa slike 2.4 može jasno da se vidi da postoje delovi spektra elektromagnetnog zračenja za koje je atmosfera providna i koji, gotovo, bez gubitaka prolaze kroz nju. Satelitska daljinska detekcija se zasniva na analizi upravo ovog dela spektra elektromagnetnog zračenja kada ono stiže od Zemlje do satelita (tabela 14.1). Senzori koji se koriste za merenje spektralnih karakteristika mogu se grubo podeliti na dva tipa: optičke senzore i mikrotalasne senzore. *Optički senzori* služe za merenja u vidljivom i infracrvenom delu spektra (vidljivo/blisko infracrveno zračenje, toplotno- infracrveno zračenje).

Tabela 14.1.

Nomenklatura i spektralni intervali koji se koriste za daljinska merenja[33]

Opički intervali	Talasna dužina (μm)	
UV i vidljiva svetlost	0,30–0,70	
Bliska infracrvena	0,70–3,00	
Infracrvena (IC)	3,00–6,00	
Toplotna infracrvena	6,00–20,00	
Daleka infracrvena	više od 20,00	
Mikrotalasni intervali	Frekvencija (GHz)	Talasna dužina (cm)
P-band	0,31	100 – 30
L-band	1 – 2	15 – 30
S-band	2 – 4	7,5 – 15
C-band	4 – 8	3,75 – 7,5
X-band	8 – 12	3,8 – 2,5
K-band	18 – 27	1,1 – 1,7
Q-band	33 – 50	0,6 – 0,9
V-band	40 – 75	0,4 – 0,75
W-band	75 – 110	0,27 – 0,4
KU	12 – 18	1,7 – 2,5
KA	27 – 40	0,75 – 1,1

Mikrotalasni senzori primaju mikrotalase koji imaju veće talasne dužine od vidljivog i infracrvenog zračenja. Na kvalitet ovih merenja ne utiče doba dana ili vremenske prilike što predstavlja značajnu prednost mikrotalasne detekcije. Najznačajnije veličine koje se mogu odrediti na ovaj način a da se odnose na površinu tla su: sunčevo zračenje, dnevni globalni albedo (deo sunčevog zračenja koji se reflektuje sa površine Zemlje), različiti vegetacioni indeksi, indeks lisne površine (LAI), površinska temperatura i vlažnost zemljišta, padavine, skladištenje vode u prirodnim rezervoarima, pokrivenost oblacima, požari i spaljene oblasti, snežni pokrivač, digitalne mape visine ledenih ploča, evolucija glečera i tip pokrivača na površini tla.

Nova generacija satelitskih senzora (npr. MODIS na TERRA platformi, VEGETATION na SPOTu, SEVIRI na MSGu, AVHRR-3 na EPS / NOAAu i nedavno Sentinel 1+2) obezbedila je korisnicima unapređene informacije iz oblasti daljinske detekcije zahvaljujući poboljšanoj prostornoj, vremenskoj, spektralnoj i ugaonoj analizi zračenja koje od površine Zemlje stiže do satelita. Vremenska rezolucija i globalna pokrivenost koje obezbeđuju novi sateliti i senzori instalirani na njima, zajedno sa velikim brojem merenja za vrlo male promene ugla i u uskom spektralnom domenu, otvorili su put širokom spektru novih primena,

[33] https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_band_designators.html, https://www.everythingrf.com/tech-resources/frequency-bands

posebno u analizi površinskih procesa i interakcije između zemljine podloge i atmosfere.

Na primer, nekoliko vegetacionih indeksa, kao što su VCI, VHI i TCI, koriste se pojedinačno ili u kombinaciji da bi se ustanovilo postojanje sušnih uslova u poljoprivredi (tabela 14.2).

Tabela 14.2.

Meteorološki elementi i biofizičke veličine koje se ispituju satelitskim senzorima

Meteorološki elementi	Biofizične veličine
Površinska temperatura	NDVI (definisano ispod)
Padavine	SAVI (vegetacioni indeks)
Snežni pokrivač	LAI (indeks lisne površine)
Sunčevo zračenje	VCI (Indeks stanja vegetacije)
Albedo	VHI (Indeks zdravstvenog stanja vegetacije)
Pokrivenost oblaka i druge osobine	TCI (Indeks temperature)
Produkti radarskih merenja (eng. Synthetic Aperture Radar (SAR)) (padavine, vlažnost zemljišta, sneg)	EVI (Unapređeni indeks vegetacije)
	Vlažnost zemljišta
	Pokrivenost vegetacijom
Stabilnost atmosfere	Pokrivenost zemljišta
Detekcija oluja	Evapotranspiracija
Koncentracija ozona	Stepen dani
Led i vetar na moru	Požari

14.2. Upotreba satelitskih merenja u praćenju fenologije i dinamike vegetacije

Satelitska merenja pružaju informaciju o trenutnim karakteristikama velikih delova površine Zemlje. Različite vremenske serije satelitskih podataka i njihove kombinacije omogućavaju da se željena informacija obezbedi za, gotovo, celu planetu sa prostornom rezolucijom koja se kreće od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara. Naravno, za specijalne potrebe mogu da se obezbede satelitski snimci daleko bolje rezolucije.

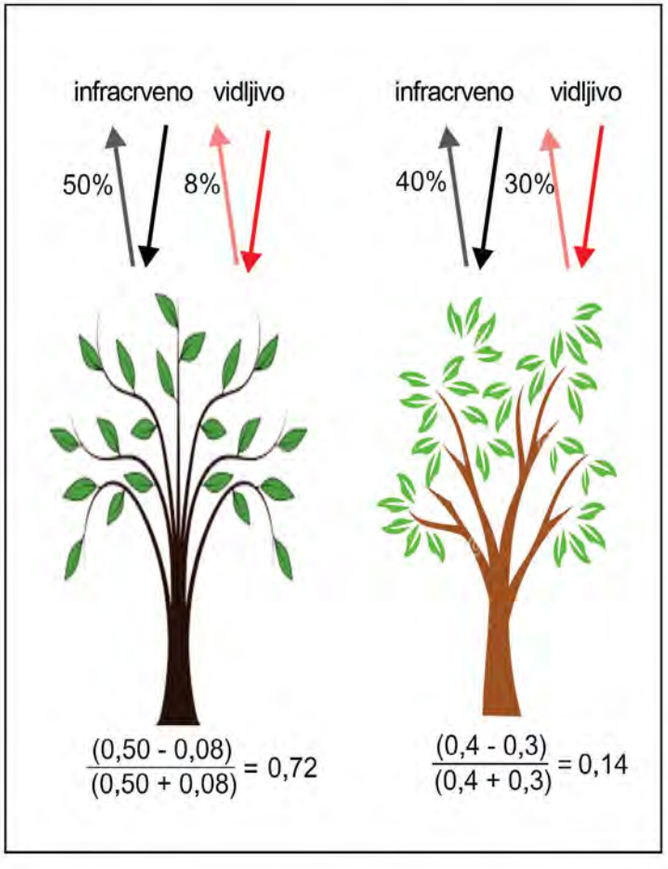
Analiza vremenskih serija podataka dobijenih radiometrijskim merenjima može da se iskoristi za praćenje dinamike vegetacionog pokrivača tokom jedne godine, ali i promena tokom višegodišnjeg perioda. Naime, od jedne godine do druge, fenološki markeri (npr. početak ozelenjavanja, dužine vegetacije) se mogu ponašati drugačije; ove promene se dešavaju pod uticajem kratkoročnih vremenskih fluktuacija (npr. promene temperature ili količine padavina) i/ili uzroka antropogene prirode (npr. eksploatacija podzemnih voda, urbanizacija) (Elmore et al., 2000). Tokom dužeg vremenskog perioda, vreme nastupanja fenoloških

faza se može promeniti i kao rezultat klimatskih promena i velikog antropogenog poremećaja.

Razlikovanje godišnjih, višegodišnjih i dugoročnih fenoloških obrazaca predstavlja važnu komponentu u praćenju i modeliranju globalnih ekosistema i ono može dovesti do boljeg razumevanja kako se i zašto vegetacioni pokrivač menja tokom vremena. Najčešća mera i najkorišćeniji biofizički opis fotosintetičkog „zelenila" zemljišta, koji se koristi za određivanje fenologije je tzv. *NDVI indeks vegetacije* (Normalized Difference Vegetation Index) (npr. Leeuwen et al., 2006; Peters et al., 2002). Pored NDVI u literaturi se sreću i *SAVI* (Soil Adjusted Vegetation Index) i *EVI indeks vegetacije* (Enhanced Vegetation Index). O ova tri indeksa će biti više reči u nastavku poglavlja.

NDVI indeks vegetacije identifikuje i kvantifikuje prisustvo vegetacije na površini na osnovu intenziteta zračenja iz bliskog IC dela spektra koje vegetacija intenzivno reflektuje i vidljivog dela spektra koji vegetacija intenzivno apsorbuje (slika 14.1). Na ovom mestu treba napomenuti da se u literaturi, ponekad, umesto vidljivog koristi reflektivnost crvenog dela spektra elektromagnetnog zračenja. Jedan od razloga za ovakvo tumačenje jeste činjenica da postoje dva maksimuma u apsorpcionom spektru FAZ zračenja koji odgovaraju ljubičasto-plavoj boji (400–500 nm) i crvenoj boji (650–700 nm), ali i da intenzitet sunčevog zračenja na površini Zemlje naglo raste za talasne dužine preko 500 nm. Takođe, kada se govori o vidljivom delu spektra, pre svega se misli na fotosintetski aktivno zračenje (FAZ) (vidi glavu 2). Vrednost NDVI indeksa se računa kao odnos razlike i zbira refleksivnosti posmatrane površine za zračenje iz bliskog IC i vidljivog dela spektra, što može da se izrazi u obliku

(14.1)



Slika 14.1.

Šema NDVI detekcije [izvor: NASA zemaljska opservatorija, SAD (NASA Earth Observatory, USA), https://earthobservatory.nasa.gov/ Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php]

Ovako izračunate vrednosti NDVI indeksa, za svaki segment satelitskog snimka, mogu imati vrednosti od -1 do +1. Negativne vrednosti se dobijaju ponekad u odsustvu vegetacije, kada je reflektivnost zračenja sa površine zemljišta veća za vidljivi nego za blisko infracrveni deo spektra. Ovakav slučaj može da se sretne kod nekih vrsta suvih zemljišta. Vrednost +1 se dobija kada je zemljište u potpunosti pokriveno vegetacijom pa se najveći deo bliskog IC dela spektra koji stiže do površine reflektuje sa površine vegetacije (reflektivnost je 1), a gotovo svo zračenje iz vidljivog dela spektra biva apsorbovano od strane vegetacije (reflektivnost je 0). Dakle, vrednost NDVI je uglavnom određena razlikom između

reflektivnosti površine za blisko IC zračenje (koji se povećava sa porastom vegetacije) i vidljivo zračenje (koje se smanjuje sa smanjenjem vegetacije).

Vrednost NDVI indeksa zavisi od više biofizičkih parametara od kojih su najznačajniji: sadržaj hlorofila, procenat prekrivenosti zemljišta biljnim pokrivačem, intenzitet apsorbovanog fotosintetski aktivnog zračenja i indeks lisne površine.

Globalni NDVI podaci su mereni i prikupljani od ranih 1980-ih putem satelita opremljenih naprednim radiometrom visoke rezolucije (engl. Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR). Međutim, pun potencijal dugoročnih NDVI vremenskih serija često ugrožava loš kvalitet podataka uzrokovan problemima sa instrumentima, promenama ugla senzora, upadnim uglom sunca, atmosferskim (npr. oblaci i izmaglica) i zemljišnim faktorima (npr. snežni pokrivač), kao i starenjem satelitskih detektora. Drugi, jednako važan problem je kalibracija satelitskih snimaka. Ona podrazumeva pridruživanje određenih vrednosti bioloških parametara (faza razvoja recimo) izračunatim vrednostima NDVI indeksa. Za kvalitetnu kalibraciju su potrebna kvalitetna osmatranja u polju koja se odnose na velike površine i na sve biljne vrste koje se na toj površini nalaze. Naime, zavisno od rezolucije, satelitski snimak će za jedan kvadrat na površini Zemlje (izabrana oblast) obezbediti jednu vrednost NDVI indeksa. U tom kvadratu mogu da se nalaze različite biljne vrste, zavisno od njegove veličine. Poznavajući dinamiku vegetacije i zastupljenost svake od vrsta moguće je zaključiti koja od njih je dominantno uticala na formiranje signala.

Kada se radi o velikim prostornim razmerama, izuzetno je teško obezbediti pouzdane rezultate fenoloških osmatranja vegetacionog pokrivača koja odražavaju aktivnost celokupnog ekosistema, a ne samo fenološka osmatranja na nivou jedne biljne vrste. Na osnovu dobro kalibrisanih vrednosti NDVI indeksa danas je moguće, vrlo uspešno proceniti datum početka i završetka vegetacionog perioda, kao i njegovo trajanje na kontinentalnim ili regionalnim razmerama.

Analiza vremenskih serija i varijabilnosti NDVI indeksa omogućava određivanje različitih parametara koji se koriste za karakterizaciju fenološkog ciklusa i njegovih pojedinačnih komponenti. Vremenske serije NDVI indeksa koje su danas u upotrebi predstavljaju kompletirane, dobro dokumentovane i kvalitetne izvore podataka koji su prethodno obrađeni da bi se umanjili neki od pomenutih problema. Međutim, i dalje postoji izvestan pozadinski šum u vremenskim serijama NDVI indeksa koje treba imati u vidu a koji potiču uglavnom od prisustva oblaka, vode ili snega i koji su izvor grešaka koje imaju tendenciju da smanjuju vrednost ovog indeksa.

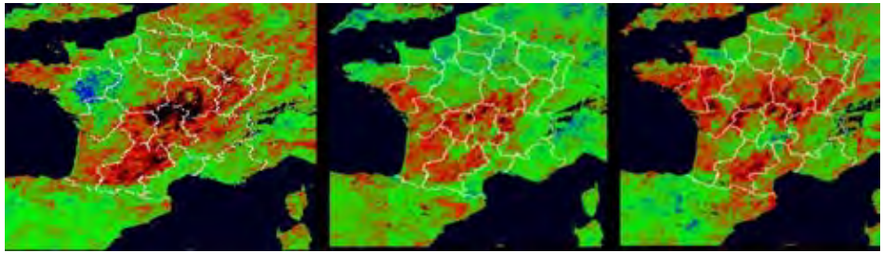
Validnost veze između NDVI i karakteristika vegetacije može biti dovedena u pitanje u područjima sa slabo razvijenom vegetacijom (na primjer, aridna ili semiaridna područja u Australiji) ili gustom vegetacijom (npr. amazonske šume).

U područjima sa slabom vegetacijom, gde je indeks lisne površine (LAI) manji od 3, na vrednosti NDVI uglavnom utiče refleksivnost zemljišta, dok u područjima sa gustom vegetacijom (LAI > 6), vrednost NDVI gotovo u potpunosti zavisi od reflektivnosti bliskog IC zračenja. Zbog toga se, za područja sa slabom vegetacijom, umesto NDVI indeksa preporučuje korišćenje SAVI indeksa vegetacije koji uzima u obzir pokrivenost zemljišta vegetacijom. Međutim, SAVI indeks zahteva još precizniju lokalnu kalibraciju od NDVI indeksa jer je teško predvideti efekat karakteristika zemljišta u slučaju kada se jedan element površine satelitskog snimka (piksel) odnosi na veliko područje. U slučaju različitih tipova zemljišta i vrsta vegetacije, svaki piksel, u osnovi, zahteva posebnu kalibraciju.

MODIS sateliti, nove generacije, ponudili su informacije koje su omogućile uvođenje poboljšanog indeksa vegetacije – EVI indeksa. Ovaj indeks pruža dodatne informacije o prostornim i vremenskim varijacijama prisustva vegetacije, dok istovremeno minimizira mnoge probleme vezane za zagađenje koji se javljaju prilikom korišćenja NDVI indeksa, kao što je recimo, rezidualni uticaj aerosola. Dok je NDVI indeks osetljiv na prisustvo hlorofila i uglavnom reaguje na varijacije reflektivnosti u vidljivom i/ili crvenom delu spektra, EVI indeks je više osetljiv na varijacije refleksivnosti u bliskom IC delu spektra, kao i na varijacije u strukturi vegetacionog pokrivača, uključujući tu i LAI, vrstu vegetacije i strukturu biljnog sklopa. Takođe, EVI indeks dolazi u saturaciju za mnogo veće vrednosti biomase nego što je bio slučaj sa NDVI indeksom kada je korišćen za analizu kišnih šuma i drugih površina na Zemlji sa velikim količinama zelenog materijala. Međutim, EVI indeks je razvijen na osnovu podataka koje je obezbedio MODIS sistem, tako da su vrednosti ovog indeksa dostupne samo od 2000. godine.

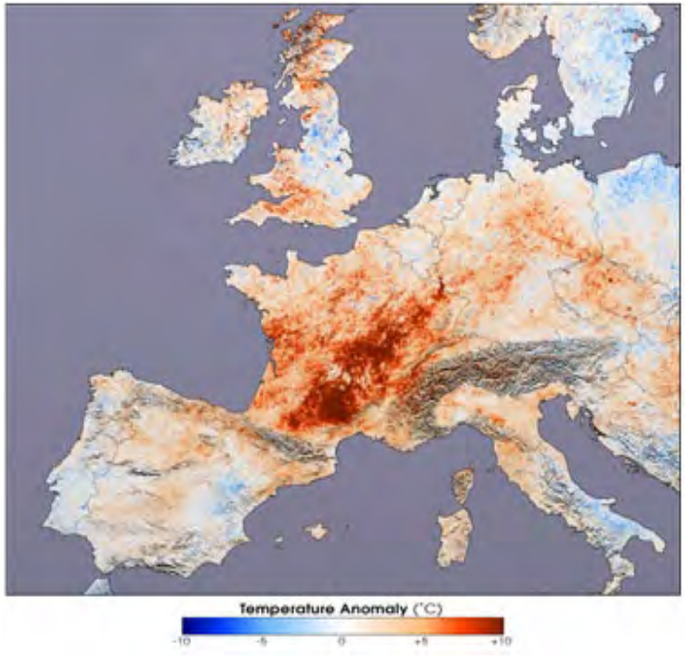
Prednosti i ograničenja informacija koje potiču od satelitskih merenja mogli bi da se sumiraju na sledeći način:

- moguće je analizirati sezonsku i godišnju varijabilnost veličine od interesa na višegodišnjim nizovima podataka;
- raspoloživi su podaci koji omogućavaju globalno praćenje tokom više od 25 godina;
- moguće je pratiti i vizuelizovati efekte klimatskih promena na većem prostoru;
- metodologija je dijagnostička i ne ostavlja mogućnost prognoziranja budućeg stanja biljke.



Slika 14.2.

Letnje suše 2003, 2005. i 2006. godine u Francuskoj (Nejedlik and Orlandini, 2008)



Slika 14.3.

Toplotni talas 2003. godine u Evropi (juli 2003). Temperaturna karta zasnovana na podacima MODIS-a [izvor: NASA opservatorija, SAD (NASA visible Earth, USA), https://visibleearth.nasa.gov/images/3714/european-heat-wave#:~:text=In%20July%202003%2C%20Europe%20experienced,the%20MODIS%20Land%20Science%20Team.]

Slika 14.4.

Atmosferski korigovana NDVI mapa Mađarske. NOAA/AVHRR kombinovana 10-dnevna slika za period od 1. do 10. septembra 1997 (Nejedlik and Orlandini, 2008)

Primeri primene satelitskih merenja u prikazivanju ekstremnih vremenskih događaja, kao što je suša u Francuskoj (na osnovu devijacije NDVI) i toplotni talas u Evropi (na osnovu temperature zemljišta određene analizom IC snimka Zemljine površine), ili samo trenutnog stanja biljnog pokrivača u Mađarskoj (na osnovu kalibrisanog NDVI) mogu se videti na slikama 14.2 - 14.4. Globalno praćenje i prognoza prinosa na osnovu satelitskih merenja i izvedenih vegetacionih indeksa, danas su glavni alat FAO koji ima za cilj, pre svega, rano upozoravanje na moguće nestašice hrane u pojedinim delovima sveta.

14.3. Upotreba satelitskih merenja za procenu vlažnosti zemljišta

Tokom protekle dve decenije, daljinska merenja zasnovana na mikrotalasnim senzorima pokazala su veliku efikasnost u određivanju dielektričnih karakteristika zemljišta (na osnovu emisivnosti površine tla) koje, sa druge strane, zavise od sadržaja vlage u zemljištu. Zato ne čudi što su brzo dobili na značaju

radarski sistemi sa mikrotalasnim senzorima instalirani na satelitima u cilju procene sadržaja vlage u zemljištu na velikim prostornim razmerama. Danas je na raspolaganju nekoliko satelitskih produkata, odnosno parametara, koji opisuju sadržaj vlage u zemljištu a zasnivaju se na merenjima iz mikrotalasnog, optičkog i infracrvenog (termalnog) dela spektra. Međutim, prostorna rezolucija trenutno dostupne satelitske opreme, naročito kada se radi o određivanju vlažnosti zemljišta, je i dalje previše gruba (25 km) i ograničava njenu praktičnu primenu u poljoprivredi. Takođe treba imati na umu da se informacije o vlažnosti zemljišta dobijene na osnovu satelitskih merenja odnose samo na površinski sloj zemljišta debljine nekoliko centimetara.

Iako i dalje postoje izvesne neodređenosti u pogledu asimilacije i validacije satelitskih podataka, kao i određena sistematska odstupanja koja su posledica specifičnosti pojedinih oblasti, mikrotalasna daljinska merenja vlažnosti zemljišta su se poboljšala tokom proteklih nekoliko godina (Mohanti et al., 2017). Dok je u prošlosti voda dostupna biljkama procenjivana isključivo *in situ* merenjem ili preko simulacionih modela, u poslednjih nekoliko godina daljinska merenja igraju sve važniju ulogu u obezbeđivanju podataka o površinskim karakteristikama zemljišta.

Primena satelitskih merenja u poljoprivredi može da se sumira na sledeći način:

- planiranje navodnjavanja na osnovu sadržaja vlage u zemljištu određene daljinskim merenjima i upotrebom hidroloških i modela biljne proizvodnje koji takođe koriste izmerene vrednosti vlage u zemljištu na različitim prostornim i vremenskim razmerama;
- unapređenje prognoze vremena i klimatskih scenarija uključivanjem regionalnih i globalnih podataka o vlažnosti zemljišta u numeričke modele za prognozu vremena i klimatske modele;
- procena sadržaja vlage u dubljim slojevima zemljišta (bitna za određivanje intenziteta evapotranspiracije, procenu dubine podzemnih voda i površinskog oticanja) poboljšava predviđanje suša i poplava;

Dalji primeri i informacije o određivanju vlažnosti zemljišta pomoću mikrotalasnih tehnika i aktuelnim globalnim mapama vlage u zemljištu mogu se naći na: http://rs.geo.tuvien.ac.at/data-vievers/.

14.4. Primeri primene daljinskih merenja u poljoprivredi

Upotreba informacija dobijenih daljinskim merenjima u poljoprivredi se stalno povećava. Podaci se prikupljaju putem satelita, bespilotnih letilica ili traktora opremljenih senzorima i sve više se koriste za primenu u preciznoj poljoprivredi. U daljem tekstu će ukratko biti prikazano nekoliko ovih primera.

Satelitske aplikacije. Satelitski senzori pokrivaju velike površine zemljišta, a posebno su korisni za praćenje dinamike vegetacije i mapiranje poljoprivrednog zemljišta, utvrđivanje veličine polja i stanja useva, procenu štete i prinosa. U Evropi, na primer, poljoprivrednici prijavljuju vrstu useva koju su posejali i aktuelne zasade kako bi dobili subvencije. Struktura setve kontroliše se putem satelita, a poljoprivrednici imaju internet pristup aerofotografijama visoke rezolucije na kojima su prikazane njihove farme i polja.

NDVI indeksi se koriste u okviru Evropskog sistema za prognozu prinosa useva, MARS (Monitoring Agricultural Resources System; https://ec.europa.eu/jrc/en/mars) u kome se vrednosti indeksa kombinuju sa rezultatima modeliranja dinamike razvoja useva i statističkom obradom istorijskih i aktuelnih podataka. Satelitski podaci kao što je NDVI indeks takođe se koriste u okviru sistema za praćenje suše u poljoprivredi, dinamike razvoja vegetacije (slika 14.5 i glava 9), kao i za određivanje temperature površine zemljišta (slika 14.4).

Jedan od najznačajnijih događaja u poljoprivredi poslednjih godina bio je porast učešća tzv. pametne poljoprivrede engl. smart farming-a. On obuhvata praćenje, merenje i reagovanje na promene koje se dešavaju na polju (stanje useva, štetnih organizama, vlage u zemljištu) sa ciljem da se ostvari optimalna proizvodnja, vrate uložena sredstava i da se istovremeno očuvaju prirodni resursi. Iako nije u potpunosti zaživelo u praksi, kombinovanje satelitskih sistema i zemaljskih resursa za potrebe „smart farming"-a ima veliki potencijal u pogledu optimizacije prinosa i upravljanja navodnjavanjem (https://business.esa.int/projects/showcases/smart-farming-satellites). Primera radi, dostupnost satelitskih podataka visoke rezolucije (MODIS i Sentinel2) omogućila je da se, u zemljama koje ih koriste, planirani raspored navodnjavanja koriguje tokom sezone i da se tako uštede značajne količine vode.

Konvencionalne aplikacije satelitskih snimaka su zasnovane na upotrebi rezultata dobijenih u vidljivom i bliskom infracrvenom delu spektra. Ipak, može da se uoči rastuća primena merenja u rasponu talasnih dužina od ultraljubičastog do mikrotalasa, što omogućava napredne aplikacije kao što je, recimo, utvrđivanje sastava i temperature atmosfere na velikim visinama pomoću uređaja koji se zovu LIDARi (Light Detection and Ranging).

Značajan problem u upotrebi senzora za daljinska merenja je njihova cena. Što je senzor sofisticiraniji, to mu je cena veća. Proizvođači uvek procenjuju potencijalno povećanje prinosa u odnosu na kapitalno ulaganje u svaku platformu za daljinsku detekciju. Ponekad je metod „pokušaja i greške" jedini način da se utvrdi koji od raspoloživih metoda je ekonomski opravdan u praksi.

Na kraju, recimo nešto o sve popularnijim dronovima i njihovoj primeni u poljoprivredi. Ovi visokotehnološki sistemi zaista mogu da obave radnje koje proizvođač ne može: skeniraju obezbeđenost zemljišta hranivima i stanje useva, sadržaj vlage i hranljivih materija na velikoj površini u kratkom vremenu. Ove informacije su dragocene za precizno đubrenje, navodnjavanje, pa čak i procenu prinosa. Ukratko, dronovi mogu doprineti automatizaciji mnogih aktivnosti u proizvodnji smanjujući troškove i efekte ljudske greške (http://www.businessinsider.de/commercial-drone-uses-agriculture-business-military-2017-8?r=US&IR=T). Dronovi takođe počinju da se koriste za primenu hraniva i zaštitnih hemijskih sredstava u biljnoj proizvodnji (http://www.droneomega.com/drones-in-agriculture/).

Počeli smo ovu meteorološko-klimatološku priču za agronome sa događajima od pre mnogo milenijuma a završavamo je najnaprednijim tehnologijama. Ipak, predlažemo čitaocu, naročito mladim ljudima, da ne zaborave da nema poljoprivredne proizvodnje bez čoveka - proizvođača. Tehnologija treba da pomogne u donošenju odluka, da ubrza i pojevtini proizvodnju i učini je zdravijom. Ali, dok proizvođač ne ode na njivu ne može biti govora o zdravoj i uspešnoj poljoprivredi.

15. Klimatske karakteristike Srbije (temperaturni i padavinski režim) i njihov uticaj na poljoprivredu

Za mnoge biljne vrste u većem delu njihovog individualnog razvića od najveće je važnosti da li će biti izložene štetnom uticaju niskih temperatura, koliko toplote će dobiti od sunčevog zračenja (kratkotalasno) i okolnog vazduha i zemljišta (dugotalasno) i da li će količina padavina u iznosu, intenzitetu i vremenskoj raspodeli bar donekle odgovarati njihovim potrebama. Poređenjem temperatura i padavina izmerenih u različitim periodima, kao i izračunatih indeksa, ponudićemo čitaocu informacije na osnovu kojih može da zaključi u kojoj meri se životna sredina u kojoj se razvijaju i biljke i njihovi štetni organizmi promenila u poslednjih pedeset godina i šta mogu da očekuju u (ne tako dalekoj) budućnosti.

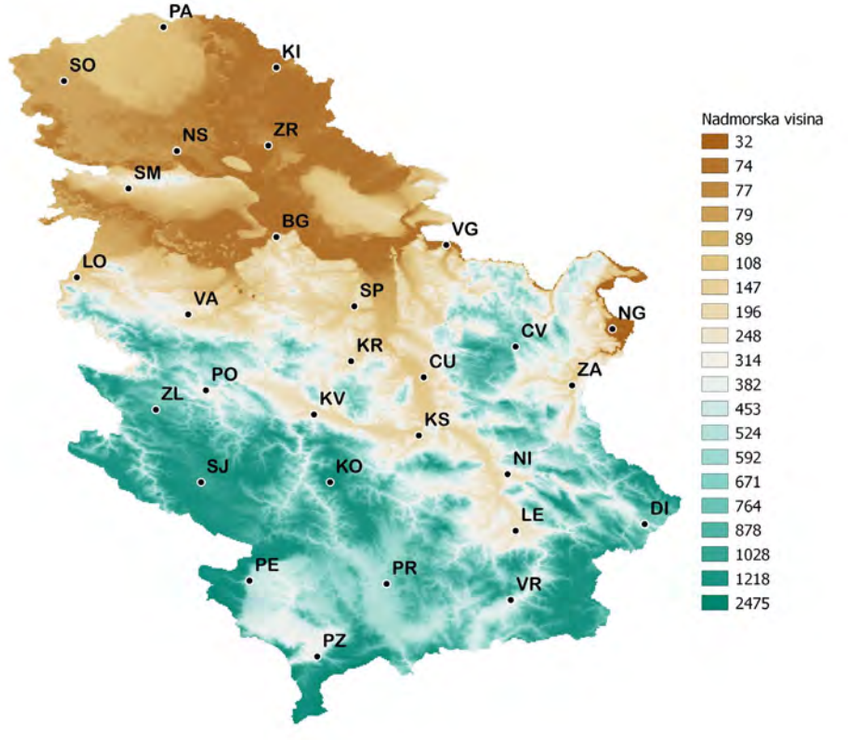
15.1. Uvodne napomene

Analiza klime nekog područja sa stanovišta klimatologije, zasniva se na određivanju vrednosti klimatoloških veličina tokom posmatranog vremenskog perioda (dan, dekada, mesec, godišnje doba, godina) u izabranom tridesetogodišnjem periodu. Tom prilikom se razmatraju trendovi ovih veličina i njihova varijabilnost, porede promene tokom više klimatoloških perioda na jednom mestu ili istog klimatološkog perioda na različitim mestima; sve u cilju sagledavanja prosečnog stanja atmosfere i njenih promena, kao i uzroka i posledica uočenih promena.

Analiza klime nekog područja sa stanovišta poljoprivrede, tzv. agroklimatska analiza, ima nešto drugačije ciljeve. Primarni zadatak agroklimatske analize

je da se utvrdi povoljnost klimatskih uslova za razvoj određene biljne vrste ili štetnog organizma na posmatranom području. Izbor klimatoloških veličina kao i vremenskog perioda tokom koga će biti posmatrane u potpunosti zavisi od organizma koji je predmet interesovanja. Naravno, ponekad se analize uopštavaju tako da se obavlja analiza klimatskih uslova tokom vegetacionog perioda ozimih ili jarih useva.

Geografski položaj Srbije, udaljenost od mora i reljef presudno utiču na klimu u našoj zemlji. Samo letimičan pogled na geografsku kartu ukazuje na činjenicu da je Srbija „meridionalna" zemlja, odnosno da je udaljenost između njene severne i južne granice značajno veća nego udaljenost između istočne i zapadne. Reljef je na severu Srbije dominantno ravničarski jer je deo Panonske nizije. Međutim, južno od Save i Dunava se nadmorska visina terena značajno povećava, da bi na krajnjem istoku (Midžor na Staroj planini – 2.169 m) i jugozapadu (Pančićev vrh na Kopaoniku – 2.017 m) on dostigao visine od preko 2.000 m. Panonska nizija je opasana planinskim masivima (Alpima na zapadu, Karpatima na istoku i Dinaridima i Balkanskim planinama na jugu) koji presudno utiču na prodor vazdušnih masa sa severozapada, severa i severoistoka Evrope utičući na vreme i klimu u severnim i centralnim delovima Srbije. Blizina Mediterana i doline koje omogućavaju prodor vazdušnih masa s juga dominantno utiču na vreme i klimu u južnim krajevima zemlje. Analiza izmerenih temperatura vazduha i količina padavina u poslednjih pedeset godina pokazuje, međutim, da su neki od ovih uticaja ipak značajniji od drugih, što će u tekstu koji sledi i biti prikazano.



Slika 15.1.

Raspored korišćenih klimatoloških stanica Republičkog hidrometeorološkog zavoda (RHMZ) Srbije

U ovom poglavlju će biti analizirane neke karakteristike klime u Srbiji u prošlosti (1961–1990, 1971–2000), sadašnjosti (1981–2010) i budućnosti (2001–2030. i 2071–2100). Naročita pažnja će biti posvećena ekstremnim temperaturama vazduha i promeni njihove učestalosti, varijabilnosti padavina i promeni suma temperatura vazduha za različite klimatološke periode na području Srbije. Sve analize su obavljene korišćenjem srednjih mesečnih (1961–1990) i dnevnih podataka (1971–2000) izmerenih na klimatološkim stanicama Repu-

bličkog hidrometeorološkog zavoda (RHMZ) Srbije (slika 15.1). Spisak stanica, njihov položaj i korišćene skraćenice se nalaze u Dodatku ove knjige (tabela D1).

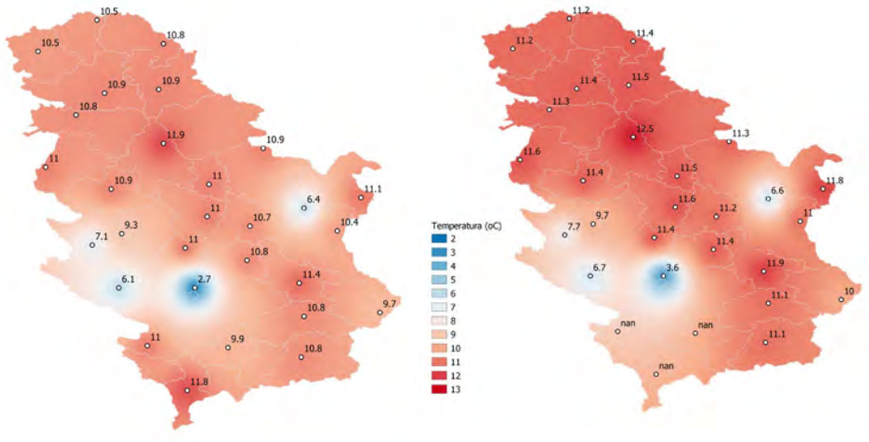
Na ovom mestu neće biti dat detaljan opis klime Srbije. Zainteresovani čitalac može da pronađe relevantne podatke, na primer, na internet stranici Republičkog hidrometeorološkog zavoda (http://www.hidmet.gov.rs/). Zadržaćemo se na saznanju da je klima Srbije umerenokontinentalna, s izraženim lokalnim karakteristikama, temperaturnim režimom koji u većem delu zemlje odgovara klimi umerenog pojasa i padavinskim režimom koji je karakterističan za kontinentalnu klimu.

Usmerimo sada pažnju na promene klime u Srbiji poređenjem temperaturnog i padavinskog režima u periodu 1961–1990. i 1981–2010. Kalendarska godina, godišnja doba (sezone) i deo vegetacionog perioda od marta do avgusta[34] biće periodi od interesa s kojima ćemo započeti analizu (tabele D2. i D7).

15.2. Promene temperaturnog režima u Srbiji

Normalna godišnja temperatura vazduha u Srbiji tokom poslednjeg klimatološkog perioda (1981–2010) iznosila je 10,5 °C (tabela D2), što je oko 0,5 °C više nego u periodu 1961–1990. Prostorna raspodela normalnih temperatura (slika 15.2) pokazuje da postoji mali porast temperature od juga ka severu, ali i da su značajne razlike pre svega povezanes nadmorskom visinom lokaliteta. Naime, ako bi iz analize bile isključene planinske stanice (Crni vrh, Sjenica, Zlatibor i Kopaonik), normalna godišnja temperatura u Srbiji bi iznosila 11,3 °C, a njena standardna devijacija bi se smanjila sa aktulenih 2,1 °C na samo 0,6 °C. Drugim rečima, ovoznači da u većem delu zemlje normalne temperature variraju 0,6 °C oko srednje vrednosti, a da su značajno niže temperature karakteristične

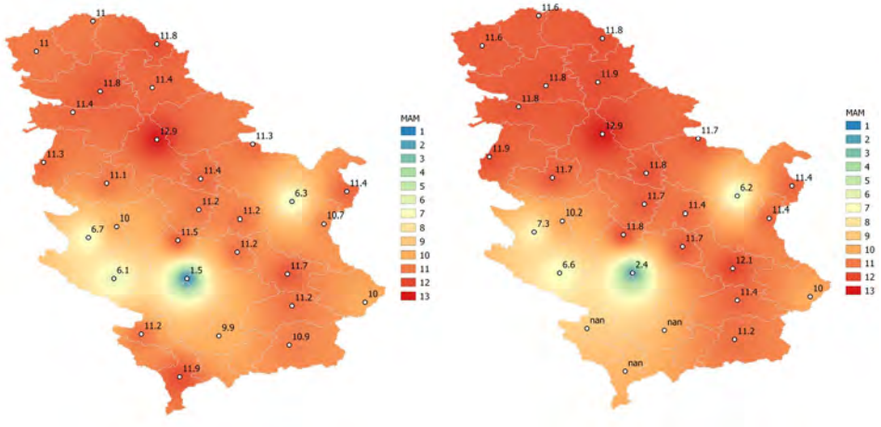
[34] Umesto uobičajenog perioda april–oktobar, koji jeste vegetacioni period jarih useva, odlučili smo se da analiziramo period mart–avgust iz dva razloga: a) zbog sve toplijih zima, vegetacioni period ozimih useva se u proleće ranije nastavlja, a uslovi za setvu jarih su povoljni ranije nego što je to bio slučaj u prošlosti, b) zaključno sa avgustom se, uobičajeno, završava period ekstremnih temperatura i sušnih dana, koji ponekad počinje već u aprilu. Osrednjavanje tokom šest meseci od aprila do oktobra bi značajno umanjilo prosečne vrednosti i uticalo na zaključak o tome kakvi vremenski uslovi preovladavaju tokom najvećeg dela vegetacionog perioda.



Slika 15.2.

Normalne godišnje temperature vazduha za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

za mesta sa većom nadmorskom visinom. U ovom periodu najviša normalna temperatura je zabeležena u Beogradu (12,5 °C), a najniža na Kopaoniku (3,5 °C). I dok je visina Kopaonika dovoljno jak razlog da normalna godišnja temperatura bude najniža baš na ovoj stanici, dotle ništa u položaju Beograda i njegovim klimatskim karakteristikama ne doprinosi statusu najtoplije klimatološke stanice u zemlji. Jedino što Beograd izdvaja od njegove okoline je činjenica da je grad. I to velik. A veliki gradovi imaju „privilegiju" da umnogome mogu da utiču na svoju klimu. Naime, dimenzije, naseljenost, urbanizacija, industrijalizacija i klimatski faktori datog područja formiraju klimu grada, odnosno urbanu mikroklimu.

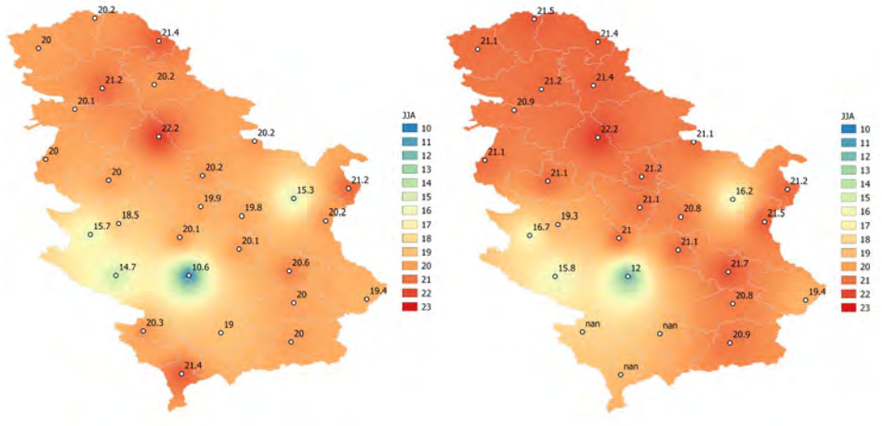


Slika 15.3.

Sezonske (proleće) normalne temperature vazduha za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

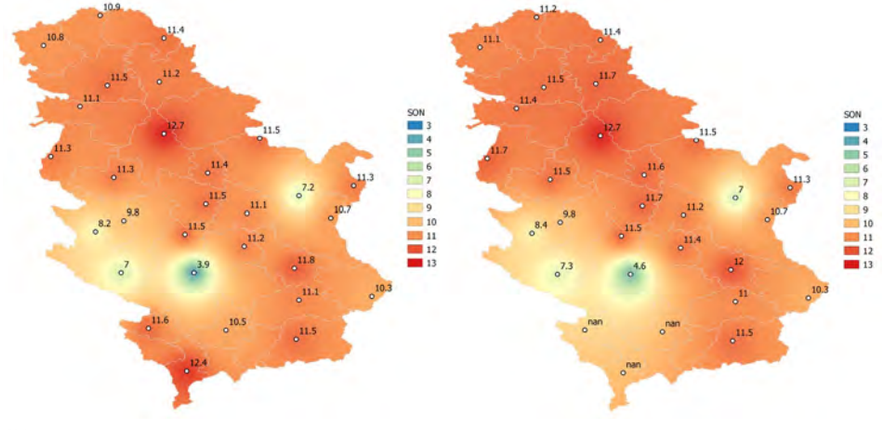
Jedno od najupečatljivijih obeležja urbane mikroklime je *urbano ostrvo toplote*[35], čija se veličina određuje na osnovu razlike temperature vazduha u gradu i ruralnoj sredini neposredno izvan grada. Iako gradovi kao što je Beograd nisu značajni sa stanovišta poljoprivredne proizvodnje, ne treba izgubiti iz vida da oni svojim urbanim ostrvima toplote i specifičnom mikroklimom utiču na šire područje oko grada, naročito u pravcu duvanja dominantnih vetrova. U tim područjima prisustvo grada ne samo da dovodi do porasta temperature vazduha u odnosu na vrednost koja bi bila izmerena da grad nije u blizini već utiče i na vlažnost vazduha u ovim regionima kao i na povećanje koncentracije jezgara kondenzacije, a time i na verovatnoću padavina.

[35] Urbano ostrvo toplote je deo grada u kome je temperatura vazduha značajno viša nego u ruralnom području u blizini grada.



Slika 15.4.

Sezonske (leto) normalne temperature vazduha za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

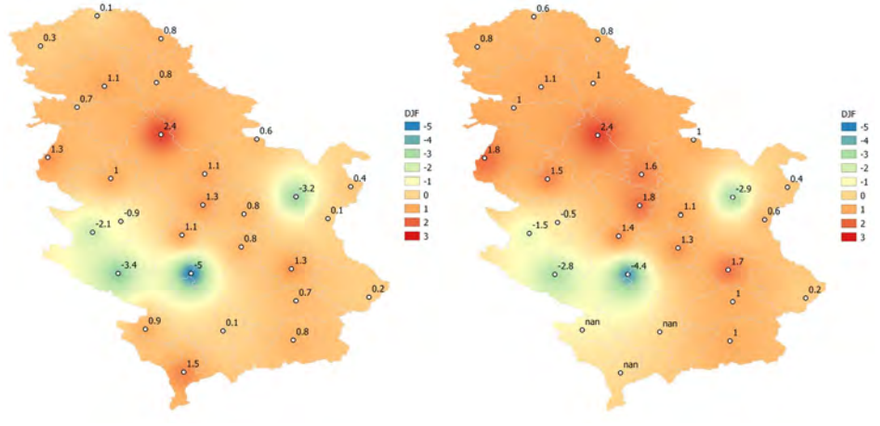


Slika 15.5.

Sezonske (jesen) normalne temperature vazduha za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

Normalna godišnja temperatura vazduha se promenila od 0,2 °C na Crnom vrhu do 0,9 °C na Kopaoniku (tabela D3). U ostatku zemlje promena normalne godišnje temperature opada sa geografskom širinom (slika 15.2) pa je, tako, najveća u severnim (Vojvodina) i centralnim delovima zemlje (0,5–0,7 °C), a nešto manja u južnim (0,3 °C u Leskovcu i Vranju). Kada su u pitanju godišnja doba,

najveća promena temperature vazduha je zabeležena tokom leta i delimično proleća i zime. Interesantno je da su najmanje promene izmerene temperature tokom jeseni, kada je u nekim krajevima (Crni vrh, Dimitrovgrad, Leskovac) došlo i do malog snižavanja temperature vazduha (tabela D3). Tokom perioda mart–avgust promena normalne temperature malo zaostaje za letnjim promenama. Sa izuzetkom Crnog vrha (Δt_{MA} = 0,4 °C) i Kopaonika (Δt_{MA} = 1,2 °C), normalna temperatura vazduha u ovom periodu se menjala u opsegu od 0,5 °C do 1,1 °C. Prostorne promene normalnih sezonskih i temperatura tokom perioda mart–avgust prate promene srednje godišnje temperature (slike 15.3–15.7).



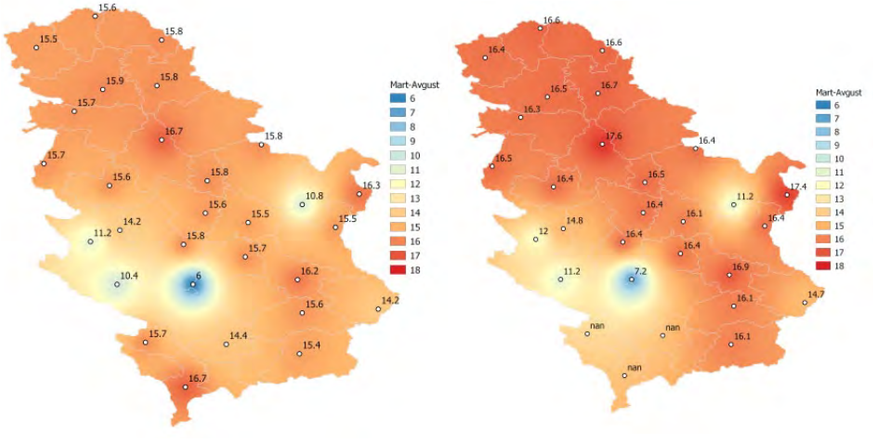
Slika 15.6.

Sezonske (zima) normalne temperature vazduha za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

Zanimljivo je uočiti da su, pored severnih delova Srbije, promene temperature u svim posmatranim periodima naročito izražene u istočnoj Srbiji (Negotin, Zaječar) i na planinama u zapadnoj i jugozapadnoj Srbiji (Zlatibor, Sjenica, Kopaonik).

Raspoloživi podaci ukazuju da je uticaj geografske širine i nadmorske visine lokaliteta na promenu normalnih godišnjih i sezonskih temperatura vazduha u Srbiji značajan. Iz tog razloga smo se ovim efektom pozabavili malo detaljnije. Izdvojili smo tri meteorološke stanice, od kojih je jedna na krajnjem severu – Palić (46,1 N), jedna na krajnjem jugu – Vranje (42,55 N) i jedna na najvećoj nadmorskoj visini – Kopaonik (1.711 m). Poređenjem normalnih mesečnih, maksimalnih i minimalnih temperatura vazduha za ova tri lokaliteta (tabele D4–D6) može se uočiti da su normalne maksimalne i srednje mesečne temperature u januaru i

letnjim mesecima porasle 1,0–1,6 °C na sva tri lokaliteta, ali je promena normalne minimalne temperature drugačija. Na Paliću je porast normalne minimalne temperature približno jednak porastu maksimalne i srednje. Na Kopaoniku je sličan godišnji hod normalne minimalne temperature, s tim da je nešto manje izražen tokom leta. Međutim, u Vranju je promena minimalne temperature relativno mala (0,0–0,4 °C) što je, delom, posledica otvorenosti Vranjske i Preševske doline za prodore toplog vazduha s juga. Sličan efekat može da se uoči i na meteorološkoj stanici u Leskovcu u zimskim i prolećnim mesecima.



Slika 15.7.

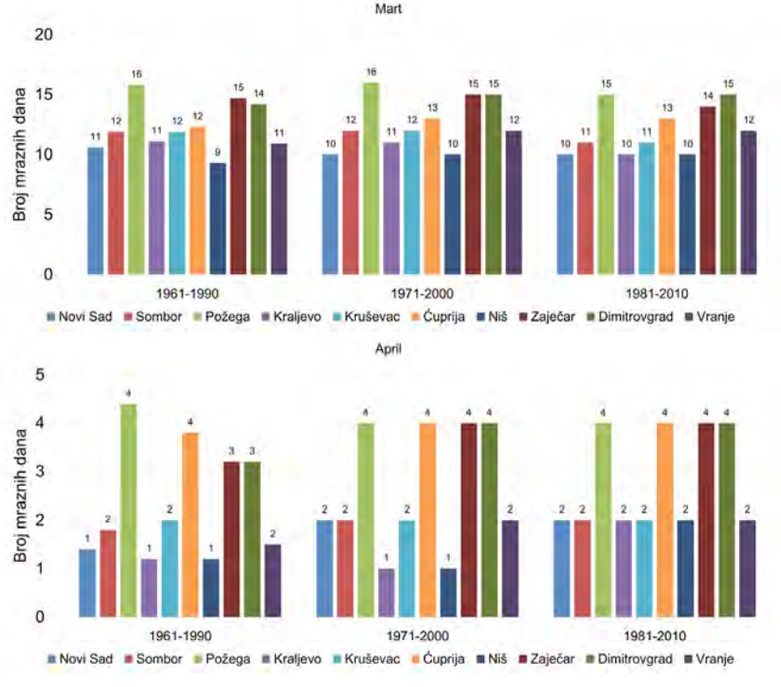
Normalne temperature vazduha za period mart–avgust tokom 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

Takođe, zanimljivo je uočiti porast osunčavanja odnosno prosečnog broja sunčanih sati tokom meseca. Za poslednji klimatološki period, od februara do avgusta, broj sunčanih sati veći je nego za period 1961–1990. Uz blagi porast srednje mesečne temperture u istom periodu, ovaj porast osunčavanja može uticati na ranije otpočinjanje vegetacije.

15.3. Učestalost dana s ekstremnim temperaturama vazduha

Porast učestalosti i intenziteta ekstremnih vremenskih prilika je jedno od najznačajnijih obeležja globalnih promena klime. Često se kvantifikuje na osnovu učestalosti dana s ekstremnim temperaturama vazduha. Sa stanovišta poljoprivrede, najznačajnija je pojava mraznih dana (T_{min}£ 0 °C) u proleće (mart–maj) i tropskih dana (T_{max} ³ 30 °C) u proleće i leto. Promena ovih veličina pokazuje da li

se klima nekog područja menja u pravcu uslova koji su manje ili više povoljni za poljoprivrednu proizvodnju. U tom smislu je zanimljivo uočiti (slika 15.8) da se prosečan broj mraznih dana u martu nije značajnije promenio tokom poslednja tri klimatološka perioda ali i da je taj broj značajan i iznosi od trećine do polovine dana u martu. Drugim rečima, ukoliko zbog blage zime vegetacija ozimih useva i nekih ranih voćnih vrsta počne ranije nego što je uobičajeno, verovatnoća da će biti izloženi mrazu je 30–50%, zavisno od regiona. Ako se tome doda činjenica da se broj dana sa snežnim pokrivačem u martu smanjio u mnogim regionima (tabela 15.1), vrlo je verovatno da biljka neće biti zaštićena snežnim pokrivačem tokom trajanja mraza i da će šteta od niskih temperatura biti maksimalna. Kada se radi o aprilskim mrazevima koji su manje verovatni (2–4 dana od 30) ali još opasniji, zabrinjava činjenica da je moguće uočiti mali ali prisutan trend porasta prosečnog broja dana s mrazom u aprilu (slika 15.8). Ovo još jednom potvrđuje da je poljoprivredna proizvodnja u Srbiji izložena ništa manjem riziku od šteta prouzrokovanih niskim temperaturama u proleće i pored porasta normalnih temperatura u ovom periodu.



Slika 15.8.

Prosečan broj mraznih dana u martu i aprilu tokom perioda 1961–1990, 1971–2000. i 1981–2010 [izvor: RHMZ Srbije]

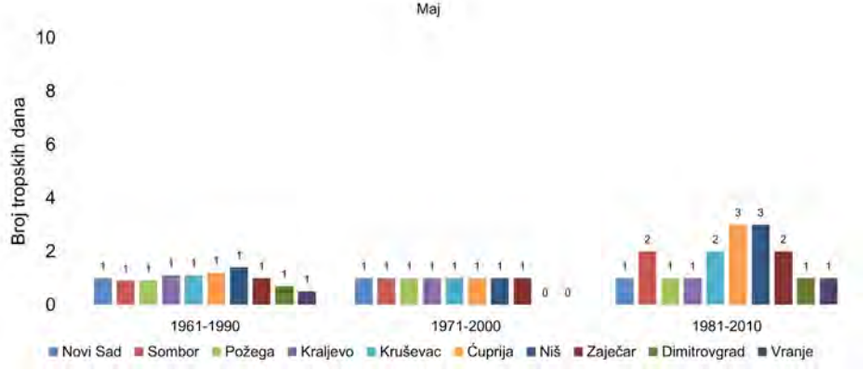
Maksimalne dnevne temperature iznad 30 °C su normalna pojava u letnjem delu godine u krajevima sa umereno-kontinentalnom i kontinentalnom klimom. Međutim, ono što može da predstavlja problem, naročito sa stanovšta poljoprivrede, jeste broj dana s ovako visokim temperaturama i njihova pojava u prolećnim mesecima.

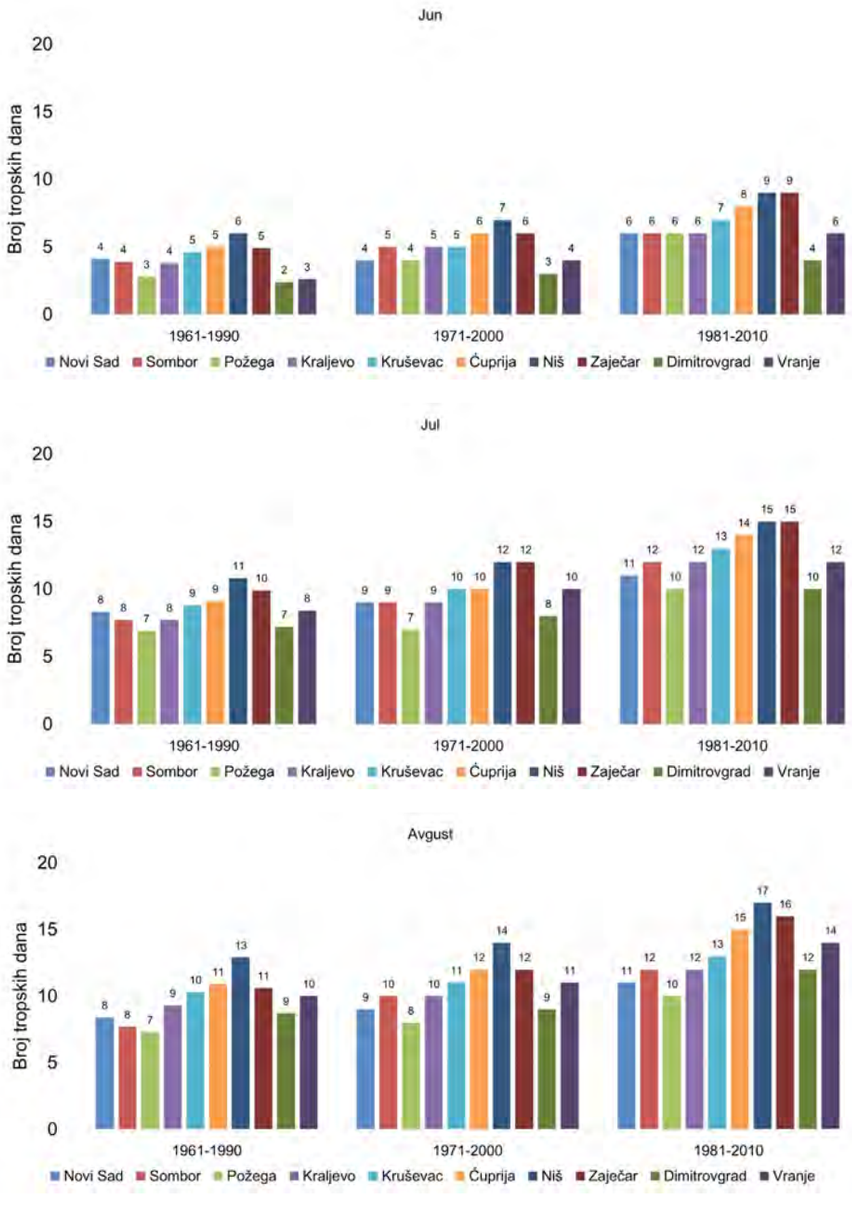
Tabela 15.1.

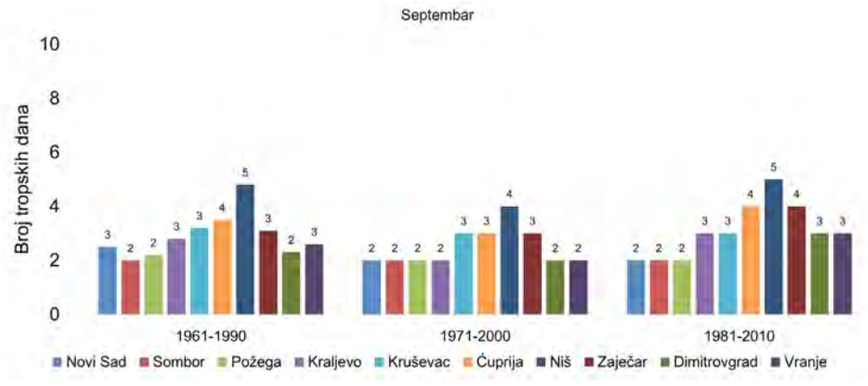
Promena broja dana sa snežnim pokrivačem u martu (Δ) tokom perioda 1981–2010 u odnosu na 1961–1990.

Lokalitet	Δ (dan)	Lokalitet	Δ (dan)
Novi Sad	-0,4	Požega	0,9
Beograd	0,2	Kruševac	0,0
Kikinda	-0,3	Ćuprija	-0,2
Palić	-1,0	Zaječar	-1,5-
Zrenjanin	-0,1	Dimitrovgrad	-1,3
Sr. Mitrovica	0,4	Vranje	-0,7
Sombor	-0,6		

U prošlosti je tropski dan u maju bio retkost. Javljao se, u proseku, jednom u trideset godina. I sada to nije postalo uobičajena pojava, ali je registrovan porast prosečnog broja tropskih dana u maju u većini krajeva (slika 15.9). U letnjim mesecima se ovaj broj povećao za 1–3 dana, u proseku, što ne deluje dramatično, ali se dodaje na ionako velik broj tropskih dana u ovom periodu povećavajući verovatnoću pojave tropskih dana na 32–55% u avgustu.







Slika 15.9.

Prosečan broj tropskih dana od maja do septembra tokom perioda 1961–1990, 1971–2000. i 1981–2010 [izvor: RHMZ Srbije]

15.4. Promene akumulacije stepen-dana i njihov uticaj na dinamiku vegetacije

Svi fiziološki i biohemijski procesi koji su od značaja za razvoj biljaka i štetnih organizama su na neki način uslovljeni temperaturom sredine u kojoj se nalaze. Najčešće, temperatura određuje kada će neki proces otpočeti (donja granična temperatura) ili se završiti (gornja granična temperatura), dok je intenzitet procesa proporcionalan energiji koja je iz spoljašnje sredine dovedena u biološki sistem. U glavi 2 je bilo reči o energetskom bilansu atmosfere i površine Zemlje kao i različitim oblicima energije koji stižu do površine (uključujući i biljke na ovoj površini). U glavi 3 smo upoznali čitaoce sa temperaturama biološkog minimuma i akumulisanim stepen-danima karakterističnim za pojedine biljne vrste i njihove faze razvoja.

Klimatske karakteristike područja, a pre svih termički režim, odlučujuće utiču na mogućnost gajenja određene biljne vrste na tom području. Samo ukoliko su dnevni hod temperature (a pre svega njegove ekstremne vrednosti) i akumulisani stepen-dani (sume temperatura) u skladu sa toplotnim zahtevima biljke u pojedinim fenološkim fazama, opravdano je razmatrati da li su i ostali uslovi zadovoljeni. Zato će u ovom poglavlju više pažnje biti posvećeno promeni akumulisanih stepen-dana u Srbiji od 1971. do 2018. godine, njihovoj varijabilnosti i trendu.

Akumulacija stepen-dana se menjala tokom posmatranog perioda, ali je prostorna raspodela uglavnom ostala neizmenjena. Tokom svih godišnjih doba

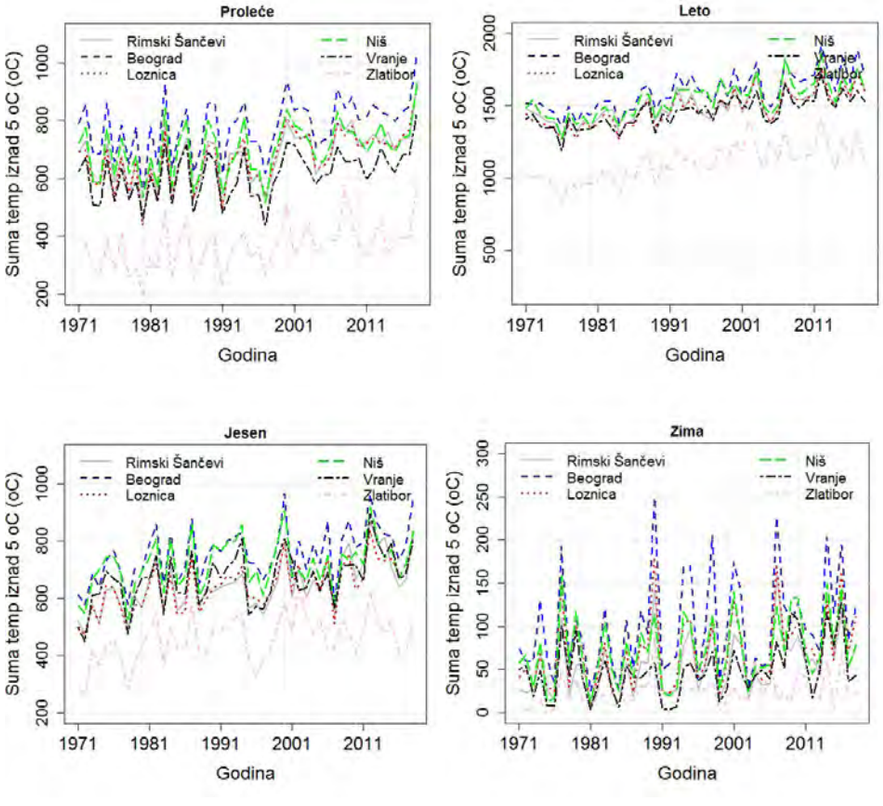
najveće akumulacije su u Beogradu i Nišu, a najmanje na Zlatiboru (slika 15.10). Ako se izuzme Zlatibor, razlike u akumulisanim stepen-danima od proleća do jeseni ne prelaze 20%. Tokom ova tri godišnja doba ni varijabilnost akumulacija nije značajna i prilično je ujednačena na svim lokalitetima, s nešto većim vrednostima na Zlatiboru (tabela D7). Međutim, rezultati dobijeni za zimske mesece značajno odstupaju od ove slike. Iako akumulacije nisu velike, njihove varijacije su značajne i mogu značajno uticati na nicanje i kaljenje ozimih useva, kao i otpočinjanje vegetacije voća u zimskim mesecima. U tom pogledu najranjiviji su lokaliteti oko Beograda. Zbog urbanog ostrva toplote su zimi akumulisani stepen-dani značajno veći od ostalih lokaliteta. Ova toplota može da se transportuje do voćnjaka u neposrednoj blizini grada i da na taj način utiče na njihovu dinamiku vegetacije.

Od 2001. do 2018. varijabilnost akumulacija je nešto manja nego u prethodnom klimatološkom periodu, ali samo zato što su od 1991. bile češće zime s povećanim akumulacijama stepen-dana pa je varijacija bila manja. S izuzetkom Zlatibora, na svim lokalitetima može da se uoči trend porasta akumulisanih stepen-dana, koji je najveći u leto, a potom – redom – u jesen, proleće i zimu (tabela D 8). Na ovom mestu želimo da skrenemo pažnju čitaoca koliko jedna godina u nizu može da utiče na trend posmatrane veličine tokom celog perioda. Naime, u tabeli D8. se naročito ističe pozitivan trend akumulacija na svim lokacijama u proleće tokom perioda 1991–2000. i 2011–2018. Zanimljivo je da su na dobijene rezultate najviše uticale akumulacije ostvarene u proleće 2000. i 2018. Bez ovih podataka trendovi bi bili u granicama prethodnih decenija i klimatološkog proseka. A šta je dovelo do izuzetno velikih akumulacija u gotovo celoj zemlji u ove dve godine? Visoke temperature u aprilu i maju, čak za nekoliko stepeni više u odnosu na višegodišnji prosek.

Tabela 15.2.

Srednje mesečne temperature u maju i aprilu 2000. i 2018. i normalne mesečne temperature za period 1981–2010.

	April			Maj		
	2000.	2018.	1981–2010.	2000.	2018.	1981–2010.
T_{sr} (°C)	14,7	17,2	11,8	18,5	20,4	17,3
T_{max} (°C)	21,2	23,7	17,7	25,5	26,7	23,0
T_{min} (°C)	8,3	10,7	6,2	11,5	14,3	11,3



Slika 15.10.

Suma temperatura vazduha iznad 5 °C u periodu 1971–2018.

Povećana učestalost i trajanje temperature vazduha koja je viša od uobičajene značajno utiče na dinamiku vegetacije i jarih i ozimih useva kao i štetnih organizama koji ih prate. Navešćemo samo jedan primer. Osmatranjem dinamike vegetacije ozime pšenice u okviru Monitoringa štetnih organizama i biljaka domaćina, koji sprovodi Prognozno-izveštajna služba u zaštiti bilja Vojvodine (PIS), uočeno je da je početkom 2016. godine na teritoriji Vojvodine došlo do znatno ranijeg nastupanja fenološke faze „četiri lista vidljiva" nego što je to bio slučaj 2015. godine (tabela 15.3). Ova pojava je posledica viših srednjih dnevnih temperatura i dužeg trajanja osunčavanja u periodu povišenih temperatura tokom zime

2015–2016. u odnosu na prethodnu zimu. Recimo, u Novom Sadu je tokom zime 2014–2015. suma temperatura vazduha iznad 5 °C iznosila 64,50 °C, a suma fototermičkih jedinica[36] (za istu temperaturu biološkog minimuma) 593,43 °C h. Sledeće zime su vrednosti ovih veličina redom bile 116,80 °C h i 1.056,92 °C h, što je gotovo dvostruko više.

Tabela 15.3.

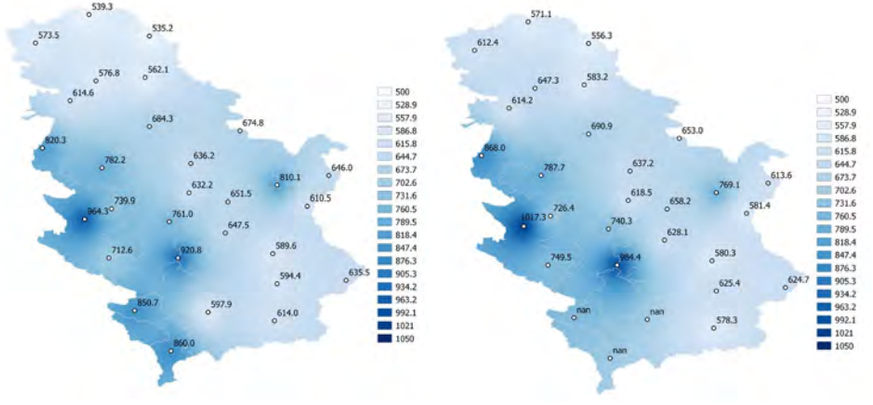
Osmotreni datumi nastupanja fenološke faze „četiri lista vidljiva" ozime pšenice na lokalitetima u Vojvodini tokom 2015. i 2016. godine. Datumi označeni „*" se odnose na vegetacioni period od jeseni 2015. do leta 2016.

Region	Datum	Razlika (dan)
Novi Sad	13. 3. 2015. 14. 1. 2016.	–58
Bačka Topola	19. 3. 2015. 20. 1. 2016.	–58
Pančevo	12. 3. 2015. 15. 2. 2016.	–26
Ruma	22. 2. 2015. 31. 12. 2015.*	–53
Sombor	3. 3. 2015. 21. 12. 2015.*	–73

15.5. Promene padavinskog režima u Srbiji

Svi podaci o normalnoj godišnjoj temperaturi vazduha koji su do sada izloženi ukazuju na činjenicu da je ova temperatura, manje ili više, u porastu u svim delovima Srbije. Za srednje godišnje količine padavina, međutim, ne može da se iznese zaključak koji bi se odnosio na teritoriju cele zemlje (slika 15.11, tabela D9). Naime, na 14 od 26 lokaliteta koji su analizirani srednja godišnja količina padavina je tokom klimatološkog perioda 1981–2010. porasla 0,2–12,2% u odnosu na period 1961–1990 (tabela D10). Na preostalim lokalitetima je zabeleženo smanjenje srednje godišnje količine padavina u iznosu 0,1–5,8% u odnosu na prethodnu klimatologiju što zaista nije značajno smanjenje. Međutim, sezonske i padavine tokom perioda mart–avgust pružaju značajno drugačiju sliku (slike 15.12–15.15). U većem delu zemlje je zabeleženo smanjenje padavina u proleće i, nešto manje izraženo, smanjenje količine padavina u leto. Najveće smanjenje količine padavina u ovom periodu je zabeleženo na lokalitetima

[36] Fototermičke jedinice (PTU) se izračunavaju kao PTU = (Tsr-Tb)*S0, gde je Tsr srednja dnevna temperatura vazduha, Tb je temperatura biološkog minimuma za datu fenološku fazu, a S0 trajanje sunčevog sjaja za posmatrani dan.

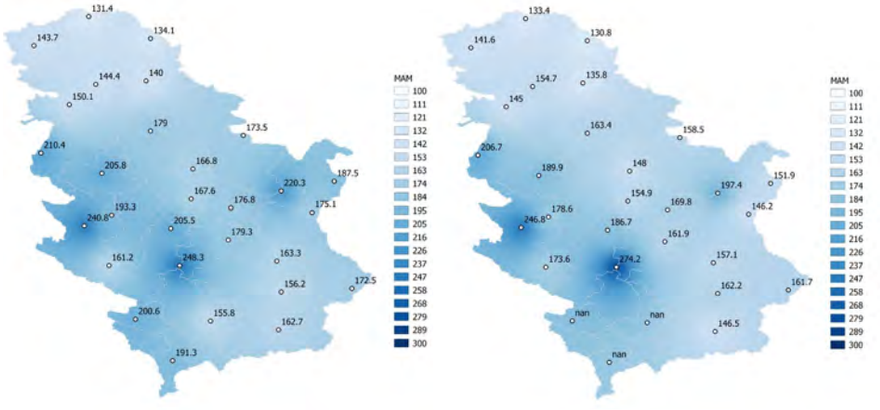


Slika 15.11.

Srednje godišnje količine padavina za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

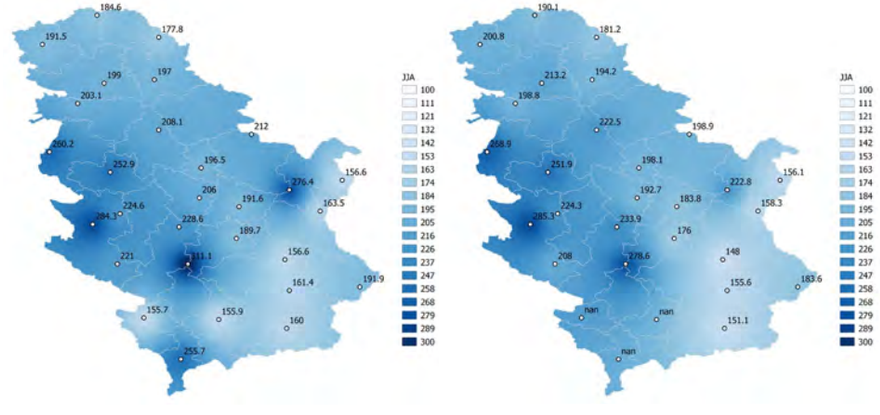
u istočnoj Srbiji (Negotin, Zaječar i Crni vrh), i iznosilo je 15–20%. Ono što takođe treba naglasiti jeste značajan porast jesenjih količina padavina koji je na severu zemlje bio od 17% do 38%, a u centralnim i južnim krajevima od 0% do 17%, sa izuzetkom Kopaonika gde je ovaj porast iznosio čak 27%. Tokom većeg dela vegetacionog perioda (MA), promene padavinskog režima su severu zemlje donele povećanje količine padavina dok je u ostatku Srbije uglavnom došlo do njenog smanjenja.

Prostorna raspodela sezonskih i godišnjih promena srednje količine padavina ukazuje na uticaj geografske širine i nadmorske visine lokaliteta na padavinski režim. Zato ćemo, kao i u slučaju promene normalnih temperatura vazduha, detaljnije analizirati srednje mesečne količine padavina na tri lokaliteta koja smo već izabrali: Palić, Kopaonik i Vranje. Poređenjem padavinskih režima na ove tri stanice (tabele D4–D6) teško je pronaći njihov zajednički imenilac izuzev činjenice da je jun mesec sa najvećom količinom padavina. U region Palića je u periodu od marta do decembra (izuzev avgusta) zabeležen porast srednje mesečne količine padavina, ali ono što može da zabrine jeste veliki porast maksimalne dnevne količine padavina u martu, uz gotovo nepromenjenu srednju mesečnu količinu padavina. Ovaj podatak može da



Slika 15.12.

Sezonske (proleće) srednje količine padavina za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

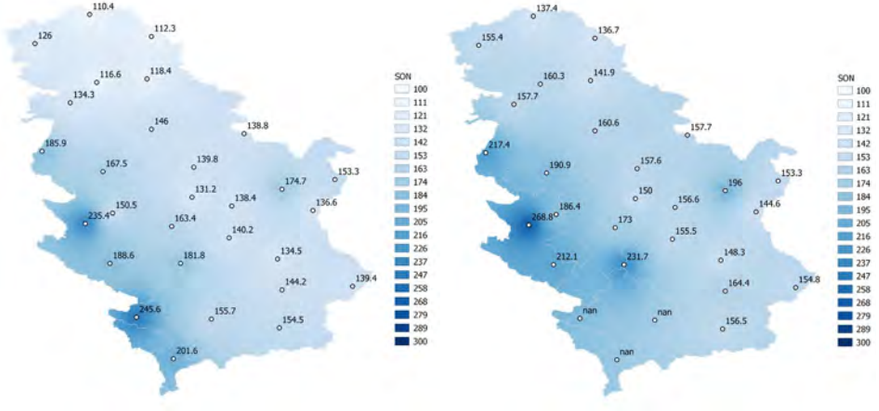


Slika 15.13.

Sezonske (leto) srednje količine padavina za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

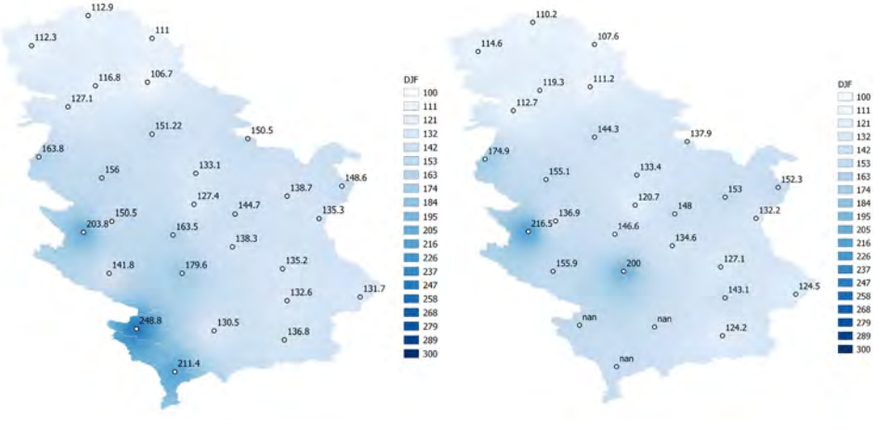
ukaže na smanjenje broja dana s padavinama, uz povećanje njihovog intenziteta, što je sa stanovišta poljoprivrede veoma nepovoljan trend. U Vranju je, međutim, zabeleženo smanjenje mesečne količine padavina tokom cele godine, sa izuzetkom perioda avgust–oktobar. Za razliku od Palića i Vranja, Kopaonik je sa

svojih 984 mm padavina u poslednjem klimatološkom periodu tipična planinska stanica. U gotovo svim mesecima je zabeležen porast srednje količine padavina. Jedino značajnije smanjenje je zabeleženo u junu i avgustu, ali je i ono manje od 20% od količine padavina za posmatrani mesec.



Slika 15.14.

Sezonske (jesen) srednje količine padavina za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]



Slika 15.15.

Sezonske (zima) srednje količine padavina za period 1961–1990 (levo) i 1981–2010 (desno) [izvor: RHMZ Srbije]

Sa stanovišta poljoprivredne proizvodnje i njenog planiranja, varijabilnost i trend padavina u višegodišnjem periodu su možda i značajniji od podatka o njihovoj srednjoj količini. Međutim, pre nego što se pozabavimo podacima, važno je imati na umu šta oni treba da saopšte proizvođaču ili agronomu odnosno koja saznanja u njima treba potražiti. U protivnom – to će biti samo brojevi koje ćemo porediti.

Varijabilnost padavina ne govori o tome da li ih ima malo ili mnogo (u odnosu na prosek, recimo), već da li ove vrednosti malo ili mnogo *variraju* oko srednje vrednosti za posmatrani period. Drugim rečima, prosečna vrednost može biti idealna, ali velika varijabilnost ukazuje da ta vrednost nikada nije postignuta, već da su redovno merene količine padavina koje su mnogo veće ili mnogo manje od proseka.

Trend količine padavina[37] je uključen u analizu jer svima zainteresovanima može da da nagoveštaj da li je i koliko situacija zabrinjavajuća. Ukoliko je trend bio velik i negativan tokom poslednjih nekoliko decenija, to jeste zabrinjavajuće i treba da uključi alarm za radikalne promene sortimenta jer se s razlogom može pretpostaviti da će u budućnosti padavina biti sve manje. Ukoliko trend nije bio velik ili je oscilirao oko nule, uz veliku varijabilnost, to ukazuje na činjenicu da svake godine može da se očekuje i manje i više padavina od proseka. Zato je neophodno, pre svega, unaprediti tehnologiju gajenja i agrotehničke mere koje za cilj imaju čuvanje vode u zemljištu. Takođe je značajno, kada je to moguće, rokove setve i dinamiku vegetacije biljke prilagoditi novonastaloj raspodeli padavina.

Kao što je to slučaj u većem delu Evrope, i u Srbiji je bila najveća varijabilnost padavina u leto, a zatim u zimu, jesen i proleće (tabela D11). Poređenjem samo dva klimatološka perioda (1971–2000. i 1981–2010) moglo bi se zaključiti da je varijabilnost sezonskih padavina u Srbiji značajna (23–50%), ali da se nije značajnije promenila tokom ova dva perioda (najviše 11% – letnje padavine u Nišu). Međutim, naročito poslednjih dvadesetak godina smo svedoci da se poljoprivredni proizvođači svake godine suočavaju ili s prekomernim ili s nedovoljnim količinama padavina, kao i ?dugim periodima bez padavina nakon kojih usledi nekoliko dana s padavinama velikog intenziteta u kojima količina dostigne mesečni prosek. Očigledno je da s klimatoloških (30 godina) treba da se „spustimo" na decenijske (10 godina) analize kako bismo više saznali o postojećoj varijabilnosti i trendu padavina.

Od prve dekade 70-ih pa do danas varijabilnost padavina je u porastu. Na nekim lokalitetima, kao što su Beograd, Niš i Zlatibor, varijabilnost letnjih padavina je u periodu 2001–2018. bila 2–2,5 puta veća nego 1971–1980. Takođe je zanimljivo kako se varijabilnost menjala po regionima. Razlika između mesta s najvećom i najmanjom varijabilnošću je u prethodne četiri dekade bila od 18% do 23%, da bi se u periodu 2001–2018. smanjila na 14% ukazujući na to da je velika varijabilnost letnjih padavina sada zastupljena na teritoriji cele Srbije.

[37] Izračunat je kao nagib linearne regresije uz ogradu da trend uglavnom nije linearan.

Kada se radi o zimskim padavinama, samo proizvođači i agronomi znaju koliko je važno da zemljište dobije dovoljne količine padavina i „dočeka" proleće s optimalnom vlagom. Varijabilnost zimskih količina padavina praktično je u celoj Srbiji u porastu iako poređenje podataka za period 1971–2000. i 1981–2010. ne dovodi do takvog zaključka. Zašto? Razlog je velika varijabilnost padavina koja je tokom prve dekade 70-ih, naročito u Beogradu, Rimskim šančevima i Loznici, uticala na obračun varijabilnosti tokom čitavog klimatološkog perioda. Samo dve zime, i to 1972. i 1973, koje su prošle sa značajno manjim količinama padavina (Rimski šančevi – 3,3, Beograd – 2,8 i Loznica – 2,7 puta manje od zimskog proseka), bile su dovoljne da se postigne rekordna varijabilnost (tabela D11).

Sezonski trendovi količine padavina za poslednja dva klimatološka perioda se ne razlikuju značajno (tabela D12). Tokom perioda 1971–2000, u proleće, leto i jesen je trend bio negativan, a tokom zime pozitivan. U narednom klimatološkom periodu na svim lokalitetima i tokom svih godišnjih doba trendovi su bili pozitivni, s izuzetkom trenda padavina u proleće na Rimskim šančevima, u Beogradu i Loznici. Iz tabele D12 se jasno vidi da ni pozitivni ni negativni trendovi ne prevazilaze 3 mm po sezoni, a najčešće su između 0,1 mm i 2 mm po sezoni, što nije mnogo u odnosu na sezonsku količinu padavina koja se meri desetinama i stotinama milimetara. Međutim, kada se trend padavina posmatra tokom decenijskog perioda umesto klimatološkog, onda se dobija nešto drugačija slika, na kojoj se izdvajaju trendovi letnjih padavina koji variraju od negativnih (-13 mm/sezoni) do pozitivnih (34 mm/sezoni).

Na ovom mestu treba naglasiti da je distribucija sezonskih padavina tokom poslednjih gotovo pedeset godina i tokom svake od decenija ponaosob daleko od linearne. Zato, iako je linearna regresija uobičajeni način da se analizira trend padavina, mi nećemo ulaziti u detaljniju analizu (linearnog) trenda, jer nam on, u osnovi, ne dalje željena saznanja o tome da li je povećanje ili smanjenje količine padavina karakteristika posmatranog perioda.

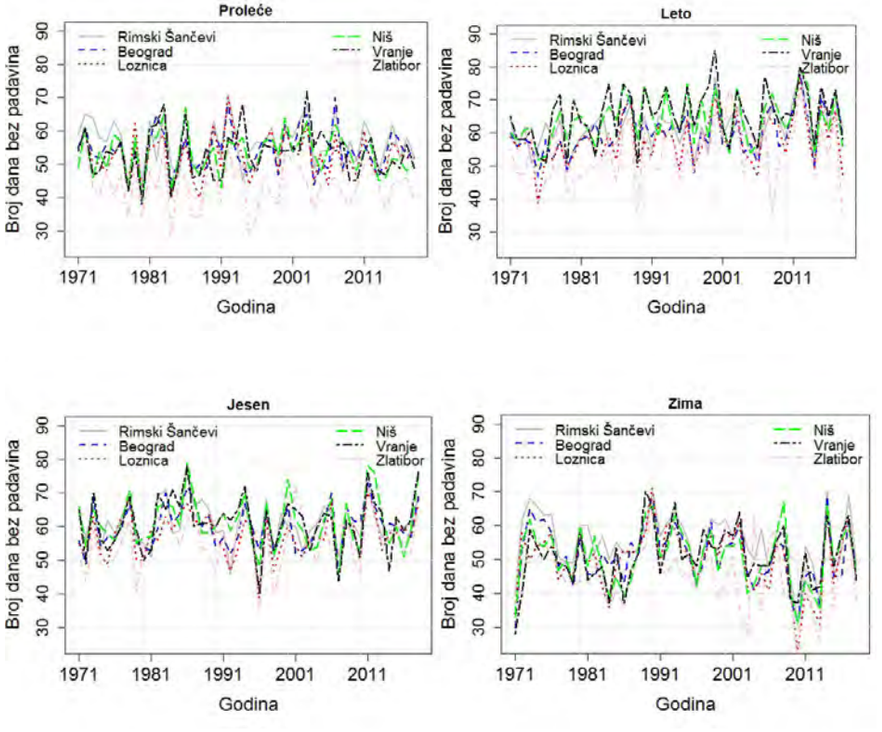
Izloženi rezultati jasno svedoče da je varijabilnost sezonskih količina padavina najznačajnije obeležje vremena i važno obeležje klime u Srbiji u poslednjim decenijama. Poznavanje varijabilnosti i trenda sezonskih padavina mogu da pomognu u sagledavanju prilagodljivosti pojedinih biljnih vrsta i štetnih organizama, donošenju zaključaka o agrotehničkim merama i tehnologiji proizvodnje koja je u datim okolnostima dala najbolje rezultate i koje u budućnosti treba dalje razvijati.

15.6. Učestalost dana bez padavina

Analiza godišnjih, sezonskih i mesečnih količina padavina i njihovih promena je pokazala da izvesno smanjenje količine padavina može da se uoči, ali da ono nikad ne prelazi 20% (tabela D10). Pa ipak, svedoci smo čestih šteta od suše ili permanentnog deficita padavina kome su biljke izložene naročito u vegetacionom periodu. U poglavlju 9.1 je dosta rečeno o suši. Nema sumnje da je to kompleksan fenomen koji je posledica manjka padavina i/ili temperatura viših nego što je normalno za posmatrani period. Međutim, samo srednje količine padavina i normalne temperature nisu dovoljne da bi se u klimatološkoj analizi uočila rastuća aridnost[38] nekog područja. Iz tog razloga ćemo našu analizu padavinskog režima upotpuniti analizom broja dana bez padavina i dužinom ovakvih perioda u pojedinim sezonama u nadi da će uočeni trendovi dati potpuniju sliku klime, ali i aktuelnih vremenskih obrazaca. Za ovu vrstu analize potrebne su dnevne vrednosti meteoroloških elemenata koje su, nažalost, dostupne samo za vrlo ograničen broj klimatoloških stanica u Srbiji. Zato će analiza biti obavljena za lokalitete Rimski šančevi, Beograd, Loznica, Zlatibor, Niš i Vranje.

Kada se radi o prostornoj raspodeli sušnih dana u pojedinim sezonama, najmanje ih je, prema očekivanjima, na Zlatiboru. Izuzetak su samo leto 2002. i 2012. i jesen 2001. i 2011, kada je i na Zlatiboru bilo preko 70 dana bez padavina. Na ostalim lokalitetima – u proleće – broj dana bez padavina je između 40 i 70 tokom celokupnog perioda (slika 15.16). Zanimljivo je da je posle 2005. varijabilnost broja sušnih dana u proleće još manja (tabela D13) i očekivane vrednosti su između 45 i 60 dana. Tokom leta i jeseni, Vranje i Niš su uglavnom lokaliteti s najviše dana bez padavina, ali u pojedinim godinama razlika između lokaliteta nije značajna tokom većeg dela posmatranog perioda. Međutim, raspodela sušnih dana tokom zime je mnogo neizvesnija. Varijabilnost je naročito izražena posle 2001. na svim lokalitetima, a naročito na Zlatiboru i u Loznici (tabela D13).

[38] Podsećamo još jednom da je suša karakteristika vremena, a aridnost karakteristika klime.



Slika 15.16.

Broj dana bez padavina po sezonama u periodu 1971–2018.

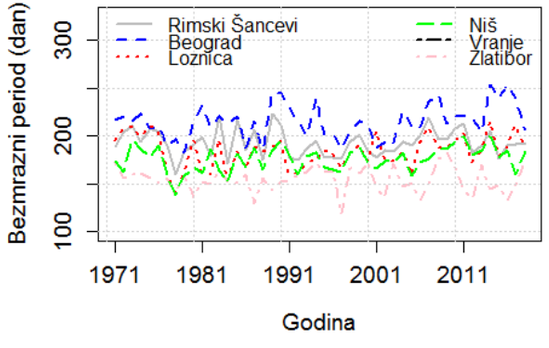
15.7. Dužina perioda bez mraza

Pojava poslednjeg mraza[39] u proleće i prvog u jesen ili zimu, odnosno trajanje bezmraznog perioda, utiče na energetski i vodni bilans zemljišta i ciklus ugljenika u zemljištu i atmosferi, na dinamiku vegetacije biljaka, kao i životni ciklus životinja. U mnogim regionima u svetu (SAD, recimo) produžavanje bezmraznog perioda je jedno od najznačajnijih obeležja klime. Da li je to slučaj i u Srbiji? Kako bismo dali odgovor na ovo pitanje, analizirali smo prosečno trajanje perioda bez mraza, njegov trend i varijabilnost u različitim periodima, uključujući i klimatološke, od 1971. do 2018. godine.

[39] Mrazni dan je dan u kome je minimalna temperatura vazduha ispod 0 °C

Dužine bezmraznog perioda prikazane na slici 15.17. ukazuju na regionalne specifičnosti i njihove promene tokom više decenija. Period bez mraza, naravno, najduže traje u Beogradu, koji je i najtopliji grad u zemlji, a najkraće na Zlatiboru. Do početka 90-ih dužina ovog perioda na Rimskim šančevima i u Beogradu bila je gotovo izjednačena, da bi potom, iz godine u godinu, dužina perioda bez mraza u Beogradu bila sve veća. Slična situacija može da se zapazi i između Niša i Vranja. Do 2010. dužina perioda bez mraza u ova dva grada se nije značajnije razlikovala, da bi od 2011. period bez mraza u Nišu postao primetno duži nego u Vranju.

Sa izuzetkom Zlatibora, dužina perioda bez mraza je manje-više jednako varirala u celoj Srbiji (tabela D15). Izuzetak je jedino period 1971–1980, kada nešto veća varijabilnost može da se uoči u Loznici i Nišu. Od 1991. najveća varijabilnost



Slika 15.17.

Dužina bezmraznog perioda (dani) u Srbiji u periodu 1971–2018.

dužine bezmraznog perioda je bila na Zlatiboru, što je i očekivano jer nije retkost da se u planinskim predelima pojavi mraz u toplom delu godine, recimo u maju ili septembru. Malo skraćenje perioda bez mraza može da se uoči samo tokom 70-ih. Od 1981. do 2018. dužina ovog perioda se ili nije menjala ili je rasla. Dakle, promene dužine bezmraznog perioda jesu značajno obeležje klimatskih promena u Srbiji. Iako nije moguće reći da će ovaj trend uvek biti značajan, možemo očekivati da i u narednim decenijama bude pozitivan.

16. Očekivane promene klime u Srbiji

Klimatske promene nisu više nepovoljan događaj koji nas očekuje u neizvesnoj budućnosti. Takvo razmišljanje je bilo primereno 90-ih godina. One su danas naša realnost. Prošlo je gotovo 20 od prvih 30 godina 21. veka koje ujedno predstavljaju prvi integracioni period svih klimatskih modela (2001–2030.) razvijanih i testiranih tokom 90-ih godina. Tada su to bila samo predviđanja stručnjaka kojima se verovalo manje ili više. Danas smo u prilici da bar delimično testiramo kvalitet prvih klimatskih simulacija i ponešto zaključimo o neizvesnoj budućnosti, kao što smo to uradili pre dvadeset i više godina.

16.1. Uvodne napomene

Očekivane promene klime u Srbiji analizirane su korišćenjem rezultata klimatskih simulacija za temperaturu i padavine, i na osnovu njih izračunatih indeksa, za period 2001–2030. i 2071–2100[40]. Ove vrednosti su poređene sa istim veličinama i indeksima izračunatim u odnosu na referentni klimatološki period (1971–2000). Periodi koji će na ovom mestu biti analizirani su godina, vegetacioni period jarih useva (od 1. 4. do 1. 10) i zima (od 1. 12. do 1. 3.).

Broj ekstremno sušnih dana, kada je stvarna evapotranspiracija samo 30% od referentne, izračunat je korišćenjem AGRICLIM modela, dok su očekivane promene prinosa ozime pšenice izračunate korišćenjem modela SIRIUS (http://resources.rothamsted.ac.uk/ mas-models/sirius).

Iako je o simulacijama klime bilo reči u glavi 12, naglasićemo još jednom da ove simulacije nemaju karakter prognoze vremena. Dakle, njihov cilj nije da prognoziraju srednju dnevnu temperaturu vazduha za dvadeset ili trideset godina.

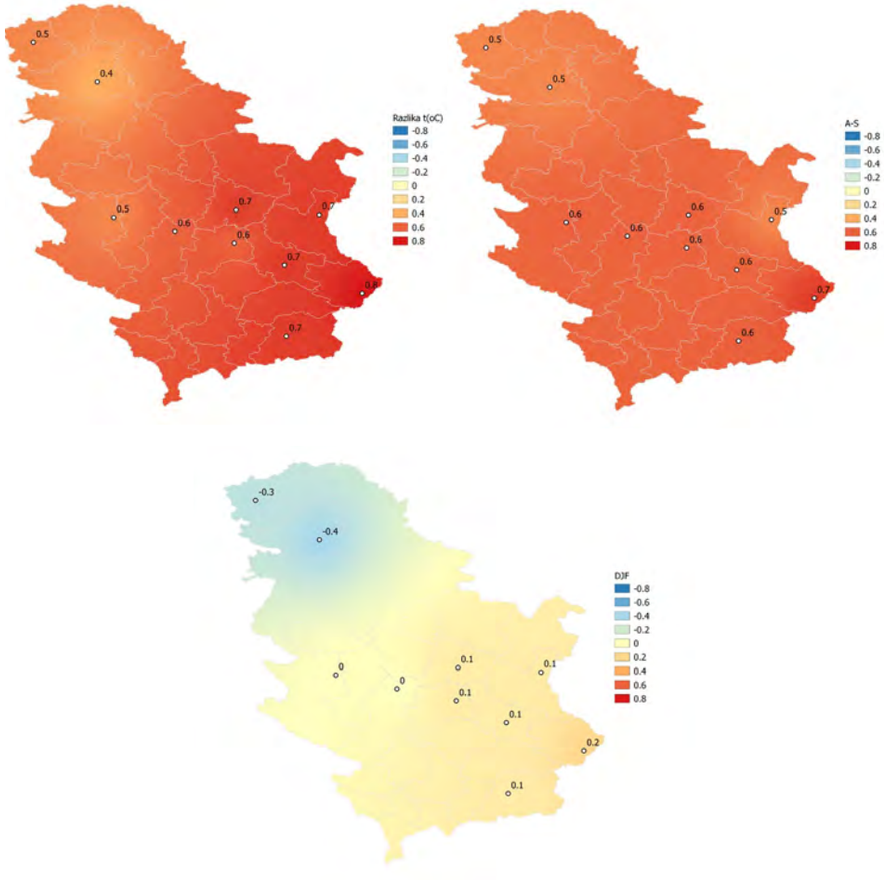
[40] Vremenske serije za srednje dnevne, maksimalne i minimalne temperature i dnevne količine padavina od 2001. do 2100. su dobijene iz EBU–POM modela (Đurđević and Rajković, 2012) kojim je obavljena regionalizacija simulacija ECHAM5 klimatskog modela sa A1B scenarijem za emisiju gasova staklene bašte za period 2001–2030. i A2 scenarijem za period 2071–2100.

Njihov cilj je da daju što je moguće bolje očekivanje tridesetogodišnjeg proseka klimatskih elemenata u bućunosti i trend koji može da se očekuje.

Kada su u pitanju simulacije klime, često postoji sumnja u njihove rezultate. S obzirom da je za verifikaciju potrebno da prođe bar trideset godina, ne možemo se nadati skorim rezultatima. Međutim, poređenjem aktuelnih i očekivanih trendova možemo doći do vrlo verovatnih zaključaka. Zato ćemo srednje vrednosti nekih veličina i indeksa za period 2001–2018. uporediti sa predviđanjima klimatskih modela za onaj 2001–2030. i pokušati da utvrdimo koliko su događaji koji su se odigrali tokom više od polovine integracionog perioda u skladu sa predviđanjima.

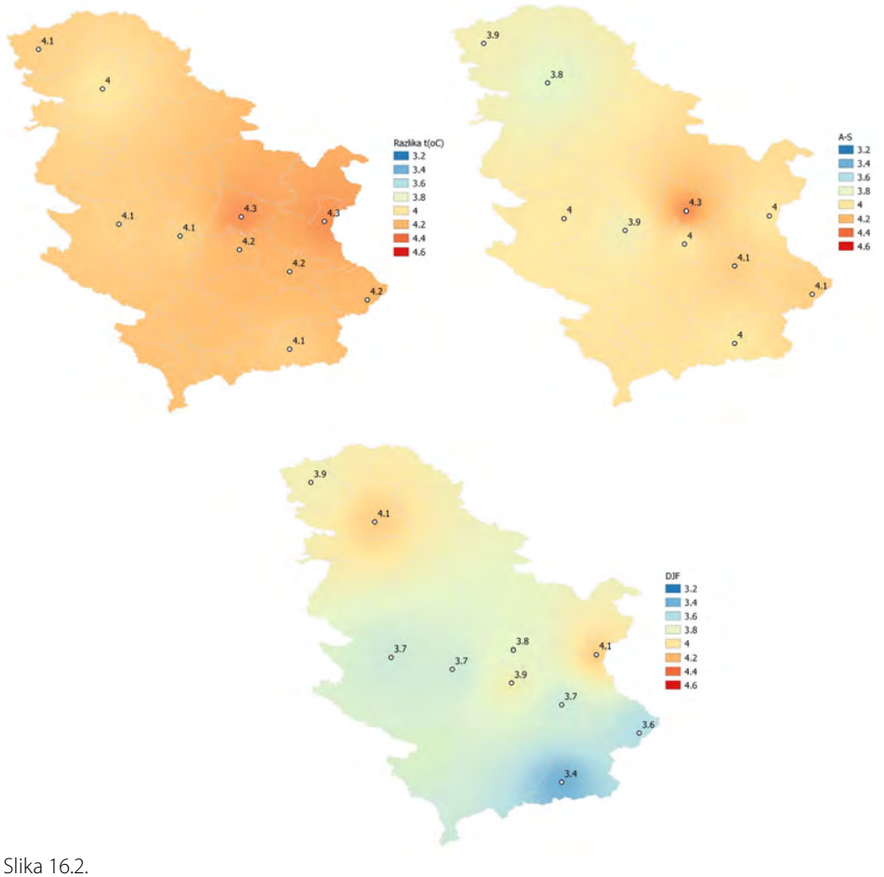
16.2. Očekivane promene temperaturnog režima

Očekivane promene normalne temperature vazduha u Srbiji imaju jednu važnu osobinu – prostornu uniformnost. Na slikama 16.1 i 16.2 može se videti da je i promena normalne godišnje i sezonske temperature vazduha uvek najmanja na severu i severozapadu, a najveća na istoku i jugoistoku, ali se, isto tako, može videti i da su te promene relativno male. U prvih trideset godina 21. veka očekivane promene srednjih godišnjih temperatura kreću se od 0,3 do 0,8 °C, a očekivane promene normalne temperature tokom zime su toliko maleda možemo smatrati da se tridesetogodišnji prosek temperatura za tri zimska meseca neće promeniti. Daleko veće promene normalnih temperatura se očekuju 2071–2100. Promene normalne godišnje temperature u ovom periodu kreću se u malom rasponu, od 4,0 do 4,3 °C. Zavisno od regiona očekuje se da će promene normalne temperature vazduha tokom vegetacionog perioda jarih useva (1. april - 1. oktobar) i zimskog perioda varirati od 3,4 do 4, 3 °C.



Slika 16.1.

Očekivane promene normalne godišnje temperature vazduha (gore levo), normalne temperature vazduha za april–septembar (gore desno) i decembar–februar (dole) u periodu 2001–2030. u odnosu na 1971–2000.



Slika 16.2.

Očekivane promene normalne godišnje temperature vazduha (gore levo), kao i normalne temperature vazduha za april–septembar (gore desno) i decembar–februar (dole) u periodu 2071–2100. u odnosu na 1971–2000.

Poređenjem promena temperatura u periodu 1981–2010. u odnosu na 1961–1990 (tabela D3) i očekivanih promena temperature u budućnosti (2001–2030 [tabela D17]) interesantno je zapaziti da su promene normalne godišnje temperature približno jednake, ali su u prošlosti promene temperatura tokom leta bile nešto veće od onih koje su klimatski modeli predvideli u bliskoj budućnosti.

Tabela 16.1

Prosečne vrednosti srednje godišnje temperature vazduha u periodu 2001–2018 (na osnovu izmerenih temperatura vazduha) i očekivane vrednosti za period 2001–2030 (na osnovu temperatura vazduha dobijenih klimatskim simulacijama)

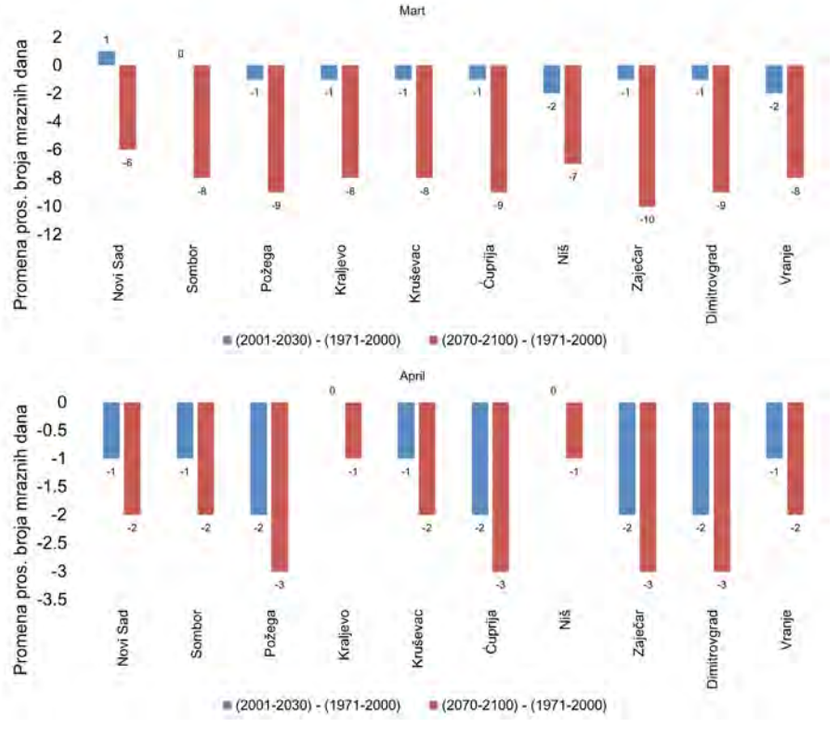
Lokalitet	T_g (°C)	
	2001–2018.	2001–2030.
Rimski šančevi	12,3	11,8
Niš	12,7	12,6
Vranje	12,0	11,7

Na kraju ćemo pokušati da procenimo koliko su klimatske simulacije temperature vazduha za prvih trideset godina 21. veka u skladu s do sada izmerenim temperaturama. Iz poređenja srednje godišnje temperature za period 2001–2018. i 2001–2030 (tabela 16.1) vidimo da je temperatura već sada nešto viša od očekivanog proseka za klimatološki period. S obzirom da je malo verovatno da će do kraja 2030. temperature biti niže od dosadašnjeg proseka, možemo zaključiti da će u Srbiji srednja godišnja temperatura za period 2001–2030. biti nešto viša nego što su to predvidele simulacije klime s „optimističkim" (A1B) scenarijem za koncentraciju gasova staklene bašte.

16.3. Očekivane promene učestalosti dana s ekstremnim temperaturama vazduha

Ekstremne vremenske prilike su neizostavni deo priče o klimatskim promenama. Vremenske situacije u poslednjih tridesetak godina su nas uverile da je broj ovakvih događaja u porastu u svim delovima sveta. U poglavlju 15.3 su prikazani podaci koji ukazuju na to da ni Srbija nije izuzetak kada se radi o češćoj pojavi dana s ekstremnim vrednostima temperature vazduha. Sa stanovišta poljoprivrede naročito su važne ekstremne temperature u prolećnim i letnjim mesecima, ali se ispostavilo da i na zimu treba obratiti pažnju. Iz tog razloga je očekivani uticaj klimatskih promena analiziran na osnovu promene broja mraznih, letnjih i tropskih dana[41] u karakterističnim periodima u godini (slike 16.3–16.5 i tabela D18).

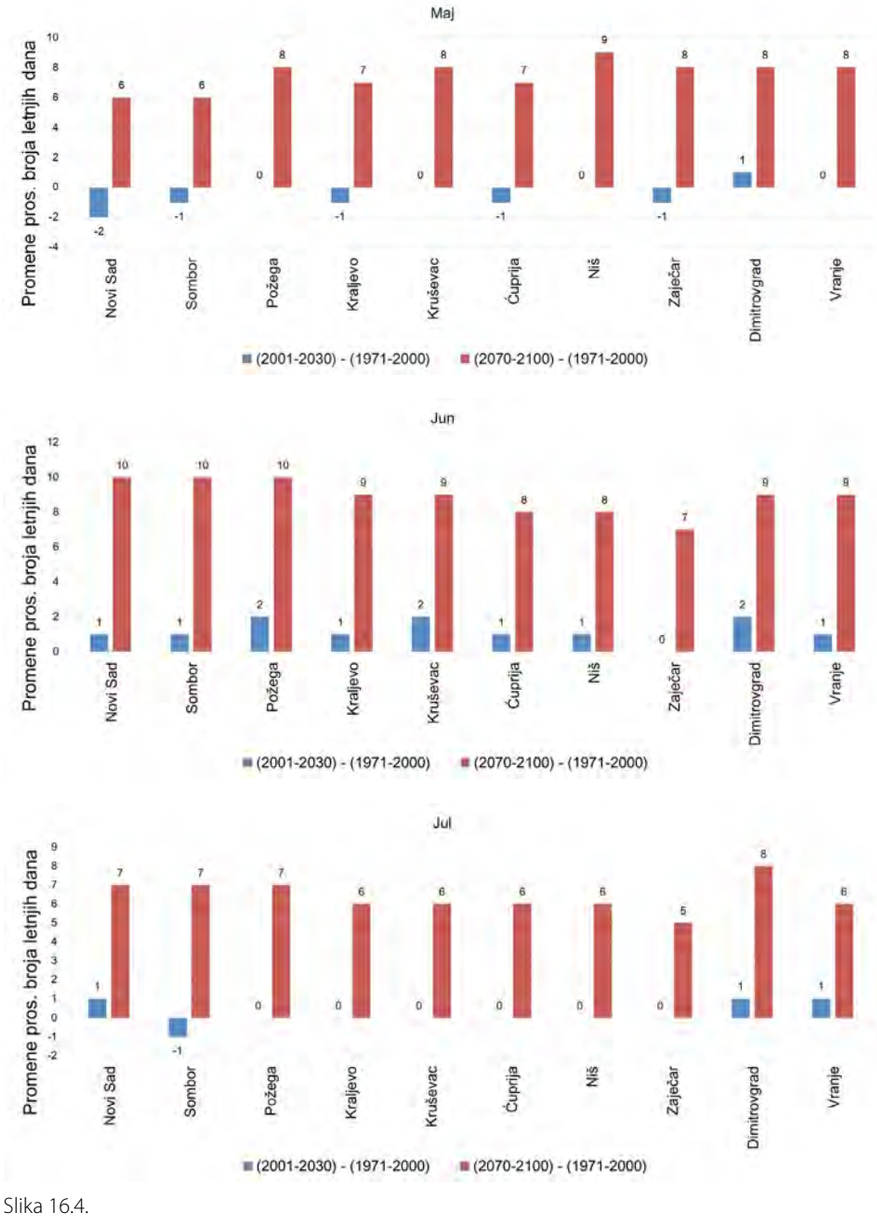
[41] Da podsetimo, dan je mrazni ako je $T_{min} < 0$ °C, letnji ako je $T_{max} \geq 25$ °C, tropski ako je $T_{max} \geq 30$ °C



Slika 16.3.

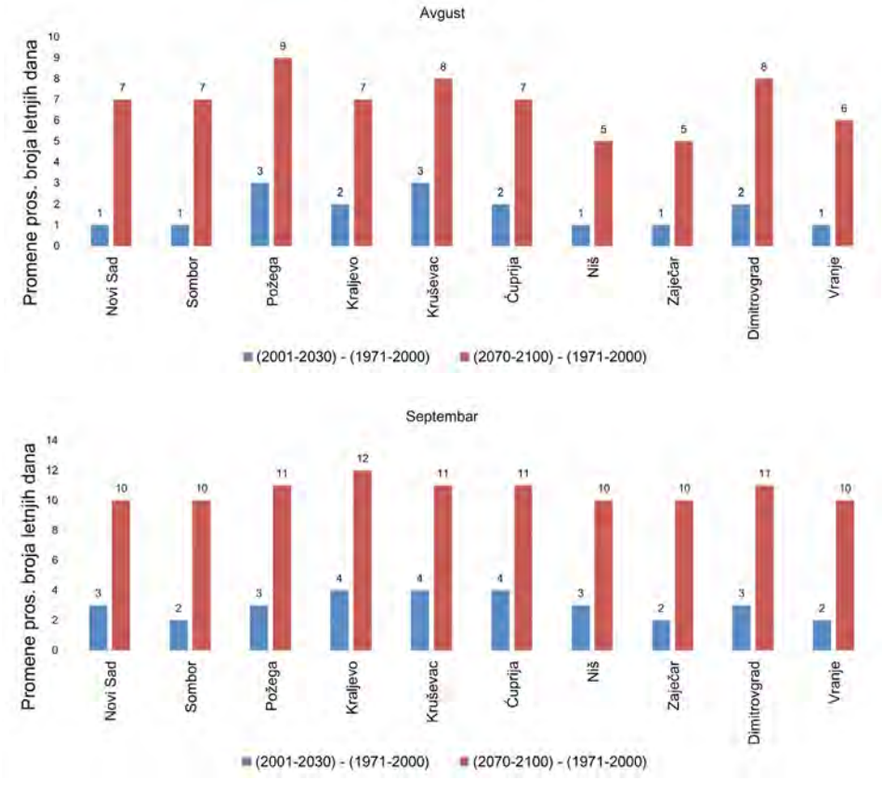
Očekivane promene prosečnog broja mraznih dana u martu i aprilu tokom perioda 2001–2030. i 2071–2100. u odnosu na period 1971–2000.

Mrazni dani u proleće su jedan od najvećih problema u poljoprivrednoj proizvodnji. Zato je dobra vest da se očekuje značajno smanjenje broja mraznih dana u nastupajućim decenijama. Istina, u periodu 2001–2030. se u Vojvodini očekuje nešto veći ili isti broj mraznih dana u martu kao što je to bilo u prošlosti, ali će u ostatku zemlje doći do smanjenja ove vrednosti naročito krajem 21. veka (slika 16.6). U aprilu je smanjenje broja mraznih dana u ovom periodu još značajnije u celoj zemlji. Međutim, to ne znači da je opasnost od prolećnog mraza prošla, već da se verovatnoća pojave smanjila.



Slika 16.4.

Nastavak na sledećoj strani



Slika 16.4.

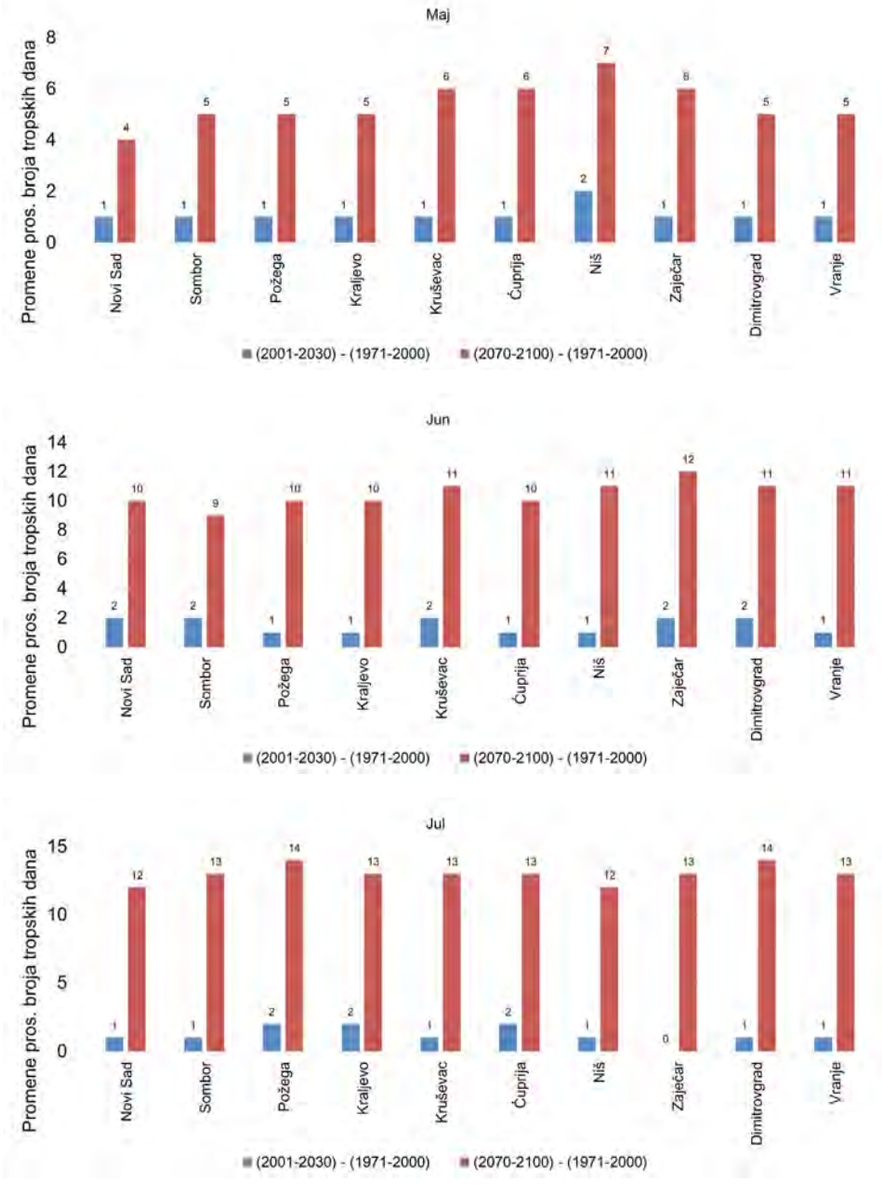
Očekivane promene prosečnog broja letnjih dana od maja do septembra tokom perioda 2001–2030. i 2071–2100. u odnosu na period 1971–2000.

Mraz je normalna pojava u hladnom delu godine i zato se brojem mraznih dana tokom zime nismo ni bavili prilikom analize klime u prošlosti i sadašnjosti (poglavlje 15.3). Međutim, klimatski scenariji nas upozoravaju na značajno smanjenje broja mraznih dana u drugoj polovini 21. veka (slika 16.3) što će vidno uticati na mirovanja voća i kaljenje ozimih useva.

Analizu broja letnjih i tropskih dana ćemo započeti u maju a završiti u septembru. Činjenica da će period od interesa biti ovoliko proširen u odnosu na analizu broja letnjih i toplih dana u prošlosti i sadašnjosti (poglavlje 15.3) jasno govori da su predviđanja klimatskih modela u tom smislu jasna: dani s temperaturama preko 25 °C i 30 °C će se pojavljivati ranije u godini, duže će trajati period u kome je značajna verovatnoća za njihovo pojavljivanje i učestalost pojave će se

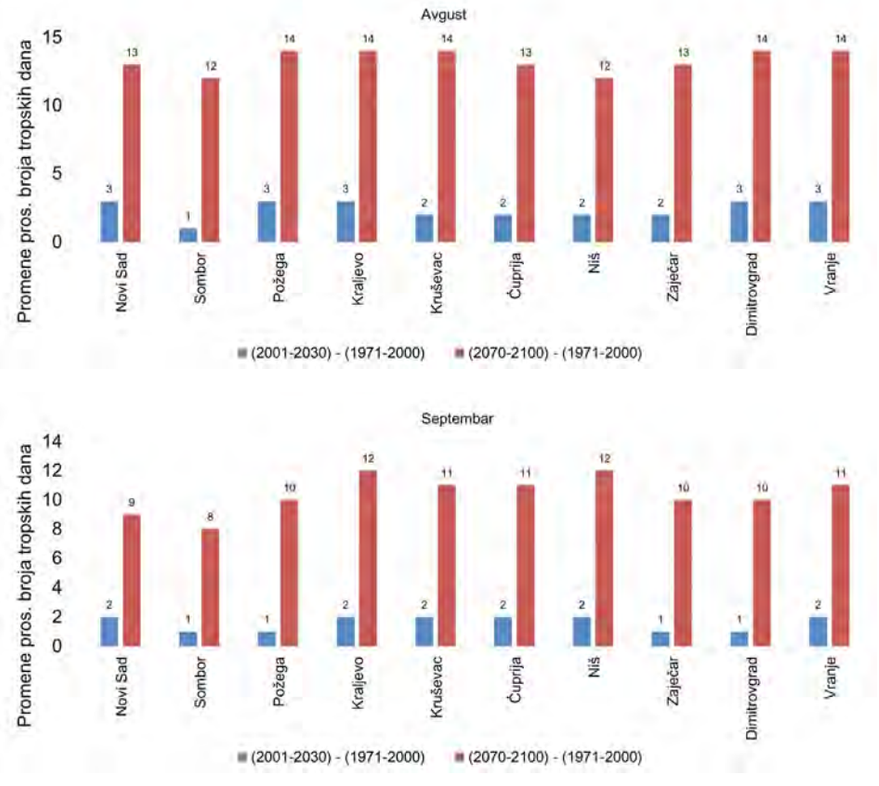
povećati u mesecima u kojima su do sada bili redovna pojava. Pogledajmo sada nešto detaljnije kako izgledaju očekivane promene.

U periodu 2001–2030. u maju se očekuje da se broj letnjih dana smanji za 1–2, a broj tropskih poveća u istom iznosu. S druge strane, u septembru se očekuje porast broja i letnjih (2-4) i tropskih (1–2) dana (slike 16.4 i 16.5). Najznačajnija promena broja letnjih dana tokom leta se očekuje u junu i avgustu, što ukazuju na produžetak najtoplijeg letnjeg perioda. Rezultati prikazani u tabeli D18. ne treba da zavaraju čitaoca. Mala relativna promena broja letnjih i tropskih dana, u odnosu na druge mesece, samo znači da će se jun približiti julu po broju letnjih dana a da će avgust postati još topliji. Kada se radi o tropskim danima, očekivani porast je mnogo dramatičniji, naročito u junu. Za kraj 21. veka se predviđa višestruko povećanje broja dana s ekstremnim temperaturama tokom celokupnog posmatranog perioda.



Slika 16.5.

Nastavak na sledećoj strani



Slika 16.5.

Očekivane promene prosečnog broja tropskih dana od maja do septembra tokom perioda 2001-2030. i 2071-2100. u odnosu na period 1971-2000.

16.4. Očekivane promene akumulacije stepen-dana i njihov uticaj na dinamiku vegetacije

Prema predviđanjima klimatskih modela, u periodu 2001–2030. očekuje se porast akumulisanih stepen-dana koji je u skladu s očekivanim porastom temperature vazduha (slike 16.6. i 16.7). Ove promene su prilično ujednačene na teritoriji cele zemlje i variraju od 3% do 12%, zavisno od temperature biološkog minimuma (tabela D19). Ukoliko uporedimo ova očekivanja s akumulacijama koje su se već odigrale tokom prvih osamnaest godina posmatranog perioda, može se doći do zanimljivih zaključaka (tabela 16.2). Naime, očigledno je da su do sada ostvarene sume, u proseku, veće od očekivanih za celokupan period 2001–2030.

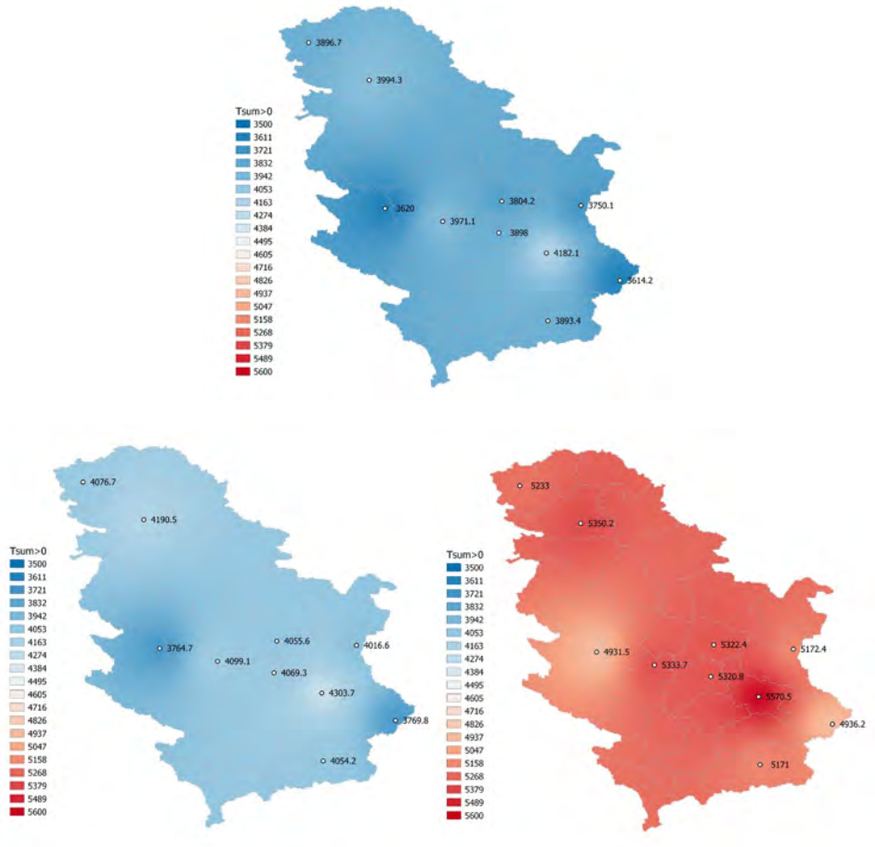
za oko 300 °C (~10%). Da bi klimatska očekivanja bila ispunjena, u narednih 12 godina bi temperature trebalo da budu nešto niže nego u proteklih 18 godina, što je malo verovatno. Mnogo je verovatnije da se predviđanja „optimističkih" (A1B) scenarija klimatskih promena neće ostvariti, bar kada su u pitanju temperature vazduha u Srbiji.

Tabela 16.2.

Prosečne vrednosti akumulisanih stepen-dana iznad 5 °C u periodu 2001–2018 (na osnovu izmerenih temperatura vazduha) i očekivane vrednosti za period 2001–2030 (na osnovu temperatura vazduha dobijenih klimatskim simulacijama)

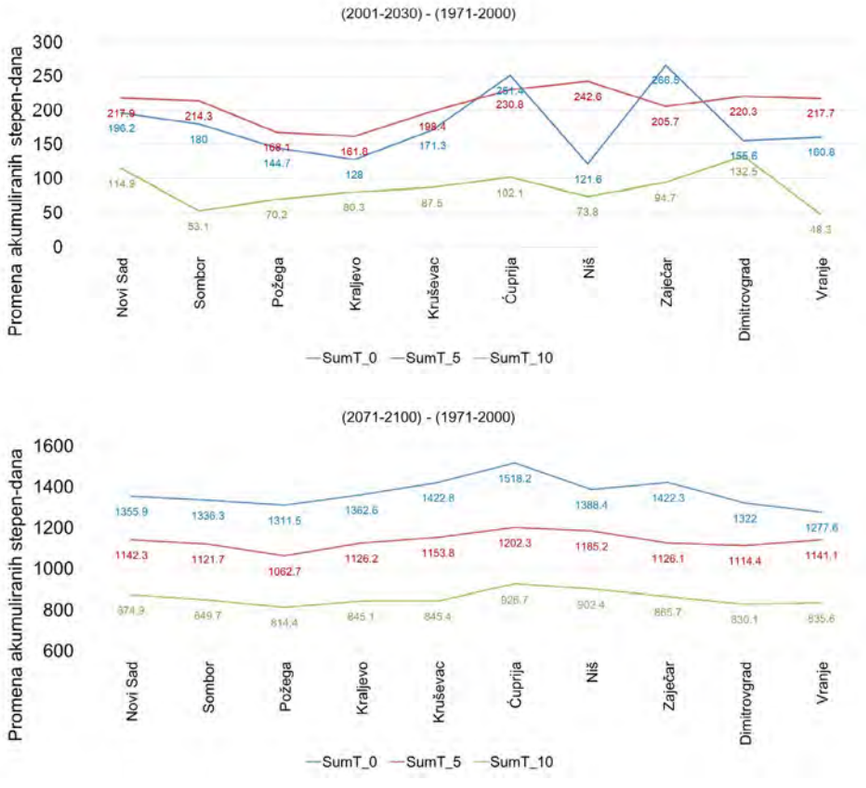
Lokalitet	SD (5 °C)	
	2001–2018.	2001–2030.
Rimski šančevi	3 095	2 760
Niš	3 197	2 908
Vranje	2 966	2 650

U pogledu poslednjih decenija 21. veka svi klimatski scenariji predviđaju značajan (30%-70%) porast akumulisanih stepen-dana, naročito za više temperature biološkog minimuma (tabela D19). Ovaj efekat je posledica očekivanog značajnog porasta temperature u proleće, a naročito u leto.



Slika 16.6.

Osmotrene (1971–2000 [gore]) i očekivane (2001–2030, 2071–2100 [dole levo i desno]) akumulacije stepen-dana iznad 0 °C



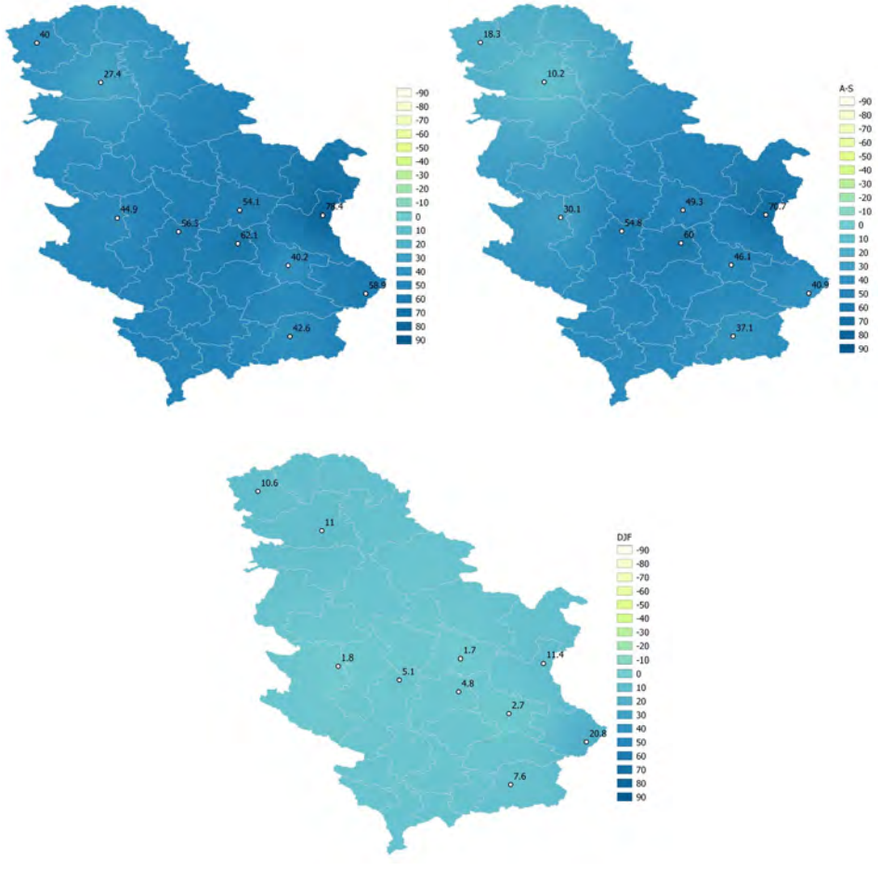
Slika 16.7.

Očekivana promena akumulisanih stepen-dana (2001–2030, 2071–2100) u odnosu na osmotrene vrednosti (1971–2000)

16.5. Očekivane promene padavinskog režima u Srbiji

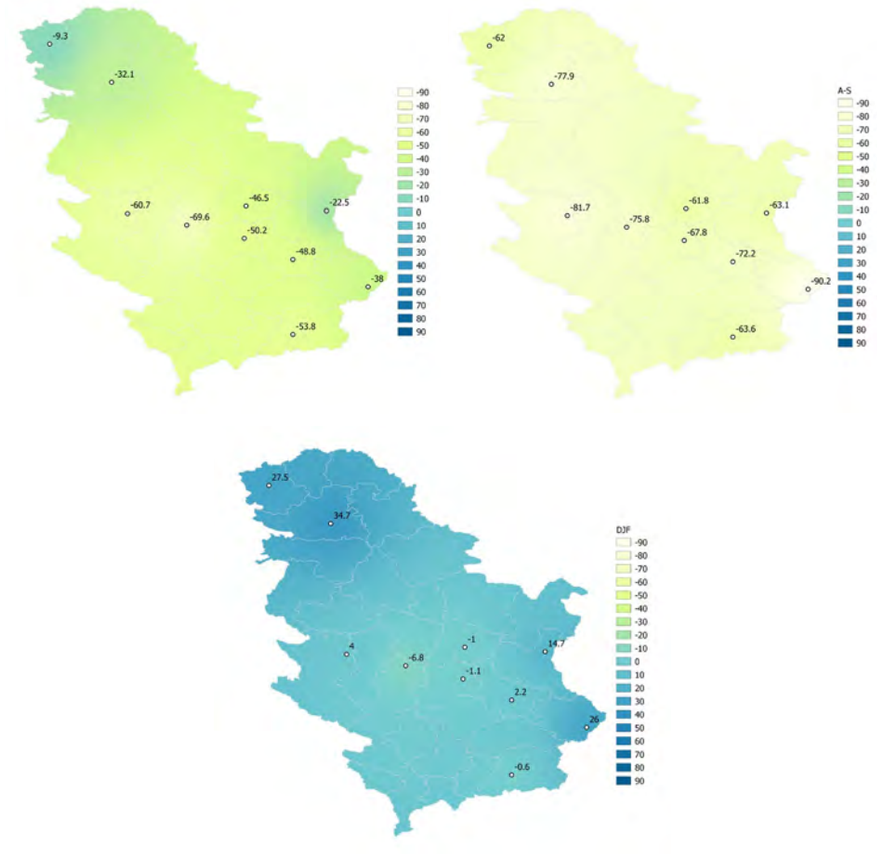
Poznavanje očekivanih promena godišnje i sezonske količine padavina u Srbiji je od presudnog značaja za donošenje strateških odluka u planiranju poljoprivredne proizvodnje u narednim decenijama. Poređenje količina padavina izmerenih u periodu 2001–2018. sa predviđanjima klimatskih modela može doprineti boljem razumevanju ovih simulacija i distribucije padavina koju možemo da očekujemo u budućnosti.

Pre petnaestak godina klimatski modeli su predviđali porast količine padavina u Srbiji u prvih tridest godina 21. veka. U to vreme je, u javnosti i u naučnoj zajednici koja nije bila usko specijalizovana za probleme klimatskih promena, još uvek postojala crno-bela slika klimatskih promena: toplije i suvlje. Čitalac može samo da zamisli koliko je bilo važno oprezno saopštiti rezultate simulacija. Svi su imali svoju sliku budućnosti i klimatskih promena u njoj, te rezultati koji nisu u skladu s očekivanjima mogli bi da poljuljaju poverenje u celokupne rezultate klimatskih modela. Kako su izgledali neka druga reč? ovih simulacija može se videti na slikama 16.8. i 16.9. Očekivane promene godišnje količine padavina kreću se u intervalu od 5% do 10%. Najmanje promene se očekuju u severnim i centralnim delovima, a najveće na jugoistoku zemlje. Tokom vegetacionog perioda jarih useva od aprila do oktobra očekuju se nešto veće promene količine padavina, i to od 12% na severu (Sombor) do 24% na istoku zemlje (Zaječar). Tokom zime se ne očekuje značajnija promena količine padavina u centralnim delovima Srbije, dok se promene od 10% očekuju na severu (Sombor) i 17% na jugozapadu (Dimitrovgrad).



Slika 16.8.

Očekivane promene srednje godišnje količine padavina (gore levo), kao i srednje količine padavina za april-septembar (gore desno) i decembar-februar (dole) u periodu 2001-2030. u odnosu na period 1971-2000.



Slika 16.9.

Očekivane promene srednje godišnje količine padavina (gore levo), kao i srednje količine padavina za april–septembar (gore desno) i decembar–februar (dole) u periodu 2071-2100. u odnosu na period 1971-2000.

Krajem 21. veka se očekuje zapaženo smanjenje godišnje količine padavina u centralnim, zapadnim i južnim delovima Srbije, dok se na severu i istoku ono očekuje u nešto manjoj meri. Ono što je zabrinjavajuće jeste smanjenje količine padavina tokom vegetacionog perioda jarih useva na teritoriji cele zemlje, koje bi u proseku moglo da iznosi od 20% do 25%. Zimske padavine bi trebalo da ostanu na nivou proseka iz perioda 1971–2000. ili da se malo povećaju na severu i jugozapadu Srbije.

Izmerene količine padavina za period 2001–2018. su veće od očekivanog proseka za klimatološki period 2001–2030. na svim izdvojenim lokalitetima (tabela 16.3). Ukoliko padavine zadrže postojeći trend ili se značajno ne smanje, može se predvideti? da će se očekivane projekcije padavina za Srbiju ostvariti ili da će, čak, biti nešto povoljnije od očekivanih. Dakle, kada se radi o godišnjoj količini padavina, do 2030. bi prosek trebalo da se zadrži u okviru uobičajenih vrednosti. Međutim, uz prisutnu varijabilnost godišnjih i sezonskih padavina to može da znači da i dalje treba da očekujemo godine s manjom i većom količinom padavina od potrebne.

Tabela 16.3.

Prosečne vrednosti godišnje količine padavina u periodu 2001–2018 (na osnovu izmerenih temperatura vazduha) i očekivane vrednosti za period 2001–2030 (na osnovu temperatura vazduha dobijenih klimatskim simulacijama)

Lokalitet	H_g (mm)	
	2001–2018.	2001–2030.
Rimski šančevi	682	642
Niš	654	622
Vranje	648	626

16.6. Očekivani uticaj klimatskih promena na dinamiku vegetacije i prinos

Dosadašnje promene klime i ekstremne vremenske prilike poslednjih decenija, značajno su uticale na poljoprivredu mnogih zemalja. U Srbiji to najbolje može da se vidi kroz povećana ulaganja u protivgradne mreže i sisteme za novodnjavanje bez kojih teško može da se zamisli novi zasad.

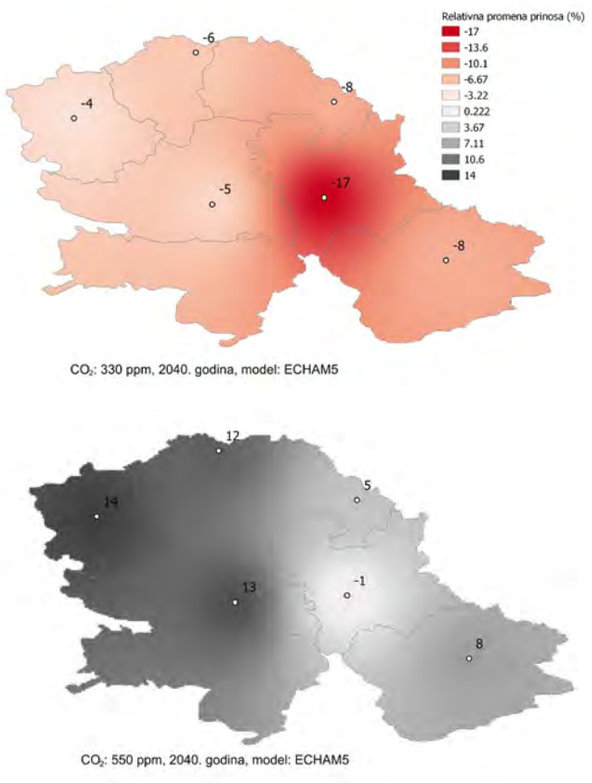
Očekivani uticaj klimatskih promena na prinos ratarskih kultura, obično strnih žita, obavlja se korišćenjem modela biljne proizvodnje o kojima je bilo reči u poglavlju 11.3. Kako bi mogli da izračunaju očekivani prinos i dinamiku

vegetacije, u ovim modelima se rezultati klimatskih simulacija koriste kao ulazni podaci umesto izmerenih vrednosti meteoroloških elemenata. Dobijeni rezultati, naravno ne predstavljaju prognozu prinosa u svakoj od trideset godina, ali kao osrednjeni daju dobro predviđanje trenda i relativne promene prinosa u odnosu na ostvareni prinos u prethodnim decenijama. Prednost dobro kalibrisanih dinamičkih modela je u tome što ostavljaju mogućnost da se promenom tipa zemljišta u modelu testira i da li će neki tip zemljišta biti pogodniji za gajenje u novonastalim klimatskim uslovima. Takođe, moguće je testirati kako promene nekih karakteristika biljke ili fizičkih karakteristika zemljišta mogu uticati na reakciju useva na nove vremenske, odnosno, klimatske uslove.

Jedan primer ovakve studije je ispitivanje uticaja klimatskih promena na prinos ozime pšenice u Vojvodini za 2040. i 2080. godinu (Lalic et al., 2012). Za simulaciju prinosa korišćen je model biljne proizvodnje SIRIUS (vidi poglavlje 11.6), a očekivane vrednosti klimatskih elemenata su obezbeđene pomoću tri klimatska modela (HadCM3, ECHAM5 i NCAR-PCM). U vreme kada su realizovane simulacije koje su korišćene u ovoj studiji (2008. godina) prostorne razmere klimatskih modela su bile značajno veće nego danas - od 50 do 100 km.[42] Iz tog razloga su dobijene simulacije prilagođene za manji prostorni razmer korišćenjem vremenskih generatora[43]. Prilikom simulacija prinosa pretpostavljeno je da će se koncentracija CO_2 povećavati te su testovi urađeni za tri vrednosti koncentracije: 330 ppm, 550 ppm i 1 050 ppm. Uticaj različitih karakteristika zemljišta na reakciju prinosa na izmenjene vremenske/klimatske uslove ispitivan je za šest tipova zemljišta: černozem, fluvisol, glejsol, solonjec, solončak i arenosol.

[42] To, praktično, znači da je (za razmer od 100 km) veći deo Vojvodine prikazan jednom tačkom, odnosno da je dnevna temperatura vazduha u Vojvodini opisana jednim brojem za celo područje.

[43] Zainteresovani čitalac može pronaći više informacija o vremenskim generatorima u materijalu za kurs Modeliranje biljne proizvodnje.

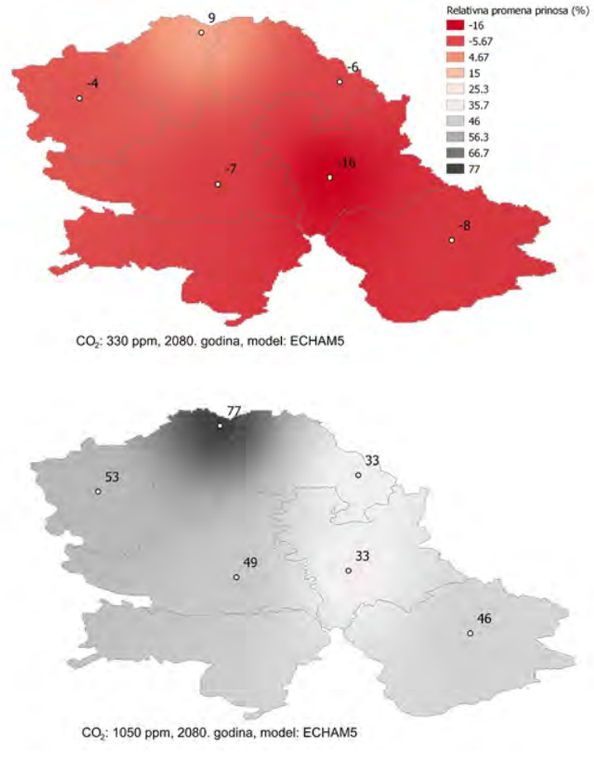


Slika 16.10.

Relativna promena prinosa ozime pšenice (%) za 2040. godinu (CO_2: 330 ppm [gore] i 550 ppm [dole]) u odnosu na simulirani prinos za period 1971–2000. na černozemu (model: ECHAM5)

Dobijeni rezultati (tabela D20, slika 16.10) pokazuju da su različiti modeli prilično usaglašeni u pogledu očekivanog (malog) pada prinosa u prvoj polovini 21. veka ukoliko se zadrži koncentracija CO_2 od 330 ppm. Međutim, porast koncetracije na 550 ppm bi mogao u potpunosti da neutrališe negativne efekte očekivanih promena klime i dovede čak do malog porasta prinosa u svim regionima. U ovom periodu se najveće smanjenje, odnosno najmanje povećanje, prinosa očekuje u Banatskom Karlovcu dok su u ostatku Vojvodine male razlike između regiona i različitih tipova zemljišta. Prema dobijenim rezultatima, krajem 21. veka bi očekivane promene koncentracija CO_2 trebalo da nadmaše negativne efekte promena klime i dovedu do značajnog povećanja prinosa (slika 16.11). Ovaj rezultat u svakom slučaju treba uzeti sa značajnom rezervom. Povećanje

prinosa ozimih useva je u velikoj meri u skladu sa simulacijama većine modela biljne proizvodnje i većine scenarija klimatskih promena iz nekoliko razloga.



Slika 16.11.

Relativna promena prinosa ozime pšenice (%) za 2080. godinu (CO_2 : 330 ppm [gore] i 1.050 ppm [dole]) u odnosu na simulirani prinos za period 1971–2000. na černozemu (model: ECHAM5)

Prvo, svi scenariji predviđaju porast srednjih mesečnih temperatura u zimu i rano proleće, a time i ranije obnavljanje vegetacije u proleće za ozime useve. Drugo, svi scenariji takođe predviđaju veće količine padavina u zimu - na račun letnjih količina padavina. Veći deo vegetacije bi se odigrao tokom proleća kad su vremenski uslovi povoljniji, a količina padavina bar dovoljna. Ovo bi naravno dovelo da ranijeg završetka vegetacionog perioda. Međutim, kada se radi o iznosu očekivanog povećanja, njega treba uzeti s rezervom. Naime, autorima nije poznato da li je intenzitet fotosinteze na pravi način ograničen u modelima biljne proizvodnje za velike vrednosti koncentracije CO_2.

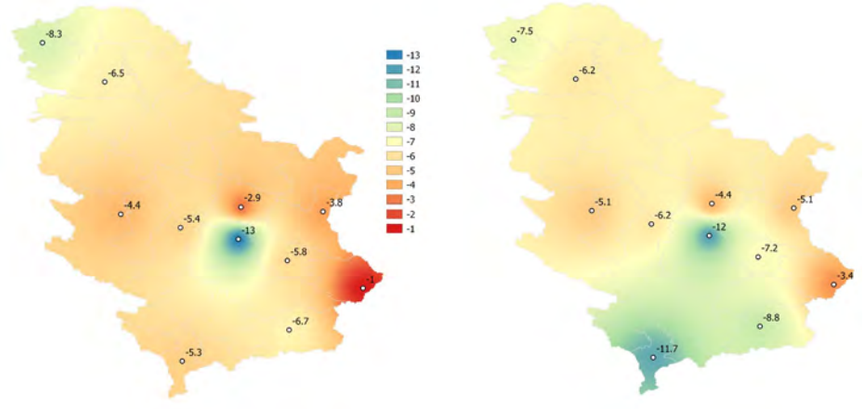
16.7. Očekivani uticaj klimatskih promena na pojavu nekih štetnih organizama

Pojavu štetnih organizama je teško predvideti i u uslovima realnih vremenskih prilika. Trenutak i intenzitet njihove pojave u velikoj meri zavisi od toga da li su ambijentalni (pre svega meteorološki) uslovi zadovoljeni, da li postoji infekcioni materijal: kada se radi o bolestima, prezimelim larvama ili odraslim jedinkama koje će moći da polože jaja; kada se radi o štetočinama i tome da li su biljke domaćini u odgovarajućoj fazi razvoja. Na ovom mestu ćemo se ograničiti samo na analizu povoljnosti meteoroloških uslova da se biološki događaj odigra, pretpostavljajući da su biološki uslovi zadovoljeni.

Analizu uticaja klimatskih promena na pojavu štetnih organizama prikazaćemo na primeru plamenjače vinove loze čiji je izazivač *Plasmopara viticola*. Model BAHUS je korišćen za izračunavanje povoljnosti uslova za otpočinjanje infekcionog perioda i broja perioda tokom vegetacije u kojima su uslovi za infekciju povoljni. Kao i u slučaju simulacije prinosa, umesto meteoroloških podataka korišćene su klimatske simulacije dobijene iz modela ECHAM5 s A2 scenarijem za emisiju gasova staklene bašte, koje su zatim svedene na manji prostorni razmer korišćenjem vremenskog generatora. U svim simulacijama je pretpostavljeno da su 1. marta svake godine ispunjeni biološki uslovi za pojavu štetnog organizma.

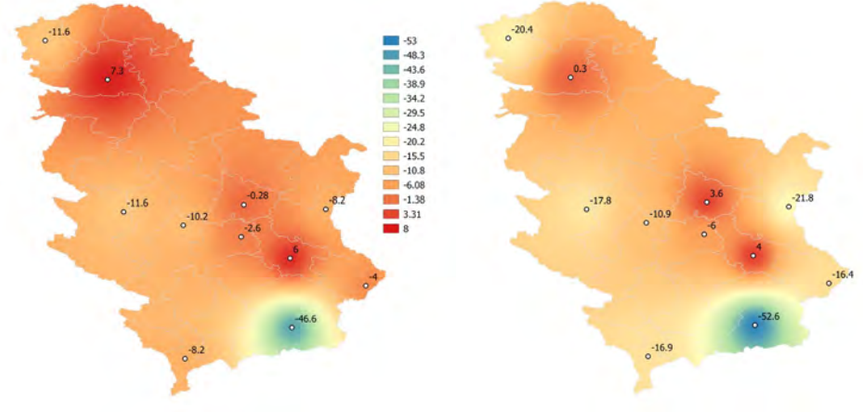
Izračunate prosečne vrednosti nastupanja prvog dana infekcionog perioda do 2030. ukazuju na njegovo moguće ranije nastupanje. Naravno, izračunate promene nisu iste na teritoriji cele Srbije, već se očekuje da one variraju od 3 dana ranije u Vojvodini do 13 dana u centralnoj Srbiji i od 7 do 10 dana u ostatku zemlje (slika 16.12). Takođe se očekuje da će polovinom 21. veka promene klime dovesti do još ranijeg nastupanja prvog dana infekcionog perioda – u proseku 2 dana ranije u svim regionima, ali da će regionalna raspodela ostati ista.

Broj perioda u kojima su povoljni meteorološki uslovi za pojavu plamenjače vinove loze tokom vegetacionog perioda je dobar indikator regionalne ranjivosti kada se radi o ovoj bolesti. Dobijeni rezultati ukazuju na velike razlike među regionima u ovom pogledu, ali je svima karakteristično da se povoljnost uslova za pojavu bolesti smanjuje (slika 16.13). Ovakav trend je posledica očekivanog smanjenja padavina odnosno povećanja broja i produžavanja perioda bez padavina. Očekuje se da će efekat biti najizraženiji na jugu zemlje u regionu Niša i Dimitrovgrada (više od 11%), dok se u centralnim i severnim delovima Srbije očekuje smanjenje do 10% do 2030. i 20% do 2050 (tabela D22).



Slika 16.12.

Očekivane promene u nastupanju prvog dana infekcionog perioda plamenjače vinove loze za 2030. i 2050. godinu u odnosu na period 1971–2000 (Lalic et al., 2013)



Slika 16.13.

Očekivane promene broja inkubacionih perioda tokom vegetacionog perioda plamenjače vinove loze za 2030. i 2050. godinu u odnosu na period 1971–2000 (Lalic et al., 2013)

Numerički primeri

U ovom poglavlju možete pronaći numeričke primere vezane za prvih sedam poglavlja knjige koja se bave teorijskom osnovom agrometeorologije i agroklimatologije. Pored ovog teksta primeri u Excell-u mogu se preuzeti sa internet stranice http://serbiaforexcell.com/education/book/

Tabela E1.

SI prefiksi i simboli koji se koriste prilikom prikazivanja jedinica fizičkih veličina.

Faktor		Prefiks	Oznaka
1 000 000 000 000 000 000	10^{18}	Exa	E
1 000 000 000 000 000	10^{15}	Peta	P
1 000 000 000 000	10^{12}	Tera	T
1 000 000 000	10^{9}	Giga	G
1 000 000	10^{6}	Mega	M
1 000	10^{3}	Kilo	k
100	10^{2}	Hecto	h
10	10^{1}	Deka	da
0,1	10^{-1}	Deci	d
0,01	10^{-2}	Centi	c
0,001	10^{-3}	Mili	m
0,000 001	10^{-6}	Micro	μ
0,000 000 001	10^{-9}	Nano	n
0,000 000 000 001	10^{-12}	Pico	p
0,000 000 000 000 001	10^{-15}	Femto	f
0,000 000 000 000 000 001	10^{-18}	atto	a

E1 Poreklo i sastav atmosfere

E1.1 Jedinice

*Pritisak***.** U SI sistemu, pritisak ima jedinicu paskal (Pa). Pritisak od jednog paskala javlja se kada sila od jednog njutna (N) deluje po jedinici površine od jednog kvadratnog metra (m^2). Definicija i opis atmosferskog pritiska nalazi se u glavi 1. Za merenje atmosferskog pritiska koriste se barometri različitih konstrukcija. Prvi konstruisani barometar je barometar sa živom koji pokazuje da standardni atmosferski pritisak odgovara visini stuba žive u barometru od 760 mm. Ostale jedinice koje se koriste za kvantifikaciju pritiska su bari (b) ili češće milibari (mb), atmosfere (atm), milimetri živinog stuba (mmHg). Standardni atmosferski pritisak definisan u različitim jedinicama iznosi

$$760 \text{ mmHg} = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 1013{,}25 \text{ mb}$$

Primer:
Ako je parcijalni pritisak CO_2 unutar tkiva lista 20 Pa, koliko je to milibara?

$$20 \text{ Pa} = 20 \cdot 10^{-2} \text{ hPa} = 0{,}2 \text{ mb}$$

Koncentracija. Koncentracija se može opisati na različite načine. Najčešće se upotrebljama jedinica ppm (engl. parts per million) koja predstavlja milioniti deo jedne celine ili ppb (engl. parts per billion) bilioniti deo celine (npr. zapremina jednog gasa u 10^6 ili 10^9 zapremini vazduha). Ako se prebacimo u SI sistem odnos zapremina je jednak odnosu količina supstance u molovima (μmol mol^{-1} ili nmol mol^{-1}).

(E1.1)

(E1.2)

Koncentracija nekog gasa se može izrazitii preko parcijalnih pritisaka. Daltonov zakon kaže da je ukupan pritisak smeše gasova jednak sumi pririsaka koji bi vladao u posmatranoj zapremini kada bi nju zauzimala samo jedana gasna komponenta smeše, na jednoj temperaturi zapisuje se kao

(E1.3)

gde su p_1, p_2, ..., p_n parcijalni pritisci svake gase komponente smeše. Prema tome parcijalni pritisak svake pojedinačne komponente može se izračunati kao $p_i = n_i \cdot p$, gde je n_i količina supstance u molima i-e komponente smeše n gasova.

Primer:
Ako je koncentracija CO_2 u vazhuhu koji zauzima biljni sklop 380 ppm, koliki je parcijalni pritisak (p_{CO2}) ovog gasa ako je pritisak okoline standardni atmosferski pritisak?

$C_{CO2} = 380$ ppm $= 380 \cdot 10^{-6}$ mol mol^{-1}, ako je p = 101325 Pa
$p_{CO2} = 380 \cdot 10^{-6} \cdot 101325$ Pa = 38,5 Pa =0,385 mb, 0,289 mmHg

Fotosinteza. Modeli za procenu intenziteta fotosinteze mogu biti različite kompleksnosti. Najjednostavniji empirijski modeli razvijeni su u okviru prvih modela biljne proizvodnje (Monteith, 1977), a vremenom su napredovali do biohemijskih procesnih modela (Farquhar et al., 1980). U osnovi, proces fotosinteze može se opisati preko modela razmene gasova kada intenzitet fotosinteze zavisi samo od intenziteta transpiracije na nivou lista (Bierhuizen and Slatyer, 1965)

(E1.4)

gde su A_{LAI} neto asimilacija (usvajanje) CO_2 po jedninici lisne površine, E_{LAI} intenzitet isparavanja po jedinici lisne površine, k_l konstanta izražena za posmatranu biljku i d_{LAI} deficit zasićenosti vlagom između vazduha biljnog sklopa i vazduha u listu. Kada su stome otvorene procesi asimilacije CO_2 i transpiracije odvijaju se simultano i njihov odnos je najčešće korišćeni parametar u modeliranju fotosinteze.

Autori jednostavnih modela, kao što je Montit (Monteith), iskoristili su odnos asimilacije i transpiracije na jednom listu i samo preko koeficijenta biljke k_c prešli sa računanja intenziteta fotosinteze jednog lista na intenzitet fotosinteze cele biljke

(E1.5)

gde je B_M produkcija biomase (kg), T_M je transpiracija cele biljke izražena preko mase vode (kg), k_L konstanta specifična za posmatranu biljku ili usev (Pa) i d

deficit vodene pare (zamena d_{LAI} sa d može biti urađena samo ako je temperatura okolnog vazduha ista ili vrlo bliska temperaturi lista). Odnos produkcije biomase i intenziteta transpiracije naziva se i efikasnost transpiracije i predstavlja količinu generisane biomase po jedinici transpirisane vode. Koeficijent k_L se najčešće dobija iz odnosa koncentracija CO_2 izvan i unutar lista (biljke).

Primer:
Ako efikasnost transpiracije pšenice iznosi 4,93 g kg^{-1}, pritisak vodene pare 10 mb, a temperatura vazduha 20 °C, izračunati koeficijent k_L za posmatranu kulturu.

(Prvo moramo da izračunamo d, koji predstavlja razliku između pritiska vodene pare e) i saturacionog pritiska vodene pare (E) na datoj temperaturi vazduha. Da bi izrazili E pogledajte primer u E4 poglavlju ove glave. Ovde ćemo koristiti već izračunate vrednosti)

E2 Energetski bilans atmosfere

E2.1 Jedinice

Tabela E2.1
Faktori konverzije energije u džulima (J) koju primi jedinična površina (m) u jedinici vremena (s).

	MJ m^{-2} dan^{-1}	J cm^{-2} dan^{-1}	cal cm^{-2} dan^{-1}	W m^{-2}
1 MJ m^{-2} dan^{-1}	1	100	23,9	11,6
1 cal cm^{-2} dan^{-1}	4,1868 10^{-2}	4,1868	1	0,485
1 W m^{-2}	0,0864	8,64	2,06	1

Najčešće intenzitet zračenja izvora je izražen u W m^{-2}. Međutim, u slučaju računanja intenziteta fotosinteze koji direktno zavisi od intenziteta zračenja, koristi se jedinica izražena iz energije jednog kvanta mol m^{-2} s^{-1} koja se zove gustina fluksa fotona fotosintetski aktivnog zračenja (engl. photosynthetic photon flux

density, PPFD). Konverzije između ove dve jedinice započinje izražavanjem energije jednog fotona određene talasne dužine (E2.1)

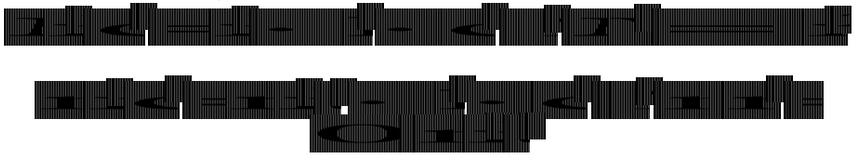
(E2.1)

Iz jednačine E2.1 može se zaključiti da fotoni sa nižom talasnom dužinom poseduju veću energiju. Ako se talasna dužina nalazi u spektru fotosintetski aktivnog zračenja (FAZ), na primer 550 nm, tada će energija svakog fotona, ili kvanta, biti $3{,}61395 \cdot 10^{-19}$ J. Ako je intenzitet zračenja 1500 μmol m^{-2} s^{-1}, to znači da 1500 μmol na talasnoj dužini od 550 nm dolazi do 1 m^2 površine u svakoj sekundi. Množenjem tog broja sa Avogadrovim brojem ($6{,}022 \cdot 10^{23}$ kvanata mol^{-1}), dobija se broj kvanata m^{-2} s^{-1}, i daljim množenjem sa već izračunatom energijom jednog kvanta dobija se intenzitet zračenja u J s^{-1} m^{-2} što je jednako W m^{-2}. Prema tome, faktor konverzije se najčešće prikazuje za srednje vrednosti talasnih dužina FAZ spektra, ne za sve talasne dužine između 400 i 700 nm (Campbell and Norman, 1998). U literaturi se najčešće sreće sledeća konverzija

(E2.2)

Ako je intenzitet zračenja 450 W m^{-2} tada je PPFD

– Ostale konverzije:



E2.1 Prenos izmerenog intenziteta zračenja (W m^{-2}) u dnevni energetski bilans

Metod 1. Dnevna suma globalnog zraženja može se izračunati preko integrala funkcije koja predstavlja satne izmerene vrednosti intenziteta globalnog zračenja. Za računanje integrala najčešće se koristi trapezna formula numerične integracije:

(E2.3)

gde je h vremenski korak između dva merenja izražen u sekundama (ako su merenja izvršena na svakih sat vremena h=3600 s), N ukupan broj merenja, G_0 i G_N su izmerene vrednosti u prvom i poslenjem satu merenja, redom.

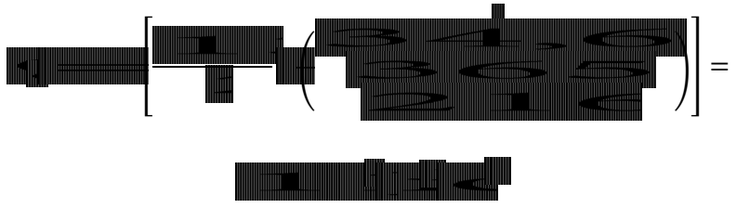
Primer:

Merenje globalnog zračenja piranometrima izvršeno je na lokaciji Prospekt hil trakt (Prospect Hill Tract), u harvardskoj šumi (42°32'N, 72°10'W), Sjedinjene Američke Države 26. juna 2006. godine (Fitzjarrald and Sakai, 2009) i predstavljeno na slici E2.1. Koristeći date izmerene vrednosti izračunati sumu globalnog zračenja koristeći jednačinu E2.3.

Slika E2.1

Dnevni hod globalnog zračenja.

Vreme							
5.30	6.30	7.30	8.30	9.30	10.30	11.30	12.30
G_d (W m^{-2})							
13,4	34,6	104,1	144,8	353,5	372,9	365,8	207,8
Vreme							
13.30	14.30	15.30	16.30	17.30	18.30	19.30	
G_d (W m^{-2})							
252,8	409,1	216,1	240,2	175,3	97,5	25,2	



Metod 2. Dnevna suma globalnog zračenja ($G_{d,}$ MJ m^{-2} day^{-1}) može se izračunati i preko empirijskih formula. Jedna od njih je Angstrom-Preskotova formula (Ångstrom-Prescott), koja uzima u obzir zračenje na gornjoj granici atmosfere (G_a, MJ m^{-2} day^{-1}) i relativno trajanje direktnog sunčevog zračenja ($S_a \cdot S_p^{-1}$)

(E2.4)

gde je S_a stvarno trajanje direktnog sunčevog zračenja (sati), S_p je potencijalna (maksimalna) dužina trajanja direktnog sunčevog zračenja (sati). Koeficijenti a i b su empirijski i predstavljaju odnos zračenja koje stigne do površine po oblačnom danu i zračenja koje dospe na gornju granicu atmosfere. Vrednosti koeficijenata se menjaju u odnosu na geografsku širinu. Prikazani metod se najčešće koristi ukoliko direktna merenja nisu dostupna. Ukoliko nedostaju i koeficijenti vrednosti od a = 0,25 i b = 0,5 se mogu koristiti. Međutim, s obzirom da je ovaj metod veoma prisutan u praksi koeficijenti se često mogu pronaći u literaturi.

Metod 3. The Koluson (Coulson) metod je dodatni metod za procenu dnevne sume globalnog zračenja ($G_{d,}$ MJ m^{-2} day^{-1}). Ovaj metod je baziran na proceni

sume globalnog zračenja koje stigne do tla po bezoblačnom danu ($G_{d0,}$ MJ m^{-2} day^{-1}), koja se redukuje dnevnom pojavom oblaka (n) i empirijskom konstantom ξ (Novi Sad, 45° 15' 18", 19° 50' 42", *ξ = 1,89,* Mihailović, 1988)

(E2.5)

Primeri prikazanih modela nalaze se i u elektronskom materijalu.

E2.3 Protivzračenje atmosfere

Intenzitet atmosferskog zračenja je funkcija temperature vazduha i emisivnosti gasova i čestica prisutnih u vazduhu (za detaljan opis pogledati poglavlje 2). Za kvantifikaciju atmosferskog zračenja često se koristi jednostavna Brentova formula (Brunt, 1932)

(E2.6)

U ovoj formuli vodena para je odgovorna za emisiju zračenja, a njena koncentracija je izražena pritiskom vodene pare u hPa (e) na datoj temperaturi vazduha T_a u K.

Primer:
Upotrebom Brentove formule izračunati protivzračenje atmosrefe 20°C u kojoj je pritisak vodene pare 5 mb.

Da bi izračunali srednju količinu energije koju površine zemlje primi svaki dan po cm^2 od protivzračenja atmosfere u J cm^{-2} dan^{-1} dobijenu vrednost moramo pomnožiti sa 8,64 kao što je dato u tabeli E2.1.

E2.4 Odlazno terestrijalno zračenje

Intenzitet odlaznog terestrijalnog zračenja, zemljinog izračivanja, zavisi od temperature zemljišta i emisivnosti tla. Jednačina koja se koristi je opisana u poglavlju 2, broj 2.3.

Primer:
Ako je temperatura tla 15°C i emisivnost zemljišta 0,95 izračunati intenzitet zemljinog izračivanja.

E3 Temperatura zemljišta i vazduha

E3.1 Jedinice

Table E3.1

Prelazak iz Kelvina u Celzijuse pa u Farenhajte

	Kelvin	Celzijus	Farenhajt
Kelvin (K)	-	1K – 273,15	$(1K - 273,15) \cdot \frac{9}{5} + 32$
Celzijus (°C)	1°C + 273,15	-	$(1°C \cdot \frac{9}{5}) + 32$
Farenhajt (F)	$(1F - 32) \cdot \frac{5}{9} + 273,15$	$(1F - 32) \cdot \frac{5}{9}$	-

$$1\,°C = 1 + 273,15\,K = (1 \cdot \frac{9}{5}) + 32\,F$$

Specifična toplota pri konstantnom pritisku C_p (J kg^{-1} K^{-1}), i specifična toplota pri konstantnoj zapremini C_v (J kg^{-1} K^{-1}), su često korišćene konstante. Njihov odnos za idealni gas iznosi

(E3.1)

E3.2 Dnevna, godišnja temperatura, njene varijacije i ekstremi

Računanje ekstermnih vrednosti i varijacija dato je u elektronskom materijalu. Ekstremne vrednosti temperature, kao što su mrazni dani, definisani su određenim graničnim temperaturama (tabela E3.2)

Tabela E3.2

Dnevni temperaturni ekstremi

	Maksimalna temperatura (°C)	Minimalna temperatura (°C)
Mrazni dan	-	£ 0
Ledeni dan	£ 0	-
Dan sa jakim mrazom	-	£ -10
Letnji dan	³ 25	-
Tropski dan	³ 30	-
Tropska noć	-	³ 20

E3.3 Računanje akumulisanih stepen dana

Toplotne jedninice nazvane stepen-dan (engl. degree-days, DD) često se koriste u poljoprivredi za predviđanje fenologije, inkubacionog perioda biljnih bolesti, pojave štetočina, s obzirom da su pogodniji od kalendarskih dana. Suma stepen-dana u određenom periodu, nazvana još i akumulisani stepen-dani, ili stepen-dani potrebni za rast (engl. growing degree days, GDD), predstavlja akumulaciju temperature iznad unapred određene granice. Granične temperature se određuju laboratorijski i neke od njih, raspoređene prema kulturama, su prikazane u glavi 3, tabela 3.4. Za računanje GDD razvojeni su različiti metodi.

Metod 1. Metod osrednjavanja (McMaster and Wilhelm, 1997):

(E3.2)

gde su GDD akumulisani stepen-dani, T_{max} i T_{min} su maksimalna i minimalna temperatura u jednom danu, a T_t temperaturna granica. Ako je rezultat negativan, pretpostavlja se da nema doprinosa, i DD=0. Ovaj metod se najčešće pronalazi u praksi, ali može da unese grešku u račun jer može da podceni DD kada se temperature menjaju oko granične tempearature. U to vreme, biljka će da iskusi temperature iznad granice, ali to neće biti uračunato u GDD.

Da bi se izbegla ova greška McMaster and Wilhelm (1997) su uveli sledeća pravila:

ako je $T_{min} > T_t$ onda

(E3.3)

ili ako je $T_{max} < T_t$

(E3.4)

ili ako je $T_{max} > T_t > T_{min}$

(E3.5)

gde je koeficijent dok se vrednost funkcija f(R) uzima iz tabele u odnosu na R.

Metod 2. Metod Baskerville-Emin (BE) zahteva poznavanje sinusne ili kosinusne funkcije temperature, koja se može izraziti iz minimalne i maksimalne temperature. Iz krive se potom mogu izraziti temperature za svaki sat koje se nalaze iznad granične temperature i suma daje DD, a potom suma DD daje GDD.

Tabela E3.3

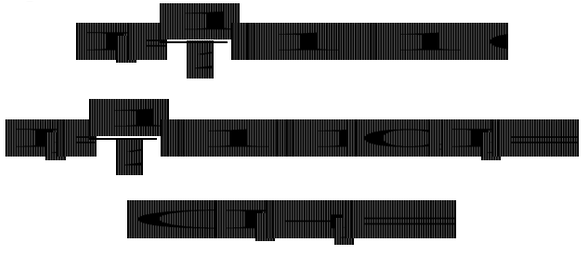
Vrednosti f(R)

R	f(R)	R	f(R)	R	f(R)
0,000	1,000	0,340	0,495	0,670	0,167
0,010	0,981	0,350	0,483	0,680	0,159
0,020	0,962	0,360	0,471	0,690	0,152
0,030	0,944	0,370	0,459	0,700	0,144
0,040	0,927	0,380	0,448	0,710	0,137
0,050	0,910	0,390	0,436	0,720	0,130
0,060	0,893	0,400	0,425	0,730	0,123
0,070	0,876	0,410	0,413	0,740	0,116
0,080	0,859	0,420	0,402	0,750	0,109
0,090	0,843	0,430	0,391	0,760	0,102
0,100	0,827	0,440	0,381	0,770	0,096
0,110	0,811	0,450	0,370	0,780	0,090
0,120	0,796	0,460	0,359	0,790	0,084
0,130	0,780	0,470	0,349	0,800	0,078
0,140	0,765	0,480	0,339	0,810	0,072
0,150	0,750	0,490	0,328	0,820	0,066
0,160	0,735	0,500	0,318	0,830	0,061
0,170	0,721	0,510	0,308	0,840	0,055
0,180	0,706	0,520	0,299	0,850	0,050
0,190	0,692	0,530	0,289	0,860	0,045
0,200	0,678	0,540	0,279	0,870	0,040
0,210	0,664	0,550	0,270	0,880	0,036
0,220	0,650	0,560	0,261	0,890	0,031
0,230	0,636	0,570	0,251	0,900	0,027
0,240	0,622	0,580	0,242	0,910	0,023
0,250	0,609	0,590	0,233	0,920	0,019
0,260	0,596	0,600	0,225	0,930	0,016
0,270	0,583	0,610	0,216	0,940	0,013
0,280	0,570	0,620	0,208	0,950	0,010
0,290	0,557	0,630	0,199	0,960	0,007
0,300	0,554	0,640	0,191	0,970	0,004
0,310	0,532	0,650	0,183	0,980	0,002
0,320	0,519	0,660	0,175	0,990	0,001
0,330	0,507			1,000	0,000

Metod 3. Upotreba izmerenih satnih vrednosti temperature je najtačniji metod jer predstavlja realne uslove, a ne matematički reprodukovane. Posle asimilacije podataka DD se računa kao suma razlika stvarne temperature i granične vrednosti.

Primer:

Izračunati stepen dan sa graničnom temperaturom 10 °C ako su temperature vazduha bile T_{max} 15 °C i 11 °C, a T_{min} 8 °C i 9 °C redom. Potom izračunati akumulisane stepen-dane.

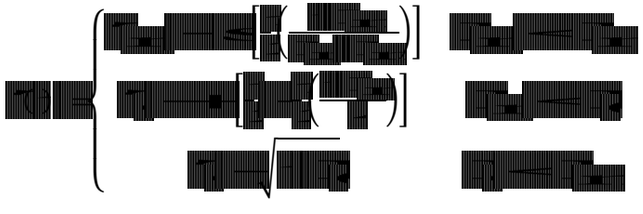


Primer računanja akumulisanih stepena dana dat je u elektronskom materijalu.

E3.4 Aproksimacija časovnih vrednosti temeperature

U praksi često se dešava da izmerene vrednosti temperature nedostaju. Za popunjavanje nizova podataka vremenom su razvijeni različiti modeli. Uloga tih modela je da reprodukuju časovne vrednosti temperature iz osmotrenih vrednosti u određenim trenucima u toku dana. Cesarikijev metod, ovde opisan, zahteva poznavanje maksimalne temperature (T_{max}), minimalne temperature (T_{min1}) temperature u momentu zalaska sunca (T_0) i minimalne temperature na izlasku sunca sledećeg dana (T_{min2}). Pored temperature potrebno je znati i vreme javljanja minimalne temperature (H_{min1}), javljanje maksimalne temperature (H_{max}), vreme zalaska sunca (H_0) i vreme izlaska sunca sledećeg dana (H_{min2}).

Simboli	Izlazak sunca (vreme i T_{min})	Vreme i T_{max}	Zalazak sunca	Izlazak sunca (vreme)
Vreme	H_{min1}	H_{max}	H_0	H_{min2}
Temperatura	T_{min1}	T_{max}	T_0	T_{min2}



(E3.6)

(E3.7)

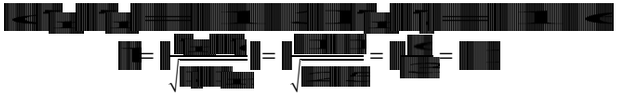
Koeficijenti α, *R* i *b* mogu se izračunati na sledeći način

(E3.8).

Primer:

Ekstremne vrednosti temperature osmotrene su na lokalitetu Rimski šančevi 17. i 18. maja 2007. godine. U merenju nedostaju neke časovne vrednosti temperature. Izračunati temperture koje nedostaju ako se zna da su:

Simbol	Izlazak sunca (vreme i T_{min})	Vreme i T_{max}	Zalazak sunca	Izlazak sunca (vreme)
Vreme	H_{min1}	H_{max}	H_0	H_{min2}
Temperatura	T_{min1}	T_{max}	T_0	T_{min2}
Vreme	5,15	16,10	20,10	5,13
Temperatura	13,4	19,6	16,7	10,5



Datum	Čas			
17. 5. 2007	6	14,2		
17. 5. 2007	7	15,0		
17. 5. 2007	8	15,9		
17. 5. 2007	9	16,7		
17. 5. 2007	10	17,4		
17. 5. 2007	11	18,0		
17. 5. 2007	12	18,6		
17. 5. 2007	13	19,0		
17. 5. 2007	14	19,3		
17. 5. 2007	15	19,5		
17. 5. 2007	16	19,6		
17. 5. 2007	17		19,4	
17. 5. 2007	18		18,8	
17. 5. 2007	19		17,9	
17. 5. 2007	20		16,8	
17. 5. 2007	21			15,2
17. 5. 2007	22			14,5
17. 5. 2007	23			14,0
17. 5. 2007	24			13,5
18. 5. 2007	1			13,2
18. 5. 2007	2			12,8
18 .5. 2007	3			12,5
18. 5. 2007	4			12,2
18. 5. 2007	5			11,9

E3.5 Predviđanje mraza

Postoji nekoliko metoda za prognozu pojave mraza. U praksi, najčešće korišćen je FAO metod (Snyder and Paulo de Melo-Abreu, 2005) razvijen za predviđanje minimalne temperature u nastupajućoj noći i procene trajanja mraza i kritičnih temperatura. Metod je razvijen za potrebe pokretanja aktivne odbrane od mraza uz upotrebu prskalica za raspršivanje vode. Prema tome metod, koji možete pronaći na sajtu FAO daje i količinu vode, koju je potrebno iskoristiti u toku jednog sata, za odbranu od mraza.

Funkcija za predviđanje minimalne temperature dobija se iz osmotrenih vrednosti. Prvi korak je formiranje linearnog regresionog modela da bi se dobili koeficijenti prave (a, b) iz temperature izmerene 2 sata posle zalaska sunca (T_{2h}) i osmotrene minimalne temperature u nastupajućoj mraznoj noći (T_{min}) (slika E3.2 levo), bez vetra i padavina. Koeficijenti prave se mogu potom koristiti za računanje minimalne temperature samo uz poznavanje temperature T_{2h}

[redacted] (E3.9)

Ako želimo da povećamo tačnost modela, prelazi se na računanje faktora R_i kao razlike između T_{min} i , a potom se uz tačku rose (T_d) koristi u novom modelu linearne regresije za dobijanje novih koeficijenata (slika E3.2 desno)

[redacted] (E3.10)

Na kraju, minimalna temperatura () se može predvideti sumom vrednosti iz prethodne dve jednačine

[redacted] (E3.11)

Proračun trenda pada temperature podrazumeva upotrebu stepene funkcije u periodu od 2 časa posle zalaska sunca do izlaska sunca sledećeg dana, odnosno kraja kritičnih temperatura. Faktor b' se računa iz predviđene minimalne temperature (T_p), T_{2h} i vremena koje je proteklo između temperatura h = (24 - τ_{2h}) + τ_p), ako je τ_{2h} vreme dva sata posle zalaska sunca, a τ_p vreme javljanja minimalne temperature za koji se uzima vreme izlaska sunca

[redacted] (E3.12)

[redacted] (E3.13)

gde je τ_i bilo koji sat između momenta merenja T_{2h} i izlaska sunca narednog dana. Uz pomoć ove formule može se odrediti koliko dugo će trajati mraz (koliko dugo će temperatura vazduha biti ispod 0 °C) i koliko dugo će trajati kritične temperature.

Primer:
U tabeli E3.4 date su vrednosti meteoroloških elemenata zabeležene u toku ranog proleća 2015. godine na Rimskim šančevima u Srbiji. Upotrebiti FAO model za prognozu minimalne temperature, ako je temperatura u 2 časa posle zalaska sunca (21 č.) bila 2 °C, a tačka rose 1 °C, i izračunati temperaturni trend u toku te noći. Iz dobijenih podataka proceniti dužinu trajanja kritičnih temperatura i mraza, ako je kritična temperatura -1,7 °C.

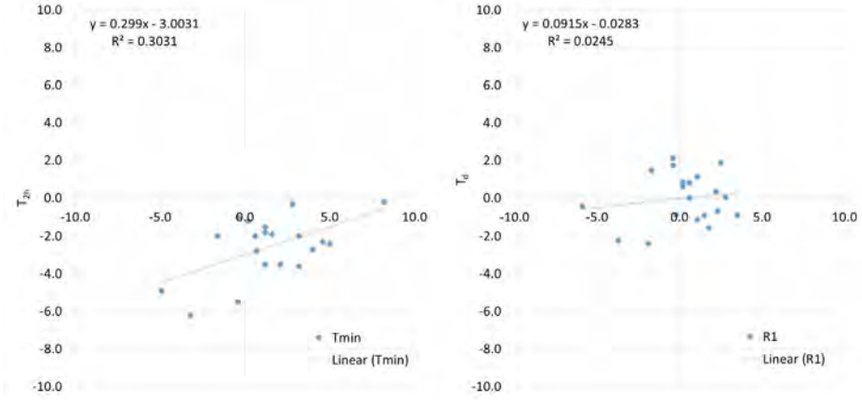
Tabela E3.4

Osmotrene vrednosti meteoroloških elemenata u toku mraznih epizoda 2015 na lokaciji Rimski šančevi.

T_{min}	T_{2h}	e	T_d	vetar	padavine
(°C)	(°C)	(hPa)	(°C)	(m s^{-1})	(mm)
-6,2	-3,2	4,5	-3,7	0	0
-1,8	1,2	6,2	0,2	0,8	0
-2,3	4,6	7,4	2,3	0,8	0
-1,2	0,2	5,9	-0,4	0	1
-3,5	2,1	6,7	1,1	0,8	0
-5,5	-0,4	5,2	-1,9	0,8	0
-1,9	1,6	6,2	0,2	0,8	0
-3,5	1,2	6	-0,2	0,8	0
-0,2	8,2	7,3	2,2	0,8	0
-2,7	4	6,9	1,5	0	0
-3,6	3,2	7,1	1,8	0,8	0
-2,4	5	8,1	3,5	0,8	0
-2	3,2	7,7	2,8	0,8	0
-2,8	0,7	6,4	0,6	0,8	0
-2	-1,6	5,3	-1,7	0	0
-1	-0,4	5,9	-0,4	0,8	0
-0,3	2,8	7,5	2,5	0	0
-1,5	1,2	6,7	1,1	0,8	0
-2	0,6	6,4	0,6	0,8	0
-4,9	-4,9	3,7	-5,9	0,8	0

$$T_p^1 = 0{,}299\ T_{2h} - 3{,}0031$$

$$T_p^2 = 0{,}0915\ T_d - 0{,}0283$$



Slika E3.2

Linearna regresija minimalne temperature (levo) i tačke rose (desno).

Ako je $T_{2h} = 2$ °C i $T_d = 1$ °C, onda je T_p

$$T_p = 0{,}299 \cdot T_{2h} + 0{,}0915 \cdot T_d + (-3{,}0031 - 0{,}0283) =$$
$$0{,}299 \cdot 2 + 0{,}0915 \cdot 1 + (-3{,}0031 - 0{,}0283) = -2{,}34 \ {}^{o}C$$

$$b' = \frac{-2{,}34 - 2}{\sqrt{(24 - 21) + 5}} = -1{,}54 \ {}^{o}C\ h^{-0{,}5}$$

$$T_i = 2 - 1{,}54\sqrt{1} = 0{,}5$$

Upotrebom rednih brojeva za sate posle zalaska sunca mogu se izračunati vrednosti za svaki sat. Iz tabele možemo zaključiti da je temperatura pala ispod 0 °C već u 23 časa, i da su kritične temperature započele u 3 časa posle ponoći:

Sat	21	22	23	24	1	2	3	4	5
Redni broj	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatura	2	0.5	-0.2	-0.7	-1.1	-1.4	-1.8	-2.1	-2.3

E4 Vlažnost vazduha

E4.1 Jedninice

e – pritisak vodene pare (napon pare): mb, hPa, Pa
E –pritisak zasićene vodene pare (maksimalni pritisak videne pare): mb, hPa, Pa
d - deficit zasićenosti: mb, hPa, Pa
T_d – tačka rose: °C, K, F
r – relativna vlažnost vazduha: %
q –specifična vlažnost vazduha: kg kg^{-1} (ili g kg^{-1})
a - apsulutna vlažnost vazduha (kg m^{-3})

E4.2 Kvantifikacija vlažnosti vazduha

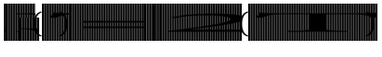
Kvantifikacija vlažnosti vazduha započine Klauzijus-Klapejronovom jednačinom (Clausius–Clapeyron) za pritisak vodene pare u standardnoj atmosferi, ili u uslovima blizu standardnih (temperatura i pritisak):

(E4.1)

kada se reši izvod:

(E4.2)

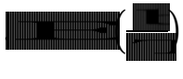
gde je E maksimalni pritisak vodene pare, T temperatura, L_v specifična latentna temperatura vode, R_v gasna konstanta za vodenu paru 461 J K^{-1} kg^{-1} i T_0 je 273,15 K. S obzirom da je L_v isto funkcija temperature



(E4.3)

nekoliko metoda je razvijeno za pojednostavljenje jednačine E4.2.

Specijalni oblik Klauzijus-Klapejronove jednačine, često nazvana i Tetensova (Tetens') empirijska formula, koristi se za računanje E iz temperature (Campbell and Norman, 1998)



(E4.4)

gde su a, b, c konstante izračunate prema osmotrenim podacima i temperature u °C.

Tetensova formula kada je T > 0 °C, iznad vode

(E4.5)

Tetensova formula kada je T ≤ 0 °C, iznad leda

(E4.6)

U jednačinama E4.5 i E4.6 temperatura T je izražena u °C, a e_s je izraženo u hPa (mb).

FAO upotrebljava malo izmenjeni oblik jednačine (Allen et al., 1998) iz praktičnih razloga. U većini slučajeva izmerene su samo maksimalna i minimalna temperatura. Iz tih vrednosti računa se srednja vrednost maksimalnog pritiska vodene pare upotrebom T_{max} i T_{min}

(E4.7)

(E4.8)

Stvarni pritisak vodene pare može biti određen iz razlike temperatura suvog (T_s) i vlažnog (T_v) termometra izmerene psihrometrom. Odnos se može izraziti iz sledeće relacije

(E4.9)

gde je E_v maksimalni pritisak vodene pare na temperaturi vlažnog termometra, p atmosferski pritisak, γ termodinamička psihrometarska konstanta $6{,}66 \cdot 10^{-4}$ °C^{-1}. Međutim, kako psihrometar nie adijabatski sistem, γ može da se razlikuje od teoretske vrednosti.

Drugi elementi vlažnosti, često korišćeni su, deficit zasićenosti vodene pare (d):

(E4.10)

i relativna vlažnost vazduha (r):

(E4.11)

Obe veličine su funkcija pritiska vodene pare (e) i maksimalnog pritiska vodene pare (E).

Specifična vlažnost (q) predstavlja odnos mase vodene pare po jedinici mase vlažnog vazduha (g kg^{-1}):

(E4.12)

Apsulutna vlažnost (a) predstavlja masu vodene pare u jediničnoj zapremini vlažnog vazduha (kg m^{-3}).

(E4.13)

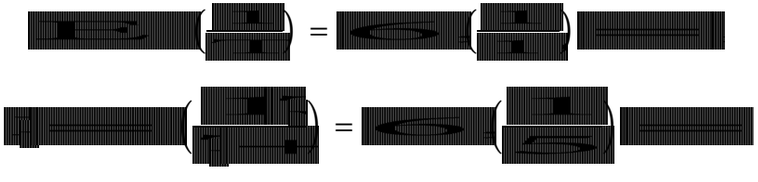
U jednačinama E4.12 i E4.13 m_v je masa vodene pare, m_s je masa suvog vazduha, V je zapremina, p atmosferski pritisak, a R_s i R_v su gasne konstante suvog vazduha i vodene pare redom u J K^{-1} kg^{-1}. Konstante se često i predstavljaju u obliku odnosa:

(E4.14)

Primer:

Izračunati elemente vlažnosti ako je temperatura 10 °C, a temperatura vlažnog termometra 5 °C. Upotrebiti standardan atmosferski pritisak u računu 1013,25 hPa.

a. Maksimalni pritisak vodene pare



b. Pritisak vodene pare

c. Relativna vlažnost

d. Deficit vodene pare

e. Specifična vlažnost

f. Apsolutna vlažnost

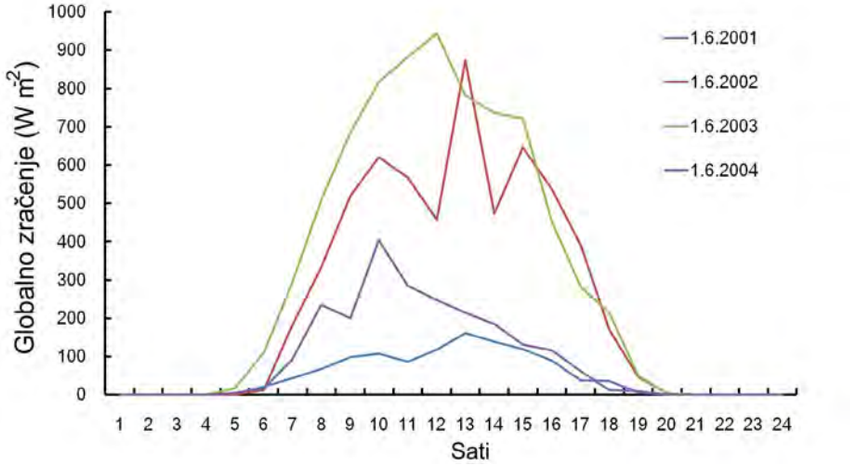
E5 Oblaci i padavine

E5.1 Jedinice

Padavine se definišu kao zapremina vode po jedinici površine. Najčešće se izražava u mm. Jedan mm padavina predstavlja 1 l (10^{-3} m^3) po metru kvadratnom.

E5.2 Uticaj oblačnosti na energetski bilans

Uticaj oblačnosti na količinu zračenja koje stigne do tla, zapravo je prikazan u empirijskim formulama za izračunavanje globalnog zračenja, kao što je Kolsonov (Coulson) metod opisan jednačinom E2.4. Drugi primer kako oblaci utiču na energetski bilans može se videti iz merenja. Na slici E5.1 prikazane su vrednosti globalnog zračenja za isti dan u tri godine.



Slika E5.1

Globalno zračenje izmereno u Harvardskoj šumi, meteorološka stanica Fišer (Harvard forest Fisher Meteorological Station), 1. juna u različitim godinama.

E5.3 Padavine

Padavine predstavljaju sumu količine vode u toku dana, nedelje, meseca ili godine. Srednja vrednost padavina za određenu vremensku jedinicu izražava se iz vremenske serije podataka. Prema tome, srednja vrednost padavina () za vremensku jedinicu od j dana i k godina

(E5.1)

E6 Atmosferska cirkulacija i vetar

E6.1 Jedinice

Vetar se definiše pravcem, brzinom i jačinom. U SI sistemu brzina vetra je data u m s^{-1}, ali u praksi postoji čitav niz različitih jedinica.

Tabla E6.1

Jedinice brzine vetra.

	m s^{-1}	čvorovi	km h^{-1}	Mph (milja na čas)
1 m s^{-1}	-	1,9	3,6	2,2
1 čvor	0,5	-	1,9	1,2
1 km h^{-1}	0,3	0,5	-	0,6
1 Mph (milja na čas)	0,4	0,9	1,6	-

Za razliku od ostalih meteoroloških elemenata vetar poseduje i deskriptivnu skalu Boforofu skalu (Beaufort) koja opisuje jačinu vetra. Boforova skala je funkcija brzine vetra.

(E6.1)

Primer:
Izračunati brzinu vetra ako je on okarakterisan sa 8 sa boforove skale.

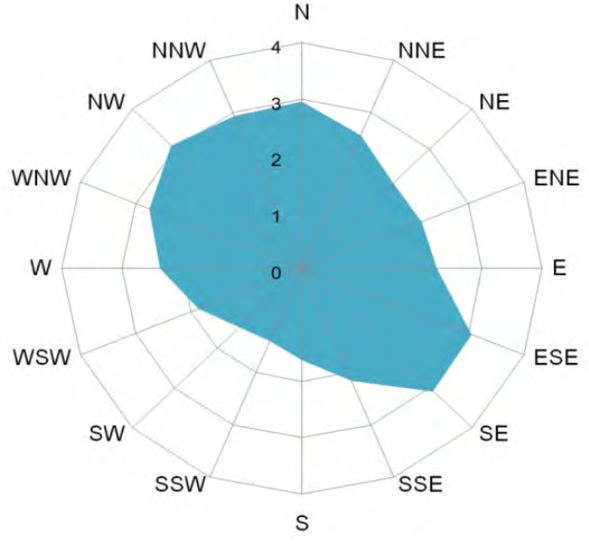
Tabela E6.2

Boforova skala (WMO, 2008).

Bofori	naziv vetra	v (m s^{-1})	opis pojava u prirodi
0	tišina	0,0 - 0,3	tiho; dim se diže uspravno
1	lak povetarac	0,3 - 1,5	pravac vetra se zapaža po kretanjuu dima, a ne po vetrokazu
2	povetarac	1,6 - 3,3	vetar se oseća na licu, lišće treperi, vetruša se pokreće
3	slab vetar	3,4 - 5,4	lišće i grančice se stalno klate; razvijaju se lake zastave.
4	umeren vetar	5,5 - 7,9	vetar podiže prašinu i listove hartije; pokreće male grane
5	umereno jak vetar	8,0 - 10,7	tanja lisnata stabla počinjuu da se njišu; obrazuju se mali talasi sa krestama na kopnenim vodama.
6	jak vetar	10,8 - 13,8	pokreću se velike grane; čuje se zujanje telegrafskih žica; otežana upotreba košobrana.
7	vrlo jak vetar	13,9 - 17,1	Stable drveća se njišu; hodanje uz vetar je otežano.
8	olujni vetar	17,2 - 20,7	vetar lomi grane na drveću; hodanje uz vetar je, uopšte uzev, nemoguće.
9	oluja	20,8 - 24,4	nastaju laka oštećenja na zgradama (odkidanje oluka, rušenje dimnjaka i skidanje crepa).
10	žestoka oluja	24,5 - 28,4	retko se javlja u unutrašnjosti kopna; čupa drveće iz zemlje; nastaju velike štete na zgradama.
11	orkanska oluja	28,5 - 32,6	vrlo retka pojava praćena razaranjima velikih razmera.
12	orkan	32,7 - 36,9	---

E6.2 Ruža vetra

Ruža vetra je grafički opis procenta zastupljenosti vetra iz različitih pravaca na posmatranom mestu i za posmatrani period, zajedno sa brzinama ili jačinama vetra i procentom tišine. Ruže sačinjavaju 4, 8, 16 ili 32 pravca, gde su najznačajniji sever (engl. N-North), istok (engl. E-East), jug (engl. S-South) and zapad (engl. W-West) koji se označavaju prvim slovom engleske reči koja označava određeni pravac. Na slici E6.1 prikazana je ruža sa 32 pravca u kojoj se javljaju kombinacije kao što je sever severoistok (engl. north-northeast).



Slika E6.1

Ruža vetra.

E6.3 Energija i snaga vetra

Vetar je izvor energije koja se može eksploatisati za stvaranje električne struje. Da bi procenili da li je region pogodan za uspostavljanje „vetroparka" (veliki broj vetroturbina na jednoj lokaciji), važno je izračunati energiju vetra i snagu vetra. Ako je gustina vazduha ρ koja prlazi normalno kroz površinu A sa brzinom v tokom vremena t, onda se energija vetra izračunava kao

(E6.2)

odatle se snaga vetra izražava kao

(E6.3)

E7 Voda u zemljištu

E7.1 Evapotranspiracija

Jedan od značajnih aspekata procene vodnog bilansa je procena količine vode koja se sa površine tla oslobodi u procesu evapotranspiracije. Jedan od poznatih modela za računanje referentne evapotranspiracije je svakako Penman-Montit (Penman-Monteith) model (Allen et al. 1998)

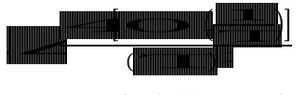
(E7.1)

gde je R_{net} neto zračenje, Q_G fluks toplote u dublje slojeve zemljišta, d deficit vodene pare, r_a srednja gustina vazduha pri konstantnom pritisku, C_p specifična toplota pri kontantnom pritisku, Δ nagib prave odnosa temperature i pritiska, γ je psihrometarska konstanta, a r_s i r_a su stomaterni i aerodinamički otpori, redom.

Ako se u jednačinu E7.1 zamene konstantne vrednosti (procedura je data na http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents) dobija se formula za određivanje referentne evapotranspiracije (E7.2, pogledaj i glavu 7)

(E7.2)

U jednačini E7.2 R_{net} je konvertovano sa 0,408 u jedinice mm dan^{-1} i potrebnao je poznavanje brzine vetra na 2 m visine (u_2) da bi se izračunala . U većini slučajeva Q_G se zanemaruje ili se uzima kao procenat od R_{net}. Nagib krive se računa kao



(E7.3)

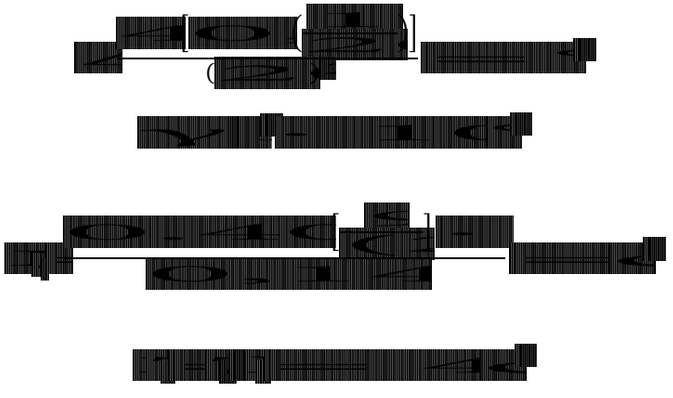
gde je γ psihrometarska konstanta u funkciji atmosferskog pritiska (p)

(E7.4)

Sve u vezi sa transformacijom meteoroloških elemenata koji su potrebni za proračun može se pronaći na internetu (Allen et al. 1998).

Primer:

Izračunati potencijalnu evapotranspiraciju za pšenicu čiji je koeficijent kultura k_c 1,12, ako je temperatura vazduha 20 °C, globalno neto zračenje 15 MJ m^{-2} dan^{-1}, deficit zasićenosti 0,6 kPa, brzina vetra 2 m s^{-1}. Smatrati da vlada standardni atmosferski pritisak.



Dodatak

Tabela D1.

Klimatološke stanice korišćene za analizu temperaturnog i padavinskog režima u Srbiji

Lokalitet	Oznaka	Geografska dužina (° E)	Geografska širina (° N)	Nadmorska visina (m)
Palić	PA	19,77	46,1	102
Kikinda	KI	20,47	45,85	81
Sombor	SO	19,15	45,77	88
Zrenjanin	ZR	20,42	45,37	80
Rimski šančevi	NS	19,85	45,33	88
Sremska Mitrovica	SM	19,55	45,1	82
Beograd	BG	20,47	44,8	132
V, Gradište	VG	21,52	44,75	82
Loznica	LO	19,23	44,55	121
Smederevska Palanka	SP	20,95	44,37	121
Valjevo	VA	19,92	44,32	176
Negotin	NG	22,55	44,23	42
Crni Vrh	CV	21,95	44,12	1037
Kragujevac	KR	20,93	44,03	185
Ćuprija	CU	21,38	43,93	123
Zaječar	ZA	22,3	43,88	144
Požega	PO	20,03	43,85	310
Zlatibor	ZL	19,72	43,73	1028
Kraljevo	KV	20,7	43,7	215
Kruševac	KS	21,35	43,57	166
Niš	NI	21,9	43,33	202
Sjenica	SJ	20	43,28	1038
Kopaonik	KO	20,8	43,28	1710
Dimitrovgrad	DI	22,75	43,02	450
Leskovac	LE	21,95	42,98	230
Vranje	VR	21,92	42,55	432

Tabela D2.

Normalna temperatura vazduha za izabrani period (DJF, MAM, JJA, SON, MA) i normalna godišnja temperatura vazduha u Srbiji [izvor: RHMZ Srbije]

	DJF		MAM		JJA		SON		MA		God	
	61–90	81–10	61–90	81–10	61–90	81–10	61–90	81–10	61–90	81–10	61–90	81–10
Palić	0,1	0,6	11,0	11,6	20,2	21,5	10,9	11,2	15,6	16,6	10,5	11,2
Kikinda	0,2	0,8	11,3	11,8	20,4	21,4	11,2	11,4	15,8	16,6	10,8	11,3
Sombor	0,3	0,8	11,0	11,6	20,0	21,1	10,8	11,1	15,5	16,4	10,5	11,2
Zrenjanin	0,8	1,0	11,4	11,9	20,2	21,4	11,2	11,7	15,8	16,7	10,9	11,5
R. šančevi	0,6	1,1	11,3	11,8	20,4	21,2	11,4	11,5	15,9	16,5	10,9	11,4
S. Mitrovica	0,7	1,0	11,4	11,8	20,1	20,9	11,1	11,4	15,7	16,3	10,8	11,3
Beograd	1,8	2,4	12,3	12,9	21,1	22,2	12,4	12,7	16,7	17,6	11,9	12,5
V. Gradište	0,6	1,0	11,3	11,7	20,2	21,1	11,5	11,5	15,8	16,4	10,9	11,3
Loznica	1,3	1,8	11,3	11,9	20,0	21,1	11,3	11,7	15,7	16,5	11	11,6
Sm. Palanka	1,1	1,6	11,4	11,8	20,2	21,2	11,4	11,6	15,8	16,5	11	11,5
Valjevo	1,0	1,5	11,1	11,7	20,0	21,1	11,3	11,5	15,6	16,4	10,9	11,4
Negotin	0,4	1,1	11,4	12,2	21,2	22,5	11,3	11,6	16,3	17,4	11,1	11,8
Crni Vrh	-3,2	-2,9	6,3	6,2	15,3	16,2	7,2	7,0	10,8	11,2	6,4	6,6
Kragujevac	1,3	1,8	11,2	11,7	19,9	21,1	11,5	11,7	15,6	16,4	11	11,6
Ćuprija	0,8	1,1	11,2	11,4	19,8	20,8	11,1	11,2	15,5	16,1	10,7	11,1
Zaječar	0,1	0,6	10,7	11,4	20,2	21,5	10,7	10,7	15,5	16,4	10,4	11
Požega	-0,9	-0,5	10,0	10,2	18,5	19,3	9,8	9,8	14,2	14,8	9,3	9,7
Zlatibor	-2,1	-1,5	6,7	7,3	15,7	16,7	8,2	8,4	11,2	12,0	7,1	7,7
Kraljevo	1,1	1,4	11,5	11,8	20,1	21,0	11,5	11,5	15,8	16,4	11	11,5
Kruševac	0,8	1,3	11,2	11,7	20,1	21,1	11,2	11,4	15,7	16,4	10,8	11,4
Niš	1,3	1,7	11,7	12,1	20,6	21,7	11,8	12,0	16,2	16,9	11,4	11,9
Kopaonik	-5,0	-4,4	1,5	2,4	10,6	12,0	3,9	4,6	6,0	7,2	2,7	3,6
Sjenica	-3,4	-2,8	6,1	6,6	14,7	15,8	7,0	7,3	10,4	11,2	6,1	6,7
Dimitrovgrad	0,1	0,2	9,8	10,0	18,6	19,4	10,3	10,3	14,2	14,7	9,7	10
Leskovac	0,7	1,0	11,2	11,4	20,0	20,8	11,1	11,0	15,6	16,1	10,8	11,1
Vranje	0,8	1,0	10,9	11,2	20,0	20,9	11,5	11,5	15,4	16,1	10,8	11,1

Tabela D3.

Promene normalne temperature vazduha za izabrani period (DJF, MAM, JJA, SON, MA) i normalne godišnje temperature vazduha u Srbiji tokom perioda 1981–2010. u odnosu na period 1961–1990 [izvor: RHMZ Srbije]

Lokalitet	DJF	MAM	JJA	SON	MA	GOD.
Palić	0,5	0,6	1,3	0,3	0,9	0,7
Kikinda	0,6	0,5	1,1	0,2	0,8	0,5
Sombor	0,5	0,6	1,1	0,3	0,9	0,7
Zrenjanin	0,3	0,5	1,2	0,5	0,9	0,6
R. šančevi	0,5	0,5	0,8	0,1	0,6	0,5
S, Mitrovica	0,3	0,4	0,8	0,2	0,6	0,5
Beograd	0,6	0,6	1,1	0,3	0,9	0,6
V, Gradište	0,4	0,3	0,9	0,0	0,6	0,4
Loznica	0,5	0,6	1,1	0,3	0,8	0,6
Sm, Palanka	0,5	0,4	1,0	0,2	0,7	0,5
Valjevo	0,5	0,5	1,0	0,3	0,8	0,5
Negotin	0,7	0,8	1,4	0,2	1,1	0,7
Crni Vrh	0,2	-0,1	0,9	-0,2	0,4	0,2
Kragujevac	0,5	0,4	1,2	0,2	0,8	0,6
Ćuprija	0,3	0,3	1,0	0,1	0,6	0,4
Zaječar	0,5	0,6	1,3	0,1	1,0	0,6
Požega	0,3	0,3	0,8	0,0	0,5	0,4
Zlatibor	0,6	0,6	1,0	0,1	0,8	0,6
Kraljevo	0,3	0,3	0,9	0,0	0,6	0,5
Kruševac	0,5	0,5	1,0	0,2	0,8	0,6
Niš	0,4	0,4	1,1	0,2	0,7	0,5
Sjenica	0,6	0,5	1,1	0,3	0,8	0,6
Kopaonik	0,6	0,9	1,5	0,7	1,2	0,9
Dimitrovgrad	0,1	0,2	0,8	-0,1	0,5	0,3
Leskovac	0,3	0,2	0,8	-0,1	0,5	0,3
Vranje	0,2	0,3	0,9	0,0	0,6	0,3

Tabela D4.

Srednje maksimalne, minimalne i godišnje temperature vazduha, srednje količine padavina i srednje vrednosti osunčavanja na meteorološkoj stanici Rimski šančevi za period 1961–1990 i 1981–2010

Met, element	Period	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	IV-X	God,	Kolebanje
t_{max} (°C)	1961-1990	**2,5**	5,7	11,5	17,2	22,2	25,2	27,2	**27,2**	23,7	18,0	10,3	4,5	23,8	16,3	24,7
	1981-2010	**3,7**	6,1	12	17,7	23	25,8	28,1	**28,3**	23,6	18,0	10,5	4,8	24,4	16,8	24,6
t_{min} (°C)	1961-1990	**-4,4**	-2,3	1,2	5,8	10,6	13,6	14,7	**14,2**	11,2	6,3	2,2	-1,9	11,7	5,9	19,1
	1981-2010	**-3,1**	-2,4	1,5	6,2	11,3	14,1	15,5	**15,3**	11,4	6,9	2,2	-1,5	12,3	6,5	18,6
t_{sr} (°C)	1961-1990	**-1,0**	1,5	6,0	11,4	16,6	19,6	21,1	**20,6**	16,9	11,5	5,9	1,2	17,7	10,9	22,1
	1981-2010	0,2	***1,6***	***6,4***	***11,8***	***17,3***	***20,1***	***21,9***	***21,6***	***16,9***	***11,8***	***5,9***	***1,5***	18,3	11,4	21,7
H (mm)	1961-1990	37,8	34,8	40,7	46,8	56,9	82,5	61,2	55,3	35,9	34,8	45,9	44,2	338,6	576,8	47,7
	1981-2010	***39,1***	31,4	***42,5***	***49,2***	***63***	***91,4***	***64,3***	***57,5***	***53,8***	***52,7***	***53,8***	***48,8***	379,2	647,3	60,0
Osunč, (h)	1961-1990	68,1	88,6	147,9	176,8	231,5	249,7	289,2	272,2	207	172,8	83,4	55,2	1426,4	2042,4	234,0
	1981-2010	64,8	***99***	***156,4***	***190,1***	***250,8***	***269,4***	***303,6***	***285,8***	205,7	158,9	***92,4***	***58,4***	1505,4	2135,3	245,2

Tabela D5.

Srednje maksimalne, minimalne i godišnje temperature vazduha, srednje količine padavina i srednje vrednosti osunčavanja na meteorološkoj stanici Kopaonik za period 1961–1990 i 1981–2010

Met, element	Period	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	IV-X	God,	Kolebanje
t_{max} (°C)	1961-1990	**-2,2**	-2	0,4	5	10,6	13,1	15,5	**15,9**	12,8	8,3	3	-0,7	12,2	6,6	18,1
	1981-2010	-0,9	**-1,4**	1,5	5,8	11,3	14,7	17	**17,4**	13,1	9,3	3,8	-0,1	13,2	7,6	18,8
t_{min} (°C)	1961-1990	**-8,7**	-8,4	-6,2	-2	3	5,5	**7,5**	**7,5**	4,7	0,8	-3,8	-6,9	4,4	-0,6	16,2
	1981-2010	-7,7	**-8,2**	-5,3	-1,2	3,5	6,6	8,4	**8,7**	5,1	1,7	-2,9	-6,4	5,2	0,2	16,9
t_{sr} (°C)	1961-1990	**-5,6**	-5,5	-3,2	1,2	6,4	9	11,3	**11,4**	8,2	4,1	-0,7	-3,9	**7,9**	2,7	17
	1981-2010	***-4,6***	***-5,1***	***-2,2***	***2***	***7,3***	***10,6***	***12,7***	***12,8***	***8,7***	***5***	***0***	-3,5	**9,0**	3,6	17,9
H (mm)	1961-1990	62	58,7	64,8	74,7	108,8	**124,7**	92,1	94,3	66,7	**46,2**	68,9	58,9	**561,3**	920,8	78,5
	1981-2010	60,3	***65,9***	***74,9***	***88,7***	***110,6***	107,1	91,2	80,3	***85,6***	***67,8***	***78,3***	73,8	**563,5**	984,4	50,3
Osunč, (h)	1961-1990	102,6	102,6	134,5	160,2	186,8	205,8	274,6	269,2	218,1	182,6	122,8	84,7	**219,1**	2044,5	189,9
	1981-2010	99,8	100,2	132	152,9	***189***	***219,2***	268,8	260,2	196,4	166,4	113,6	82	**214,4**	1980,5	186,8

Tabela D6.

Srednje maksimalne, minimalne i godišnje temperature vazduha, srednje količine padavina i srednje vrednosti osunčavanja na meteorološkoj stanici Vranje za period 1961–1990 i 1981–2010

Met, element	Period	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	IV-X	God.	Kolebanje
t_{max} (°C)	1961-1990	3	6,2	11,3	16,7	21,6	24,8	27,3	27,6	24	18	10,6	4,6	23,7	16,3	24,6
	1981-2010	4,2	6,8	12,2	17,3	22,5	26,1	28,7	29,1	24,2	18,4	10,8	5,1	24,7	17,1	24,9
t_{min} (°C)	1961-1990	-3,9	-1,8	1,3	5,4	9,6	12,6	13,9	13,8	10,5	6	1,8	-2,2	11,0	5,6	17,8
	1981-2010	-3,6	-2,6	1,1	5	9,4	12,6	14,1	14,1	10,3	6,2	1,5	-2,1	10,9	5,5	17,7
t_{sr} (°C)	1961-1990	-0,7	2	6,1	11	15,6	18,6	20,7	20,6	16,9	11,6	5,9	1	**17,2**	10,8	21,4
	1981-2010	**-0,1**	1,8	**6,4**	**11,2**	**16**	**19,5**	**21,6**	**21,6**	**16,9**	**11,8**	5,7	1,2	**17,8**	11,1	21,7
H (mm)	1961-1990	41,4	43,4	46	51,7	65	70,9	50,4	38,7	45,4	46,2	62,9	52	**322,1**	614	32,2
	1981-2010	35,4	38,3	38,2	**52**	56,3	63,2	44,7	**43,2**	**46,7**	**52,4**	57,4	50,5	**306,1**	578,3	27,8
Osunč, (h)	1961-1990	67,2	94,4	141,3	176,6	219,9	247,8	303,8	291,4	221,9	171,3	91,5	58,7	**243,6**	2086	245,1
	1981-2010	73,8	100,7	**151,3**	176,2	**230,5**	**274,3**	**316,1**	**294,8**	209,8	153,4	87,5	55,5	**250,3**	2124	260,6

Tabela D7.

Koeficijent varijabilnosti (%) akumulisanih stepen-dana iznad 5 °C

		Izabrani period							
	Lokalitet	71–80	81–90	91–00	01–10	11–18	71–00	81–10	01–18
Proleće	Rimski šančevi	14,7	14,3	14,2	8,3	9,3	14,0	13,1	8,8
	Beograd	14,1	14,1	13,2	8,1	8,7	13,5	11,9	8,5
	Loznica	14,5	13,9	14,5	8,0	8,8	14,1	13,1	8,4
	Zlatibor	22,2	23,1	22,9	17,5	18,9	22,8	21,3	17,6
	Niš	13,1	15,7	15,2	7,2	10,5	14,4	13,2	8,6
	Vranje	13,3	14,2	15,6	6,4	10,6	14,3	13,0	8,5
Leto	Rimski šančevi	4,1	4,8	5,7	6,3	5,8	5,8	6,2	6,5
	Beograd	3,7	5,0	5,1	6,4	6,3	6,5	6,5	6,9
	Loznica	3,9	5,3	4,5	6,4	5,6	6,2	6,6	6,5
	Zlatibor	5,9	8,2	6,5	8,8	9,8	9,5	9,8	9,0
	Niš	5,0	4,8	4,3	7,2	6,1	6,7	6,7	6,9
	Vranje	5,1	5,2	4,2	5,7	4,7	6,0	5,8	5,6
Jesen	Rimski šančevi	9,9	11,8	11,7	12,0	11,1	12,6	11,6	12,8
	Beograd	9,5	11,3	10,7	11,6	9,6	12,2	10,9	11,6
	Loznica	11,0	11,9	9,7	11,1	7,8	12,7	10,9	10,7
	Zlatibor	19,0	15,0	17,8	14,2	14,1	19,6	15,4	13,7
	Niš	12,1	12,6	12,2	8,4	10,3	13,4	11,4	10,3
	Vranje	14,8	11,9	14,6	8,2	10,9	14,5	11,5	11,2
Zima	Rimski šančevi	69,6	86,7	67,3	59,6	43,9	72,9	70,2	51,3
	Beograd	54,5	73,1	62,9	55,9	41,6	62,3	61,8	48,3
	Loznica	68,2	81,2	64,1	55,3	42,7	69,5	66,2	48,4
	Zlatibor	101,5	103,8	68,5	72,4	71,6	94,1	83,7	70,0
	Niš	69,3	53,9	63,3	48,5	46,3	60,5	55,3	46,2
	Vranje	68,9	53,1	78,4	47,1	58,6	67,3	63,9	51,2

Tabela D8.

Trend akumulisanih stepen-dana iznad 5 °C

		Izabrani period							
	Region	71–80	81–90	91–00	01–10	11–18	71–00	81–10	01–18
Proleće	Rimski šančevi	-16,7	5,324	13,590	4,420	15,320	0,966	4,150	4,707
	Beograd	-17,3	6,825	12,495	3,826	17,728	1,591	3,067	5,456
	Loznica	-15,8	8,013	15,111	1,488	18,202	2,111	4,673	4,364
	Zlatibor	-12,8	2,008	14,934	9,836	19,213	2,007	3,115	3,566
	Niš	-11,5	7,472	14,605	1,591	19,463	0,948	3,037	3,207
	Vranje	-10,5	5,493	12,040	-0,054	21,026	0,492	2,404	3,573
Leto	Rimski šančevi	-13,1	6,634	1,691	2,515	6,217	4,945	5,056	7,809
	Beograd	-10,6	7,943	2,996	8,203	-0,909	7,634	6,619	9,976
	Loznica	-9,2	6,035	5,553	1,280	-0,926	6,547	6,615	6,937
	Zlatibor	-8,4	10,156	8,697	-10,754	-10,699	7,841	7,604	-1,637
	Niš	-13,9	7,578	8,580	5,647	-8,912	7,728	6,518	6,068
	Vranje	-8,8	8,025	13,034	4,232	-5,689	6,060	5,565	6,008
Jesen	Rimski šančevi	6,9	-5,606	5,850	9,536	-9,575	3,803	1,596	7,838
	Beograd	7,8	-3,994	4,167	9,422	-2,056	5,181	0,611	8,217
	Loznica	6,1	-4,813	4,059	1,458	0,487	4,816	1,925	6,211
	Zlatibor	8,8	-2,835	-1,863	-12,781	-12,149	4,482	0,725	-2,742
	Niš	6,5	-3,081	0,963	6,509	-6,661	4,829	-0,725	6,374
	Vranje	12,7	-0,879	1,066	3,192	-3,757	4,206	0,525	7,200
Zima	Rimski šančevi	3,3	8,628	1,670	3,551	2,636	0,734	1,478	1,443
	Beograd	3,4	14,118	3,248	1,693	5,399	1,275	1,584	1,708
	Loznica	5,3	10,875	2,321	2,555	5,931	0,538	1,532	1,723
	Zlatibor	2,6	5,666	1,093	0,684	-0,331	0,486	0,517	0,244
	Niš	4,4	6,328	3,803	4,325	3,342	0,323	1,561	0,914
	Vranje	2,8	3,530	3,308	6,274	1,844	-0,314	1,659	1,463

Tabela D9.

Srednja količina padavina za izabrani period (DJF, MAM, JJA, SON, MA) i srednja godišnja količina padavina za period 1961–1990 i 1981–2010 [izvor: RHMZ Srbije]

Lokalitet	DJF		MAM		JJA		SON		MA		God.	
	'61–'90	'81–'10	'61–'90	'81–'10	'61–'90	'81–'10	'61–'90	'81–'10	'61–'90	'81–'10	'61–'90	'81–'10
Palić	112,9	110,2	131,4	133,4	184,6	190,1	110,4	137,4	316,0	323,5	539,3	571,1
Kikinda	111,0	107,6	134,1	130,8	177,8	181,2	112,3	136,7	311,9	312,0	535,2	556,3
Sombor	112,3	114,6	143,7	141,6	191,5	200,8	126	155,4	335,2	342,4	573,5	612,4
Zrenjanin	106,7	111,2	140	135,8	197	194,2	118,4	141,9	337	330	562,1	583,2
Rimski šančevi	116,8	119,3	144,4	154,7	199	213,2	116,6	160,3	343,4	367,9	576,8	647,3
S. Mitrovica	127,1	112,7	150,1	145	203,1	198,8	134,3	157,7	353,2	343,8	614,6	614,2
Beograd	151,22	144,3	179	163,4	208,1	222,5	146	160,6	387,1	385,9	684,3	690,9
V. Gradište	150,5	137,9	173,5	158,5	212	198,9	138,8	157,7	385,5	357,4	674,8	653,0
Loznica	163,8	174,9	210,4	206,7	260,2	268,9	185,9	217,4	470,6	475,6	820,3	868,0
Sm. Palanka	133,1	133,4	166,8	148	196,5	198,1	139,8	157,6	363,3	346,1	636,2	637,2
Valjevo	156	155,1	205,8	189,9	252,9	251,9	167,5	190,9	458,7	441,8	782,2	787,7
Negotin	148,6	152,3	187,5	151,9	156,6	156,1	153,3	153,3	344,1	308	646	613,6
Crni Vrh	138,7	153	220,3	197,4	276,4	222,8	174,7	196	496,7	420,2	810,1	769,1
Kragujevac	127,4	120,7	167,6	154,9	206	192,7	131,2	150	373,6	347,6	632,2	618,5
Ćuprija	144,7	148	176,8	169,8	191,6	183,8	138,4	156,6	368,4	353,6	651,5	658,2
Zaječar	135,3	132,2	175,1	146,2	163,5	158,3	136,6	144,6	338,6	304,5	610,5	581,4
Požega	150,5	136,9	193,3	178,6	224,6	224,3	150,5	186,4	417,9	402,9	739,9	726,4
Zlatibor	203,8	216,5	240,8	246,8	284,3	285,3	235,4	268,8	525,1	532,1	964,3	1017
Kraljevo	163,5	146,6	205,5	186,7	228,6	233,9	163,4	173	434,1	420,6	761	740,3
Kruševac	138,3	134,6	179,3	161,9	189,7	176	140,2	155,5	369	337,9	647,5	628,1
Niš	135,2	127,1	163,3	157,1	156,6	148	134,5	148,3	319,9	305,1	589,6	580,3
Kopaonik	179,6	200	248,3	274,2	311,1	278,6	181,8	231,7	559,4	552,8	920,8	984,4
Sjenica	141,8	155,9	161,2	173,6	221	208	188,6	212,1	382,2	381,6	712,6	749,5
Dimitrovgrad	131,7	124,5	172,5	161,7	191,9	183,6	139,4	154,8	364,4	345,3	635,5	624,7
Leskovac	132,6	143,1	156,2	162,2	161,4	155,6	144,2	164,4	317,6	317,8	594,4	625,4
Vranje	136,8	124,2	162,7	146,5	160	151,1	154,5	156,5	322,7	297,6	614	578,3

Tabela D10.

Relativna promena (%) srednje količina padavina za izabrani period (DJF, MAM, JJA, SON, MA) i srednje godišnje količine padavina u Srbiji tokom perioda 1981–2010. u odnosu na period 1961–1990 [izvor: RHMZ Srbije]

Lokalitet	DJF	MAM	JJA	SON	MA	GOD
Palić	-2,4	1,5	3,0	24,5	2,4	5,9
Kikinda	-3,1	-2,5	1,9	21,7	0,0	3,9
Sombor	2,0	-1,5	4,9	23,3	2,1	6,8
Zrenjanin	4,2	-3,0	-1,4	19,8	-2,1	3,8
Rimski šančevi	2,1	7,1	7,1	37,5	7,1	12,2
S. Mitrovica	-11,3	-3,4	-2,1	17,4	-2,7	-0,1
Beograd	-4,6	-8,7	6,9	10,0	-0,3	1,0
V. Gradište	-8,4	-8,6	-6,2	13,6	-7,3	-3,2
Loznica	6,8	-1,8	3,3	16,9	1,1	5,8
Sm. Palanka	0,2	-11,3	0,8	12,7	-4,7	0,2
Valjevo	-0,6	-7,7	-0,4	14,0	-3,7	0,7
Negotin	2,5	-19,0	-0,3	0,0	-10,5	-5,0
Crni Vrh	10,3	-10,4	-19,4	12,2	-15,4	-5,1
Kragujevac	-5,3	-7,6	-6,5	14,3	-7,0	-2,2
Ćuprija	2,3	-4,0	-4,1	13,2	-4,0	1,0
Zaječar	-2,3	-16,5	-3,2	5,9	-10,1	-4,8
Požega	-9,0	-7,6	-0,1	8,7	-3,6	-1,8
Zlatibor	6,2	2,5	0,4	14,2	1,3	5,5
Kraljevo	-10,3	-9,1	2,3	5,9	-3,1	-2,7
Kruševac	-2,7	-9,7	-7,2	10,9	-8,4	-3,0
Niš	-6,0	-3,8	-5,5	10,3	-4,6	-1,6
Kopaonik	11,4	10,4	-10,4	27,4	-1,2	6,9
Sjenica	9,9	7,7	-5,9	12,5	-0,2	5,2
Dimitrovgrad	-5,5	-6,3	-4,3	11,0	-5,2	-1,7
Leskovac	7,9	3,8	-3,6	14,0	0,1	5,2
Vranje	-9,2	-10,0	-5,6	1,3	-7,8	-5,8

Tabela D11.

Koeficijent varijabilnosti (%) sezonske količine padavina

		Izabrani period							
	Lokalitet	71–80	81–90	91–00	01–10	11–18	71–00	81–10	01–18
Proleće	R. šančevi	28,34	38,09	22,55	49,8	33,26	33,5	40,21	42,03
	Beograd	23,3	36,47	32	39,43	41,64	31,79	36,37	42,93
	Loznica	26,03	28,65	27,45	36,7	42,23	30,31	33,12	42,25
	Zlatibor	19,89	28,77	19,86	33,65	33,8	22,49	30,02	32,83
	Niš	36,75	33,18	23,51	27,39	32,84	32,89	28,88	31,46
	Vranje	27,03	25,37	26,32	29,82	40,39	27,05	26,93	36,19
Leto	R. šančevi	34,75	29,48	43,7	48,87	49,13	38,03	44,31	50,6
	Beograd	23,84	30,22	49,75	25,43	62,85	35,57	36,04	42,98
	Loznica	26,26	35,26	32,36	29,99	48,4	30,39	31,65	39,1
	Zlatibor	27,66	41,28	26,28	48,32	56,13	32,23	40,42	50,25
	Niš	28,3	34,44	44,06	33,17	55,56	36,21	37,21	42,6
	Vranje	45,25	50,25	54,85	40,43	50,3	49,84	47,91	46,63
Jesen	R. šančevi	26,79	34,89	38,76	41,48	42,34	39,79	44,53	43,82
	Beograd	41,73	36,14	27,59	41,04	40,06	36,54	36,53	40,74
	Loznica	22,99	26,52	27,71	37,25	36,03	27,1	33,57	39,76
	Zlatibor	25,37	25,37	33,87	30,55	30,12	28,86	30,28	29,78
	Niš	39,35	49,28	44,73	43,7	49,45	44,96	46,93	45,51
	Vranje	43,18	43,88	37,46	35,49	50,15	43,17	39,49	41,02
Zima	R. šančevi	61,1	29,9	32,79	39,75	48,47	42,01	34,71	42,54
	Beograd	50,08	31,94	28,39	45,92	44,96	36,63	37,73	45,91
	Loznica	47,35	28,01	26,88	29,25	39,13	35,14	29,81	32,8
	Zlatibor	33,33	33,3	22,11	38,76	43,12	30,43	30,84	39,49
	Niš	30,37	31,03	30,68	42,34	43,71	29,76	34,82	42,29
	Vranje	43,28	39,32	30,89	36,82	40,38	36,71	34,7	39,5

Tabela D12.

Trend (mm/sezoni) sezonske količine padavina

		Izabrani period							
	Lokalitet	71–80	81–90	91–00	01–10	11–18	71–00	81–10	01–18
Proleće	Rimski šančevi	4,882	0,389	-1,326	-4,801	7,432	0,14	-0,612	3,026
	Beograd	5,246	-1,765	-3,875	-0,154	0,295	-1,890	-1,184	4,764
	Loznica	4,702	-2,194	-8,689	-0,312	-0,877	-0,722	-1,319	6,163
	Zlatibor	7,341	4,887	-1,613	-7,138	2,849	1,047	2,751	0,394
	Niš	-1,028	3,780	-5,202	-3,287	6,931	-1,653	0,734	3,311
	Vranje	6,001	7,662	-4,101	3,764	11,787	-1,027	0,753	4,331
Leto	Rimski šančevi	-0,581	-13,332	3,934	7,689	18,281	-0,437	2,883	-2,427
	Beograd	-3,393	-7,681	-5,327	-0,432	10,220	-1,622	1,501	-5,627
	Loznica	-0,422	-2,076	-5,179	5,715	27,815	-1,066	0,95	-3,033
	Zlatibor	3,012	0,603	-1,500	25,495	34,558	-1,979	2,110	5,810
	Niš	3,566	-2,766	-1,893	-5,179	4,128	-2,192	0,624	-3,472
	Vranje	-6,909	-8,145	-5,510	-10,421	8,439	-2,962	0,406	-5,592
Jesen	Rimski šančevi	-2,275	-3,493	-6,612	-6,176	2,737	1,642	2,862	-4,986
	Beograd	-5,143	-5,267	2,340	-6,973	3,069	-0,564	1,597	-3,371
	Loznica	-3,128	-7,230	-4,325	-9,365	8,001	0,394	2,149	-6,505
	Zlatibor	-7,192	0,255	14,353	14,864	11,088	-0,141	1,401	1,978
	Niš	-6,302	-1,017	4,507	0,322	6,433	-0,693	2,604	-1,645
	Vranje	-11,760	-0,518	4,501	15,327	7,870	-2,049	2,824	2,568
Zima	Rimski šančevi	13,113	-6,676	8,381	8,513	-2,857	2,259	1,182	1,356
	Beograd	17,933	-8,101	10,368	16,996	-12,445	1,622	2,310	-0,828
	Loznica	19,358	-6,822	12,938	7,295	-3,261	2,860	2,607	0,107
	Zlatibor	16,547	-15,425	8,670	1,735	-6,519	2,595	-0,159	-0,526
	Niš	8,169	-7,113	3,113	11,148	1,063	0,456	0,855	3,501
	Vranje	6,896	-5,613	1,937	5,216	1,267	0,395	0,458	3,599

Tabela D13.

Koeficijent varijabilnosti broja dana bez padavina (%)

		Izabrani period							
	Lokalitet	71–80	81–90	91–00	01–10	11–18	71–00	81–10	01–18
Proleće	Rimski šančevi	13,01	13,01	12,16	12,27	9,3	12,43	12,18	10,8
	Beograd	13,44	12,03	12,16	15,09	7,88	12,26	12,74	12,22
	Loznica	14,09	15,02	13,99	11,34	8,73	14,18	13,45	9,98
	Zlatibor	16,96	19,17	19,69	10,6	11,01	18,06	16,39	10,52
	Niš	14,42	14,32	10,85	9,07	7,58	13,09	11,21	9,51
	Vranje	19,35	21,58	11,34	17,81	17,65	17,78	17,04	17,26
Leto	Rimski šančevi	9,72	6,88	12,09	8,28	13,62	9,93	9,01	11,6
	Beograd	7,81	8,11	11,34	9,53	13,44	10,29	9,63	12,8
	Loznica	10,8	11,19	11,99	11,62	16,4	11,78	11,2	13,97
	Zlatibor	17,24	17,55	12,67	19,01	21,32	15,78	16,49	19,47
	Niš	7,69	9,33	10,77	11,07	13,64	10,13	10,18	12,21
	Vranje	19,35	21,58	11,34	17,81	17,65	17,78	17,04	17,26
Jesen	Rimski šančevi	8,71	11,95	11,86	7,75	8,87	11,27	11,18	8,51
	Beograd	10,53	10,07	9,71	12,52	8,94	10,35	10,88	11,33
	Loznica	12,25	5,9	14,38	11,48	9,6	11,98	11,79	11,32
	Zlatibor	12,57	9,96	17,52	14,65	13,58	13,95	14,2	13,85
	Niš	9,14	10,67	13,22	12,25	16,29	11,05	12,35	15,06
	Vranje	19,35	21,58	11,34	17,81	17,65	17,78	17,04	17,26
Zima	Rimski šančevi	16,1	10,58	10,25	17,73	21,43	12,24	13,45	18,97
	Beograd	20,04	15,46	11,02	18,85	21,62	15,37	15,52	19,67
	Loznica	15,74	18,07	9,88	23,84	26,8	14,55	18,19	24,52
	Zlatibor	16,24	19,44	9,6	33,38	29,88	15,17	21,93	31,01
	Niš	16,62	19,12	11,21	21,54	21,02	15,49	17,4	20,71
	Vranje	19,35	21,58	11,34	17,81	17,65	17,78	17,04	17,26

Tabela D14.

Tendencija broja dana bez padavina (dan/sezona)

		Izabrani period							
	Lokalitet	71–80	81–90	91–00	01–10	11–18	71–00	81–10	01–18
Proleće	Rimski šančevi	-1,7	-0,442	-0,091	-0,885	-0,69	-0,099	0,05	-0,293
	Beograd	-1,4	-0,685	-0,164	-0,412	0,405	0,03	-0,006	-0,138
	Loznica	-0,8	-0,242	-0,127	-0,691	-0,19	0,097	-0,03	-0,08
	Zlatibor	-1,4	-0,212	-0,055	-0,824	-1,000	-0,129	-0,009	-0,153
	Niš	-0,6	-0,776	1,024	-0,43	-0,524	0,119	0,016	-0,519
	Vranje	-1,1	-1,600	0,048	-1,424	-0,452	0,067	-0,042	-0,595
Leto	Rimski šančevi	-0,6	0,333	0,527	-0,103	-1,048	0,167	0,01	0,321
	Beograd	-0,6	0,685	0,412	0,424	-0,845	0,294	-0,055	0,6
	Loznica	-0,6	0,182	0,842	0,097	-2,000	0,247	0,041	0,136
	Zlatibor	-0,3	0,836	0,964	-1,630	-2,833	0,274	0,215	-0,474
	Niš	0,4	0,915	0,364	0,467	-1,714	0,323	-0,034	0,191
	Vranje	0,5	0,758	1,279	0,594	-1,071	0,498	0,083	0,272
Jesen	Rimski šančevi	-0,3	0,376	0,515	0,042	-0,345	-0,049	-0,184	0,252
	Beograd	0,2	0,055	0,515	0,988	-0,988	0,068	-0,121	0,464
	Loznica	0,08	0,188	0,333	0,073	-0,536	-0,076	-0,214	0,406
	Zlatibor	0,2	-1,103	-0,77	-1,588	-1,060	-0,003	-0,163	-0,212
	Niš	-0,2	-0,279	0,067	-0,321	-1,512	0,014	-0,291	0,369
	Vranje	-0,4	-0,248	-0,527	-0,958	-0,202	0,033	-0,335	0,313
Zima	Rimski šančevi	-0,3	0,739	-0,024	-1,958	0,964	0,046	-0,246	-0,116
	Beograd	0,3	2,085	-0,521	-1,721	1,012	0,094	-0,228	-0,042
	Loznica	0,5	2,109	-0,097	-2,152	2,488	0,23	-0,259	-0,033
	Zlatibor	0,3	1,945	-0,479	-1,006	1,417	0,071	-0,174	0,176
	Niš	0,5	1,545	-0,376	-0,855	1,988	0,137	-0,069	0,12
	Vranje	1,4	2,364	0,327	-1,630	1,036	0,42	0,043	-0,083

Tabela D15.

Koeficijent varijabilnosti dužine bezmraznog perioda (%)

	Izabrani period							
Lokalitet	71-80	81-90	91–00	01–10	11–18	71–00	81–10	01–18
Rimski šančevi	7,7	10,0	5,11	6,19	5,95	8,27	7,89	5,94
Beograd	6,6	9,3	7,18	8,65	8,55	7,78	8,26	9,13
Loznica	13,1	8,8	6,05	8,01	8,04	10,14	8,03	7,93
Zlatibor	7,0	6,3	9,55	11,06	10,44	7,86	9,21	10,68
Niš	10,1	8,1	5,65	5,93	7,13	7,9	6,46	6,63
Vranje	6,1	6,4	6,06	6,29	8,66	6,15	6,35	7,47

Tabela D16.

Trend dužine bezmraznog perioda (dan/god,)

	Izabrani period							
Lokalitet	71–80	81–90	91–00	01–10	11–18	71–00	81–10	01–18
Rimski šančevi	-2,3	1,7	1,3	3,1	-1,5	-0,4	0,06*	0,2
Beograd	-2,8	1,1	-1,8	4,3	1,7	-,005*	-0,05*	2,2
Loznica	-4,8	3,2	2,2	1,1	0,5	-0,6	0,6	0,7
Zlatibor	-2,6	-0,9	0,1	3,4	2,4	0,1	0,3	0,3
Niš	-2,6	2,4	0,5	2,4	-2,9	0,1	0,3	0,8
Vranje	-2,4	1,5	1,3	1,9	0,6	-0,08*	0,5	-0,2

Tabela D17.

Očekivane promene normalne temperature vazduha za izabrani period (MAM, JJA, A-S, DJF) i normalne godišnje temperature vazduha u Srbiji (ºC) u periodu 2001-2030 i 2071-2100 u odnosu na period 1971-2000

	2001–2030 vs, 1971–2000					2071–2100 vs, 1971–2000				
Lokalitet	MAM	JJA	A-S	DJF	God,	MAM	JJA	A-S	DJF	God,
Rimski šančevi	-0,1	0,5	0,5	-0,4	0,4	3,2	4,1	3,8	4,1	4,0
Sombor	0,0	0,5	0,5	-0,3	0,5	3,3	4,3	3,9	3,9	4,1
Požega	0,1	0,6	0,6	0,0	0,5	3,4	4,4	4,0	3,7	4,1
Kraljevo	0,2	0,5	0,6	0,0	0,6	3,4	4,1	3,9	3,7	4,1
Kruševac	0,2	0,5	0,6	0,1	0,6	3,6	4,3	4,0	3,9	4,2
Ćuprija	0,3	0,7	0,6	0,1	0,7	3,8	4,6	4,3	3,8	4,3
Niš	0,2	0,6	0,6	0,1	0,7	3,6	4,4	4,1	3,7	4,2
Zaječar	0,3	0,5	0,5	0,1	0,7	3,7	4,3	4,0	4,1	4,3
Dimitrovgrad	0,4	0,7	0,7	0,2	0,8	3,6	4,4	4,1	3,6	4,2
Vranje	0,3	0,6	0,6	0,1	0,7	3,5	4,3	4,0	3,4	4,1

Tabela D18.

Relativna promena broja dana sa ekstremnim temeperaturama vazduha (%) u periodu 2001–2030 i 2071–2100 u odnosu na period 1971-2000 (MD - mrazni dan, LD - letnji dan, TD - tropski dan)

	MD_{II}		LD_{VI}		LD_{VII}		LD_{VIII}		TD_{VI}		TD_{VII}		TD_{VIII}	
Lokalitet	01–30	71–00	01–30	71–00	01–30	71–00	01–30	71–00	01–30	71–00	01–30	71–00	01–30	71–00
Rimski šančevi	10	-60	6	63	5	32	4	30	50	250	11	133	33	144
Sombor	0	-67	6	63	-4	30	4	30	40	180	11	144	10	120
Požega	-6	-56	13	67	0	33	15	45	25	250	29	200	38	175
Kraljevo	-9	-73	6	53	0	26	9	30	20	200	22	144	30	140
Kruševac	-8	-67	12	53	0	26	14	36	40	220	10	130	18	127
Ćuprija	-8	-69	6	44	0	26	9	30	17	167	20	130	17	108
Niš	-20	-70	5	42	0	25	4	20	14	157	8	100	14	86
Zaječar	-7	-67	0	35	0	20	4	20	33	200	0	108	17	108
Dimitrovgrad	-7	-60	13	60	5	38	10	38	67	367	13	175	33	156
Vranje	-17	-67	6	53	4	26	4	25	25	275	10	130	27	127

Tabela D19.

Relativna promena akumulisanih stepen-dana (%) u periodu 2001–2030 i 2071–2100 u odnosu na period 1971-2000 (u zagradi je navedena temperatura biološkog minimuma za koju su izračunate akumulacije)

	SD (0 °C)		SD (5 °C)		SD (10 °C)	
Lokalitet	01–30	71–00	01–30	71–00	01–30	71–00
Novi Sad	5	34	9	45	8	61
Sombor	5	34	9	46	4	61
Požega	4	36	7	47	6	68
Kraljevo	3	34	6	44	6	60
Kruševac	4	37	8	47	6	61
Ćuprija	7	40	10	50	8	69
Niš	3	33	9	44	5	60
Zaječar	7	38	8	46	7	64
Dimitrovgrad	4	37	10	50	12	73
Vranje	4	33	9	47	4	62

Tabela D20.

Relativna promena prinosa ozimepšenice (%) za 2040. i 2080. godinu u odnosu na simulirani prinos za period 1971–2000 (H: HadCM3; M: ECHAM5; N: NCAR-PCM; BK: Banatski Karlovac; KI: Kikinda; PA: Palić; RS: Rimski šančevi; SO: Sombor; ZR: Zrenjanin)

Černozem														Fluvisol											
2040						2080								2040						2080					
330 ppm			550 ppm			330 ppm			1050 ppm					330 ppm			550 ppm			330 ppm			1050 ppm		
H	M	N	H	M	N	H	M	N	H	M	N			H	M	N	H	M	N	H	M	N	H	M	N
-10	-8	-8	7	8	9	-11	-8	-6	40	46	50	BK		-15	-13	-13	1	3	3	-16	-13	-11	33	39	42
-8	-8	-4	5	5	11	-8	-6	0	28	33	44	KI		-4	-4	0	14	14	19	-6	-3	1	50	54	62
-5	-6	11	13	12	33	-8	9	7	46	77	74	PA		-5	-6	-4	13	11	14	-8	-7	-5	47	49	53
-6	-5	-3	12	13	15	-9	-7	-2	46	49	57	RS		-6	-4	-3	12	14	15	-9	-7	-3	47	50	57
-4	-4	-1	14	14	18	-6	-4	0	49	53	60	SO		-1	-1	2	14	15	19	-2	1	5	40	47	55
-17	-17	-15	-1	-1	1	-19	-16	-14	28	33	38	ZR		1	2	4	17	17	21	0	3	7	45	50	58

Glejsol														Solonjec											
2040						2080								2040						2080					
-15	-14	-14	1	2	2	-17	-13	-11	30	36	41	BK		-15	-14	-14	1	2	2	-16	-13	-11	31	37	41
-5	-5	-1	12	13	17	-7	-4	0	44	48	59	KI		-5	-5	-1	13	13	17	-7	-4	0	45	50	59
-5	-6	-4	12	11	14	-8	-6	-4	44	46	52	PA		-5	-7	-4	12	11	14	-8	-7	-5	44	47	52
-6	-5	-4	12	12	14	-10	-8	-3	43	47	55	NS		-6	-5	-4	11	12	14	-9	-8	-3	44	48	55
-2	-1	3	12	14	19	-2	0	5	38	45	54	SO		-2	-1	2	13	15	19	-2	0	5	38	45	53
0	0	4	16	16	20	-1	3	8	42	48	59	ZR		0	1	4	16	16	21	0	3	7	43	48	58

Solončak														Arenosol											
2040						2080								2040						2080					
330 ppm			550 ppm			330 ppm			1050 ppm					330 ppm			550 ppm			330 ppm			1050 ppm		
H	M	N	H	M	N	H	M	N	H	M	N			H	M	N	H	M	N	H	M	N	H	M	N
-15	-14	-14	1	2	2	-16	-13	-11	31	37	41	BK		-12	-12	-11	4	13	6	-14	-10	-8	37	42	47
-5	-5	-2	12	12	17	-8	-5	0	43	48	58	KI		-6	-6	-1	12	11	17	-7	-4	3	45	50	62
-5	-7	-4	12	11	14	-9	-7	-5	44	46	51	PA		-5	-7	-3	13	11	16	-8	-6	-2	46	48	56
-7	-6	-4	11	12	14	-11	-9	-4	42	46	54	NS		-7	-6	-4	11	11	14	-10	-7	0	45	48	36
-3	-2	2	12	14	18	-3	0	5	37	44	53	SO		0	1	6	13	15	21	2	7	14	36	47	59
-0,3	0,1	4	16	16	20	-1	2	7	42	47	58	ZR		0	0	5	13	13	20	1	5	12	37	45	57

Tabela D21.

Očekivana relativna promena (%) nastupanja prvog dana inkubacionog perioda plamenjače vinove loze za 2030. i 2050. godinu u odnosu na period 1971–2000

Lokalitet	2030	2050
Novi Sad	-2,9	-4,4
Sombor	-1,0	-3,4
Požega	-5,4	-6,2
Kraljevo	-13,0	-12,0
Kruševac	-5,8	-7,2
Ćuprija	-6,5	-6,2
Niš	-4,4	-5,1
Zaječar	-5,3	-11,7
Dimitrovgrad	-8,3	-7,5
Vranje	-3,8	-5,1

Tabela D22.

Očekivana relativna promena (%) broja inkubacionih perioda tokom vegetacionog perioda plamenjače vinove loze za 2030, i 2050, godinu u odnosu na period 1971–2000

Lokalitet	2030	2050
Novi Sad	-0,3	-3,6
Sombor	-4,0	-16,4
Požega	-10,2	-10,9
Kraljevo	-2,6	-6,0
Kruševac	-6,0	-4,0
Ćuprija	-7,3	-0,3
Niš	-11,6	-17,8
Zaječar	-8,2	-16,9
Dimitrovgrad	-11,6	-20,4
Vranje	-8,2	-21,8

Literatura

Ahrens, D., 2010: Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere, 6th ed., Brooks/Cole, 506 pp., ISBN 978-0840049339

Alexandrov, V., Eitzinger, J., Cajic, V., Oberforster, M., 2002: Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. Global Change Biology, 8, 4, 372-389, doi: 10.1046/j.1354-1013.2002.00484.x

Alexandrov, V., Eitzinger, J., Hoogenboom, G., 2011: Climate variability and change and related impacts on agroecosystems in southeast and central Europe as well as southeast USA. COST, European Science Foundation, BOLIDINS, Sofia, Bulgaria, 232 pp., ISBN: 978-954-394-055-4.

Allen, L.H., Prasad, P.V.V, 2004: Crop Responses to Elevated Carbon Dioxide. In Encyclopedia of Plant and Crop Science, Marcel Dekker, Inc., 346-348, doi: 10.1081/E-EPCS 120005566

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. und Smith, M., 1998: Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers. Paper No 56, FAO, Rome, 326, ISBN 92-5-104219-5Online available at: http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm.

APCC, 2014: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2.

AQUACROP model. Available at: http://www.fao.org/aquacrop [accessed on 11 February 2019]

Baisi, F., Galligani, P.L., Pergola, V., 1999: Corso di Agronomia ed elementi di meccanizzazione agraria. Edagricole – Edizioni Agricole della Calderini s.r.l. - Bologna

Barry, R.G. Chorley, R.J. (2003) Atmosphere, Weather and Climate, 8th Ed., Routledge Taylor & Francis Group, 421 pp., ISBN 0-203-42823-4.

Bierhuizen, J.F., Slatyer, R.O., 1965: Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO2 in determining transpiration–photosynthesis relationships of cotton leaves. Agricultural Meteorology, 2, 259–270, doi: 10.1016/0002-1571(65)90012-9.

Blain, G.C., 2012: Revisiting the probabilistic definition of drought: strengths, limitations and an agrometeorological adaptation. Bragantia, 71 (1), 132-121, doi: xxx

Brunt, D., 1932: Notes on radiation in the atmosphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 58, 389-42, doi: 10.1002/qj.49705824704

Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998: An Introduction to Environmental Biophysics, 2nd Ed., Springer, p. 306, ISBN 978-1-4612-1626-1

Čamprag, D. (Ed.) 1983: Priručnik izvještajne i prognozne službe zaštite poljoprivrednih kultura. Beograd, Savez društava za zaštitu bilja Jugoslavije, 682 str.

Cardona, O.D., M.K. van Aalst, J. Birkmann, M. Fordham, G. McGregor, R. Perez, R.S. Pulwarty, E.L.F. Schipper, and B.T. Sinh, 2012: Determinants of risk: exposure and vulnerability. In Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 65-108.

Ceccon, P., Fagnano, M., Grignani, C., Monti, M., Orlandini, S., 2017: Agronomia. EdiSES S.r.l., Napoli, 620 pp., ISBN 8879599658

Crippa, M., Solazzo, E., Huang, G., Guizzardi, D., Koffi, E., Muntean, M., Schieberle, C., Friedrich, R., Janssens-Maenhout, G., 2020: High resolution temporal profiles in the Emissions Database for Global Atmospheric Research. Science Data 7, 121, doi: 10.1038/s41597-020-0462-2.

Durand, J.-L., Delusca, K., Boote, K., Lizaso, J., Manderscheid, R., Weigel, H.-J., Ruane, A.C., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Ahuja, L., Anapalli, S., Basso, B., Baron, C., Bertuzzi, P., Biernath,C., Deryng, D., Ewert, F., Gaiser, T., Gayler, S., Heinlein, F., Kersebaum, K.C., Kim, S.-H., Müller, C., Nendel, C., Olioso, A., Priesack, E., Ramirez Villegas, J., Ripoche, D., Rötter, R.P., Seidel, S.I., Srivastava, A., Tao, F., Timlin, D., Twine, T., Wang, E., Webber, H., Zhao, Z., 2017: How accurately do maize crop models simulate the interactions of atmospheric CO2 concentration levels with limited water supply on water use and yield? European Journal of Agronomy, 100, 67-75, doi: 10.1016/j.eja.2017.01.002.3

Đurđević, V., Rajković, B., 2012: Development of the EBU-POM coupled regional climate model and results from climate change experiments. In Mihailovic, D.T., Lalic, B. (Eds) Advances in Environmental Modeling and Measurements, Nova Science Publishers Inc.: New York, NY, 23–32, ISBN 978-1608765997

EEA, 2016. Agriculture and climate change. Available at https://www.eea.europa.eu/ signals/signals-2015/articles/agriculture-and-climate-change [accessed on 10 August 2020]

EEA, 2018. Greenhouse gas emissions and trends, data, maps, trends. Available at https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-6 [accessed on 10 August 2020]

Eitzinger, J., 2011: Spatial climatic variability in agicultural areas and its relevance to climatic trensd. Proceedings from COST734 Final Conference, Climate Change Impacts on Agriculture and Forestry in Europe, 3 – 6 May 2011, Zámok Topoľčianky, Slovakia. Available at http://www.shmu.sk/File/akcie/Gerersdorfer%20Thomas, %20%20Spatial%20climatic%20va.pdf [accessed on 10 August 2020]

Eitzinger, J., Kersebaum, K. C., Formayer, H., 2009: Landwirtschaft im Klimawandel - Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. http://de.agrimedia.com, 320, Agrimedia, D-29459 Clenze, Deutschland, ISBN: 978-3-86037-378-1 (in german).

Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Siska, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., Dubrovský, M., Zalud, Z., 2013: Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends The Journal of Agricultural Science ,151(6), 787-812, doi: 10.1017/S0021859612000767

Elmore, A.J., Mustard, J.F., Manning, S.J., Lobell, D.B., 2000: Quantifying vegetation change in semiarid environments: Precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. Remote Sensing of Environment,73,87–102, doi: 10.1016/S0034-4257(00)00100-0

EPA, 2018. Global greenhouse gas emissions shares and trends. Available at https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data [accessed on 10 August 2020]

FAOSTAT, 2016: Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database, Available online http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC, [accessed on 8 August 2020]

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, doi: 10.1007/BF00386231

Fitzjarrald, D., Sakai, R., 2009. Radiation Measurements at Harvard Forest EMS Tower 1991-2007. Harvard Forest Data Archive: HF102, Available at https://harvardforest1.fas.harvard.edu/exist/apps/datasets/showData.html?id=HF102 [accessed on 10 August 2020]

Garrett, T.J., Fallgatter, C., Shkurko, K., Howlett, D., 2012: Fallspeed measurement and high-resolution multi-angle photography of hydrometeors in freefall. Atmospheric Measurement Techniques, 5, 2625-2633, doi:10.5194/amt-5-2625-2012

Glossary of the American Meteorological Society (AMS Glossary). Available online at http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page [accessed on 17 May 2018]

Hatfield, J.L., K.J. Boote, P. Fay, L. Hahn, C. Izaurralde, B.A. Kimball, T. Mader, J. Morgan, D. Ort, W. Polley, A. Thomson, and D. Wolfe. 2008: Agriculture. In The eff ects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity in the United States. U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Res., Washington, DC., 362 pp.

Hoyningen-Huene, J. v., 1980: Mikrometeorologische Untersuchungen zur Evapotranspiration von bewässerten Pflanzenbeständen. Ber Inst Meteorol Klimatol Univ Hannover Nr. 19, 1-168.

Huglin, P., 1978: Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques de la vigne. Compíes Rendus de YAcadémie d'Agriculture, France, 1117-1126.

International Cloud Atlas, World Meteorological Organization (WMO), 2018: Available online: https://cloudatlas.wmo.int [accessed on 15 May 2018]

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp., ISBN 978 0521 88010-7

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In 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 (Eds.) Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. In Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (Eds.) Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jaćimović, G., 2012: Optimiranje mineralne ishrane pšenice u zavisnosti od vremenskih uslova godine. Doktorska disertacija, Unverzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, 164 str.

Kersebaum, K.C., Nendel, C., 2014: Site-specific impacts of climate change on wheat production across regions of Germany using different CO2 response functions. European Journal of Agronomy, 52, 22-32.

Kotlarski S., Truhetz H., 2017: Regionale Klimaprojektionen, In Kunstmann H., Früh B. (Eds.), Regionale Klimamodellierung I (Grundlagen), promet, Deutscher Wetterdienst (DWD).

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15, 259-263, doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

Lalic, B., Eitzinger, J., Mihailovic, D.T., Thaler, S., Jancic, M., 2012: Climate change impacts on winter wheat yield change – which climatic parameters are crucial in Pannonian lowland? The Journal of Agricultural Science, 151(6) 757-774, doi: 10.1017/S0021859612000640

Lalic, B., Janković, D., Ninkov, M., 2013. Assessment of climate change impact on downy mildew appearance in Serbia using ECHAM5 climate model outputs. In Proceedings from Siska, B., Skvarenina, J. (Eds.) Environmental changes and adaptation strategies, Skalica, Slovakia, 9th – 11th September 2013, p. 160-164.

Lalic, B., Marcic,M., Firanj Sremac, A., Eitzinger, J., Koci, I., Petric, T., Ljubojevic, M., Jezerkic, B., 2020: Landscape phenology modeling and Decision Support in Serbia. In Mirschel, W., Terleev, V.V., Wenkel, K.O. (Eds.), Landscape Modelling and Decision Support, Springer International Publishing, 567-595, doi: 10.1007/978-3-030-37421-1.

Leeuwen, W., Orr, B. J., Marsh, S. E., Herrmann, S. M., 2006: Multisensor NDVI data continuity: uncertainties and implications for vegetation monitoring applications, Remote Sensing of Environment, 100, 67–81, doi: 10.1016/j.rse.2005.10.002

Lemon, E. R. 1963 after Shinn, J.H. and Lemon, E.R. 1963: In Evans, L.T. (Ed.). Environmental Control of Plant Growth, Symposium Proceedings, Canberra

Liou, K.N., 2002: An Introduction to Atmospheric Radiation, 2nd Ed., Academic Press, London, UK, 599 pp., ISBN 0-12-451451-0

Lobell, D.B., Field, C.B., 2007: Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. Environmental Research Letters, 2 014002, doi: 10.1088/1748-9326/2/1/014002

Luedeling, E., Zhang, M., Luedeling, V., Girvetz, H., 2009: Sensitivity of winter chill models for fruit and nut trees to climatic changes expected in California's Central Valley. Agriculture Ecosystems and Environment, 133, 23-31, doi: 10.1016/j.agee.2009.04.016.

Luo, Q., 2011: Temperature thresholds and crop production: a review. Climatic Change, 109, 583-598, doi: 10.1007/s10584-011-0028-6

MacHardy, W.E., 1996: Apple Scab, Biology, Epidemiology, and Management. APS Press, St. Paul, Minn, USA, 545 pp., ISBN 0890542066

McMaster, G.S., Wilhelm, W.W., 1997: Growing Degree-Days One Equation, Two Interpretations. Agricurtular and Forest Meterology, 87, 291-300, doi: 10.1016/S0168-1923(97)00027-0

Meier, U. (Ed.), 1997: BBCH-Monograph. Growth stages of plants. Entwicklungsstadien von Pflanzen. Estadios de las plantas. Stades dedéveloppement des plantes. Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, Wien, 622 p.

Metzger, M.J., Bunce, R.G.H., Jongman, R.H.G., Mücher, C.A., Watkins, J.W., 2005: A climatic stratification of the environment of Europe. Global Ecology and Biogeography, 14, 549–563, doi: 10.1111/j.1466-822X.2005.00190.x

Mihailovic, D., 1988: Basics of meteorological observations and data processing, Faculty of Agriculture. Institute of Field and Vegetable Crops, Novi Sad, p. 217 (in Serbian).

Mohanty, B.P., Cosh, M.H., Lakshmi, V., Montzka, C., 2017: Soil Moisture Remote Sensing: State-of-the-Science, Vadose Zone Journal, 16, 1-9, doi: 10.2136/vzj2016.10.0105

Monteith, J.L., 1977: Climate and Efficiency of Crop Production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society London B, 281, 277-294, doi: 10.1098/rstb.1977.0140

Munger, S.C. and Wofsy, J.W., 2017: Canopy-atmosphere exchange of Carbon, Water and Energy at Harvard Forest EMS tower since 1991. Harvard Forest data archive: HF004. Available online https://harvardforest1.fas.harvard.edu/exist/ apps/datasets/ showData.html?id=HF004, [accessed on 28 May 2018]

Munger, S.C. and Wofsy, J.W., 2017: Canopy-atmosphere exchange of Carbon, Water and Energy at Harvard Forest EMS tower since 1991. Harvard Forest data archive: HF004. Available online https://harvardforest1.fas.harvard.edu/exist/apps/datasets/ showData.html?id=HF004, [accessed on 28 May 2018]

Munger, W., Hadley, J., 2018. Microclimate at Harvard Forest HEM, LPH and EMS Towers since 2005. Harvard Forest Data Archive: HF206. Available online https://harvardforest1.fas.harvard.edu/exist/apps/datasets/showData.html?id=HF206 [accessed on 29 May 2020]

Nejedlik, P., Orlandini, S. (Eds.), 2008. Survey of agrometeorological practices and applications in Europe regarding climate change impacts, COST 734 report, Impact of climate change and variability on European agriculture - CLIVAGRI, Florence, Italy, 320 pp.

Newton, A.C.,1989: Measuring the sterol content of barley leaves infected with powdery mildew as a means of assessing partial resistance to Erysiphe graminis f.sp. hordei. Plant Pathology, 38(4), 534-540, doi: 10.1111/j.1365-3059.1989.tb01448.x

Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvag, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., Micale, F., 2011: Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. European Journal of Agronomy,.43(2), 96-112, doi: 10.1016/j.eja.2010.11.003

Orlandini, S., Nejedlik, P., Eitzinger, J., Alexandrov, V., Toulios, L., Calanca, P., Trnka, M., Olesen, J. E., 2008: Impacts of climate change and variability on European agriculture: results of inventory analysis in COST 734 countries. Annals of the New York Academy of Sciences, 1146, 338–353, doi: 10.1196/annals.1446.013C.

Penning de Vries, F.W.T., Jansen, D.M., ten Berge, H.F.M., Bakema, A., 1989: Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. PUDOC, Wageningen. ISBN 90-220-1000-7. Available online: http://edepot.wur.nl/108856, [accessed on 7 August 2020]

Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Vina, A., Hayes, M, Svoboda, M.D., 2002: Drought Monitoring with NDVI-Based Standardized Vegetation Index, Photogrammetric engineering and remote sensing, 68(1), 71-76.

Pfister, C., Brazdil, R., Glaser, R., 1999: Climatic Variability in Sixteenth-Century Europe and Its Social Dimension, Springer, doi: 10.1007/978-94-015-9259-8.

Porter, J.R. and Gawith, M., 1999: Temperatures and the growth and development of wheat: a review. European Jurnal of Agronomy, 10, 23–36, doi: 10.1016/S1161-0301(98)00047-1

Richardson, E.A., Seeley, S.D., Walker, D.R., 1974: A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. HortScience, 9(4), 331-332.

Rötter, R.P., Appiah, M., Fichtler, E., Kersebaum, K.C., Trnka, M., Hoffmann, M.P., 2018: Linking modelling and experimentation to better capture crop impacts of agroclimatic extremes - a review. Field Crops Research 221, 152-156, doi: 10.1016/j.fcr.2018.02.023.

Scheffer, F., Schachtschabel, P., 1982: Lehrbuch der Bodenkunde, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, ISBN 13: 9783432847719.

Schnelle, F. (ed), 1963: Frostschutz im Pflanzenbau, vol 1: Die meteorologischen und biologischen Grundlagen der Frostschadensverhütung. Bayerischer Landwirtschaftsverlag, München.

Sentić, I., 2019: Uticaj fizičko-geografskih faktora na planiranje i pejzažno uređenje infrastrukturnog koridora - autoputa Beograd-Novi Sad. Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, str. 121.

Snyder, R.L., Melo-Abreu, J.P., 2005: Frost protection: fundamentals, practice and economics. Rome: FAO, Available online http://www.fao.org/3/y7223e/y7223e00. htm#Contents [accessed on 15 April 2019]

Thaler, S., Eitzinger, J., Trnka, M., Dubrovsky, M., 2012: Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. Journal of Agricultural Science, 150(5), 537-555, doi: 10.1017/S0021859612000093

Thompson, R.D., 1998: Atmospheric Processes and Systems. Routlige, 11 New Fetter Lane, London, 194 pp., ISBN 978-0415171465.

Walter, H., Lieth, H., 1967. Klimadiagram-Weltatlas, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.

White, J.W., Hoogenboom, G., Kimball, B.A., Wall, G.W., 2011: Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. Field Crops Research 124, 357–368, doi: 10.1016/j.fcr.2011.07.001

Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowe, C.M., 1985: Statistics for the evaluation of model performance. Journal of Geophysical Research, 90(C5), 8995–9005, doi: 10.1029/JC090iC05p08995

WMO 1992: International Meteorological Vocabulary, 2nd Ed., Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, 636 pp., ISBN 92-63-02182-1.

WMO, 2008: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organisation, WMO-No. 8, ISBN 978-92-63-10008-5, Available online http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-474-WMO-Guide.pdf [accessed on 10 August 2020]

WMO, 2010: Guidelines on early warning systems and application of nowcasting and warning operations, World Meteorological Organisation, Available online https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9456, [accessed on 8 August 2020]

WMO, 2011: WMO standards and best practices: presentation: World Meteorological Organisation. Available online https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/ Meetings/GCW-IM1/Doc7.1_BestPractices.pdf [accessed on 11 August 2020]

WMO, 2016: Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events, Task Team on Definitions of Extreme Weather and Climate Events (TT-DEWCE), World Meteorological Organisation, 62 pp., Available online https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace2/documents/DraftversionoftheGuidelinesontheDefinitionandMonitoringofExtremeWeatherandClimateEvents.pdf [accessed on 7 August 2020]

Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974: A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research, 14, 415-421 and Eucarpia Bulletin, 7, 49-52, doi: 10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x

Dodatna literatura

Glava 1

Bierhuizen, J.F., Slatyer, R.O., 1965: Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO2 in determining transpiration–photosynthesis relationships of cotton leaves. Agricultural Meteorology, 2, 259–270, doi: 10.1016/0002-1571(65)90012-9.

Farquhar, G.D., von Caemmerer, S. and Berry, J.A., 1980: A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 species. Planta, 149, 78–90, doi: 10.1007/BF00386231.

Grantz, D.A., Gunn, S., Vu, H.-B., 2006: O_3 impacts on plant development: a meta-analysis of root/shoot allocation and growth. Plant Cell Environment, 29, 1193–1209, doi:10.1111/j.1365-3040.2006.01521.x.

Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., Prather, M. 2007: Historical overview of climate change. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 95-122, ISBN 978-0-521-88009-1.

NOAA, 2018: Earth system research laboratory (ESRL), Global Monitoring Division. Trends in atmospheric carbon dioxide. Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/ [accessed on 28 May 2018].

Salehi, A., Fallah, S., Abasi Sourki, 2017: A. Organic and inorganic fertilizer on soil CO_2 flux, microbial biomass and growth of Nigella sativa L. International Agrophysics, 31, 103–116, doi: 10.1515/intag-2016-0032.

Unsworth, M.H., Hogsett, W.E., 1996: Combined effects of changing CO2 temperature, UV-B radiation and O3 on crop growth. In Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes, FAO, Rome, Italy. Available at http://www.fao.org/3/w5183e0a.htm#8.%20combined%20effects%20of%20changing%20co2%20temperature,%20uv%20b%20radiation%20and%20o3%20on%20crop%20g [accessed on 14 May 2020]

van de Geijn, S.C., and Goudriaan, J., 1996: The effects of elevated CO2 and temperature change on transpiration and crop water use. In Bazzaz, F. and Sombroek, W. (Eds.) Global Climate Change and Agricultural Production: Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological Soil and Plant Physiological, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, John Wiley & Sons, 101-121, ISBN 0-471-96927-3

Ward, J.K., Tissue, D.T., Thomas, R.B., Strain, B.R., 1999: Comparative responses of model C_3 and C_4 plants to drought in low and elevated CO_2. Global Change Biology, 5, 857-867, doi: 10.1046/j.1365-2486.1999.00270.x.

Glava 2

Campillo, C., Fortes, R., del Henar Prieto, M., 2012: Solar Radiation Effect on Crop Production. In Babatunde, E.B. (Ed.) Solar Radiation, ISBN: 978-953-51-0384-4.

Haverkort, A.J., 2007: Chapter 17 - Potato crop response to radiation and daylength. In Vreugdenhil, D., Bradshaw, J., Gebhardt, C., Govers, F., Mackerron, K.L.D., Taylor, M.A., Ross, H.A. (Eds.) Potato Biology and Biotechnology, Elsevier Science B.V., 353-365, ISBN 9780444510181, doi: 10.1016/B978-044451018-1/50059-2.

Gurjar, G.N., Swami, S., Meenaand, N.K., Lyngdoh, E.A.S., 2017: Effect of Solar Radiation in Crop Production. In Arora, S., Swami, S., Bhan, S., (Eds.) Natural Resource Management for Climate Smart Sustainable Agriculture, Soil Conservation Society of India, New Delhi, 103-115

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. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 118, 1–10, doi:10.1002/jgrd.50626

Liu, T., Song, F., Liu, S., Zhu, X., 2011: Canopy structure, light interception, and photosynthetic characteristics under different narrow-wide planting patterns in maize at silking stage Spanish Journal of Agricultural Research, 9(4), 1249-1261, doi: 10.5424/sjar/20110904-050-11

Moore, K.E., Fitzjarrald, D.R., Sakai, R.K., Goulden, M.L., Munger, J.W., Wofsy, S.C., 1996: Sesonal variation in radiative and turbulent exchange at a deciduous forest in Central Massachusetts, Journal of Applied Meteorology, 35, 122-134, doi: 10.1175/1520-0450(1996)035<0122:SVIRAT>2.0.CO;2

San-oh, Y., Oclarit, R.P., Ookawa, T., Motobayashi, T., Hirasawa, T., 2006: Effects of Planting Pattern on the Interception of Solar Radiation by the Canopy and the Light Extinction Coefficient of the Canopy in Rice Plants Direct-sown in a Submerged Paddy Field. Plant Production Science, 9(3), 334-342, doi: 10.1626/pps.9.334

Szeicz, G., 1974: Solar Radiation for Plant Growth. Journal of Applied Ecology, 11(2), 617-636, doi: 10.2307/2402214

Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Sinoquet, H., 1993: Crop Structure and Light Microclimate, INRA, Paris, 518 p., ISBN 2 7380 0448 2

Glava 3

Abrol, Y.P., Ingram, K.T., 1996: Effects of higher day and night temperatures on growth and yields of some crop plants. In Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes, FAO, Rome, Italy. Available at http://www.fao.org/3/w5183e08.htm#6.%20effects%20of%20higher%20day%20and%20night%20temperatures%20on%20growth%20and%20yields%20of%20some%20cro [accessed on 14 May 2020]

Commuri, P.D. and Jones, R.D., 2001: High temperatures during endosperm cell division in maize: a genotypic comparison under in vitro and field conditions. Crop Science, 41,1122–1130, doi: 10.2135/cropsci2001.4141122x

Dalmago, G.A., Bergamaschi, H., Comiran, F., Bianchi, C.A.M., Bergonci, J.I., Heckler, B.M.M., 2004: Soil temperature in maize crops as function of soil tillage systems. In Proceedings of the 13th International Soil Conservation Organisation Conference, Brisbane, Australia, 4–8 July 2004.

Ferris, R., Ellis, R.H., Wheeler, T.R., Hadley, P., 1998: Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat. Annals of Botany, 82, 631–639, doi: 10.1006/anbo.1998.0740

Hatfield, J.H. and Prueger, J.H., 2015: Temperature extremes: Effect on plant growth and development. Weather and Climate Extremes, 10, 4–10, doi: 10.1016/j.wace.2015.08.001

Iizumi, T., Furuya, J., Shen, Z., Kim., W., Okada, M., Fujimori, S., Hasegawa, T., Nishimori, M., 2017: Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes. Scientific Reports, 7, 7800, doi: 10.1038/s41598-017-08214-4

Onwuka, B, Mang, B., 2018: Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth. Advances in Plants & Agricultural Research, 8(1), 34-37, doi: 10.15406/apar.2018.08.00288

Ritchie, J.T., Nesmith, D.S., 2015: Temperature and Crop Development. In Hanks, J., Ritchie, J.T. (Eds.) Modeling Plant and Soil Systems, 5-29, doi: 10.2134/agronmonogr31.c2

Sabri, N., Zakaria, Z., Mohamad, S.E., Jaafar, A.B., Hara, H., 2018: Importance of Soil Temperature for the Growth of Temperate Crops under a Tropical Climate and Functional Role of Soil Microbial Diversity. Microbes and environments, 33(2), 144–150, doi: 10.1264/jsme2.ME17181

Wahid, A., 2007: Physiological implications of metabolites biosynthesis in net assimilation and heat stress tolerance of sugarcane (Saccharum officinarum) sprouts. Journal of Plant Research, 120, 219–228, doi: 10.1007/s10265-006-0040-5

Glava 4

Ford, M., Thorne, G., 1974: Effects of Atmospheric Humidity on Plant Growth. Annals of Botany, 38(155), new series, 441-452. Retrieved August 14, 2020, from www.jstor.org/stable/42758631

Gillette, H.P., 1950: A creeping drought under way. Water and Sewage Works, 104-105.

Gisleröd, H.R., Selmer-Olsen, A.R., Mortensen, L.M., 1987: The effect of air humidity on nutrient uptake of some greenhouse plants. Plant and Soil 102, 193–196, doi: 10.1007/BF02370702

Kuwagata, T., Ishikawa-Sakurai, J., Hayashi, H., Nagasuga, K., Fukushi, K., Ahamed, A., Takasugi, K., Katsuhara, M., Murai-Hatano, M., 2012: Influence of Low Air Humidity and Low Root Temperature on Water Uptake, Growth and Aquaporin Expression in Rice Plants, Plant and Cell Physiology, 53(8), 1418–1431, doi: 10.1093/pcp/pcs087

Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 2008: Principles of Environmental Physics. 3rd Ed. AP, Amsterdam, 440 pp., eBook ISBN: 9780080924793

Mortensen, L.M., 1986: Effect of relative humidity on growth and flowering of some greenhouse plants, Scientia Horticulturae, 29(4), 301-307, doi: 10.1016/0304-4238(86)90013-0.

Mortensen, L.M., Gislerød, H.R., 1990: Effects of air humidity and supplementary lighting on foliage plants, Scientia Horticulturae, 44(3–4), 301-308, doi: 10.1016/0304-4238(90)90130-7.

Murray, F.W.; 1967. On the computation of saturation vapour pressure. J. Appl. Meteorol. 6, 203-204.

Van Lanen, H.A.J., 2006: Drought propagation through the hydrological cycle. In Demuth, S., Gustard,A., Planos, E. , Scatena, F., Servat, E. (Eds.) Climate Variability and Change Hydrological Impacts, vol. 308, IAHS-AISH Publication, IAHS Press, Wallingford, UK, 122-127

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M., Baillon; M., 2010: Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. Hydrology and Earth System Science, 14(3), 459-478, doi: 10.5194/hess-14-459-2010

Wilhite, D.A., Glantz, M.H., 1985: Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. Water International, 10(3), 111–120, doi: xxx

Wilhite, D.A.; 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. In: Drought: A Global Assessment, Vol. I, D.A. Wilhite Ed., Drought Mitigation Center Faculty Publications. 69.

Glava 5

Evans, T.E., 1996: The effects of changes in the world hydrological cycle on availability of water resources. In Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes, FAO, Rome, Italy. Available at http://www.fao.org/3/w5183e04.htm#2.%20the%20effects%20of%20changes%20in%20the%20world%20hydrological%20cycle%20on%20availability%20of%20wat [accessed on 14 August 2020]

Faghri, A., Zhang, Y., 2006: Transport Phenomena in Multiphase Systems, Elsevier Inc., 1030 pp., ISBN: 978-0-12-370610-2

Hill, T.C.J., Moffett, B.F., DeMott, P.J., Georgakopoulos, D.G., Stump, W.L., Franc, G.F., 2014: Measurement of Ice Nucleation-Active Bacteria on Plants and in Precipitation by Quantitative PCR. Applied and Environmental Microbiology, 80(4), 1256-1267, doi: 10.1128/AEM.02967-13

McDonald, J.E., 1962: Homogeneous nucleation of vapor condensation. I. Thermodynamic Aspects. American Journal of Physics, 30, 870, doi: 10.1119/1.1941841

Parton, W., Morgan, J., Smith, D., Del Grosso, S., Prihodko, L., LeCain, D., Kelly, R. Lutz, S., 2012: Impact of precipitation dynamics on net ecosystem productivity. Global Change Biology, 18, 915-927. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02611.x

Welburn, A., 1988: Air pollution and acid rain: the biological impact. Longman Scientific & Technical, Harlow, UK, 274 pp. ISBN: 0582014646

Wood, R., 2012: Stratocumulus Clouds. Montly Weather Review, 140, 2373-2423, doi: 10.1175/MWR-D-11-00121.1

Yan, H., Liang, C., Li, Z., Liu, Z., Miao, B., He, C., Sheng, L., 2015: Impact of Precipitation Patterns on Biomass and Species Richness of Annuals in a Dry Steppe. PLoS ONE 10(4): e0125300, doi: 10.1371/journal.pone.0125300

Zeppel, M.J.B., Wilks, J.V., Lewis, J.D., 2014: Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants, Biogeosciences, 11, 3083–3093, doi: 10.5194/bg-11-3083-2014

Glava 6

Burgess, A.J., Gibbs, J.A., Murchie, E.H., 2019: A canopy conundrum: can wind-induced movement help to increase crop productivity by relieving photosynthetic limitations? Journal of Experimental Botany, 70, 9, 2371–2380, doi: 10.1093/jxb/ery424

Caborn, J.M., 1957: Shelterbelts and Microclimate, Forestry Commission Bulletin No. 29

Cleugh, H.A., 1998: Effects of the wind brakes on airflow, microclimates and crop yields. Agroforestry Systems, 41, 55-84, doi: 10.1023/A:1006019805109.

Cleugh H. A., Hughes D.E., 2002: Impact of shelter on crop microclimates: a synthesis of results from wind tunnel and field experiments. Australian Journal of Experimental Agriculture 42, 679-701, doi: 10.1071/EA02005

Doaré, O., Moulia, B., de Langre, E., 2004: Effect of Plant Interaction on Wind-Induced Crop Motion. Journal of Biomechanical Engineering, 126, 146-151, doi: 10.1115/1.1688773.

de Langre E. 2008. Effects of Wind on Plants. Annual Review of Fluid Mechanics 40, 141–168, doi: 10.1146/annurev.fluid.40.111406.102135

Finnigan, J., 2000: Turbulence in Plant Canopies. Annual Review of Fluid Mechanics 32, 519– 571, doi: 10.1146/annurev.fluid.32.1.519

Grace, J., 1988: Pant response to wind. Agriculture, Ecosystems and Environment, 22–23, 71–88, doi: 10.1016/0167-8809(88)90008-4

NOAA 2018. How hurricanes form? National Ocean Service website. Available online: https://oceanservice.noaa.gov/facts/how-hurricanes-form.html [accessed on 28 May 2018]

Onoda, Y., Anten, N.P.R., 2011: Challenges to understand plant responses to wind. Plant Signaling & Behavior, 6(7), 1057–1059, doi:10.4161/psb.6.7.15635

The Climate System, EESC 2100 Spring 2007. Available online: http://eesc.columbia.edu/courses/ees/climate/lectures/atm_dyn.html [accessed on 03 June 2018]

Todey, D., Taylor, E., Shelterbelts, Agronomy, 541. Available online: http://agron-www.agron.iastate.edu/courses/Agron541/classes/541/lesson05a/541L5.pdf [accessed on 03 June 2018]

Glava 7

Gobin, A., Kersebaum, K.C., Eitzinger, J., Trnka, M., Hlavinka, P., Takac, J., Kroes, J., Ventrella, D., Dalla Marta, A., Deelstra, J., Lalic, B., Nejedlik, P., Orlandini, S., Peltonen-Sainio, P., Rajala, A., Saue, T., Saylan, L., Stricevic, R., Vucetic, V., Zoumides, C., 2017: Variability in the Water Footprint of Arable Crop Production across European Regions. Water, 9(2), 93, doi:10.3390/w9020093.

Hlavinka, P., Trnka, M., Balek, J., Semeradova, D., Hayes, M., Svoboda, M., Eitzinger, J., Mozny, M., Fischer, M., Hunt, E., Zalud, Z., 2011: Development and evaluation of the SoilClim model for water balance and soil climate estimates. Agricultural Water Management, 98(8), 1249−1261, doi: 10.1016/j.agwat.2011.03.011

Kroes, J.G., Wesseling, J.G. and J.C. Van Dam, 2000: Integrated modelling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2.0 an overview of theory and an application. Hydrological Processes, 14, 1993-2002, doi: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12%3C1993::AID-HYP50%3E3.0.CO;2-%23

Marshall, T.J., Holmes, J.W., Rose, C.W., 1996: Soil Physics. Cambridge Univ. Press, 472 pp., ISBN: 9780521457668

Moene, A.F., Van Dam, J.C., 2014: Transport in the Atmosphere-Vegetation-Soil Continuum. Cambridge Univ. Press, 446 pp., ISBN: 9780521195683

Rose, C.W., 2004. An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds. Cambridge Univ. Press, 456 pp., ISBN: 9780521829946

Steduto, P., Hsiao, C., Fereres, E., Raes, D., 2012: Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, 503 pp., ISBN: 978-92-5-107274-5.

Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes, 2008: Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. Vadose Zone Journal, 7, 640-653, doi: 10.2136/vzj2007.0060

Thaler, S., Eitzinger, J., Trnka, M, Dubrovsky, M., 2012: Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. Journal of Agricultural Science, Cambridge. doi: 10.1017/S0021859612000093.

Xue, J., Ren, L., 2016: Evaluation of crop water productivity under sprinkler irrigation regime using a distributed agro-hydrological model in an irrigation district of China. Agricultural Water Management, 178, 350–365, doi: 10.1016/j.agwat.2016.10.003.

Glava 8

Anderson, J.L., Richardson, E.A., Kesner, C.D., 1986: Validation of chill unit and flower bud phenology models for 'Montmorency' sour cherry. Acta Horticulturae, 184, 71-78, doi: 10.17660/ActaHortic.1986.184.7

Bünning, E., 1953. Entwicklungs- und Bewegungsphysiologie der Pflanzen. 3.Aufl. Springer, Berlin, 1953.

Chang, Jen-Hu, 1968: Climate and Agriculture – An Ecological Survey. Aldine Transaction, 304 pp., ISBN 978-0-202-36249-6

Chitu, E., Paltineanu, C., 2020: Timing of phenological stages for apple and pear trees under climate change in a temperate-continental climate. International Journal of Biometeorology, 64, 1263–1271, doi: 10.1007/s00484-020-01903-2

Darbyshire, R., Farrera, I., Martinez-Lüscher, J., Berenhauser Leite, G., Mathieu, V., El Yaacoubi, A., Legave, J.-M., 2017: A global evaluation of apple flowering phenology models for climate adaptation. Agricultural and Forest Meteorology, 240–241, 67-77, doi:10.1016/j.agrformet.2017.03.021.

Drepper, B., Gobin, A., Remy, S., Van Orshoven, J., 2020: Comparing Apple and Pear Phenology and Model Performance: What Seven Decades of Observations Reveal. Agronomy, 10, 73, doi: 10.3390/agronomy10010073

Grigg, D., 1984: An Introduction to Agricultural Geography. Routledge, 240 pp., ISBN: 0-203-41927-8.

Hodges, T., 1990: Predicting crop phenology. CRC press, 248 pp., ISBN 9780849367458

Larcher, W., 2003: Physiological Plant Ecology - Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups. Springer, 514 pp., ISBN 978-3-540-43516-7.

Leolini, L., Costafreda-Aumedes, S., A. Santos, J., Menz, C., Fraga, H., Molitor, D., Merante, P., Junk, J., Kartschall, T., Destrac-Irvine, A., van Leeuwen, C., C. Malheiro, A., Eiras-Dias, J., Silvestre, J., Dibari, C., Bindi, M., Moriondo, M. Phenological Model Intercomparison for Estimating Grapevine Budbreak Date (Vitis vinifera L.) in Europe. Applied Science, 10, 3800, doi: 10.3390/app10113800

Meier, U., 2003. Phenological growth stages, 269–283. In Schwartz, M.D. (Ed.) Phenology: An integrative science. Kluver Academic Publishers, Dordrecht / Boston /London, 564, pp., ISBN 978-1-4020-1580-9

Meier, U., Bleiholder, H., Buhr, L., Feller, C., Hack, H., Heß, M., Lancashire, P.D., Schnock, U., Stauß, R., van den Boom, T., Weber, E., Zwerger, P., 2009: The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications. Journal für Kulturpflanzen, 61 (2). s. 41–52, doi: 10.5073/JfK.2009.02.01

Schwartz, M.D. (Ed.) 2003: Phenology: An Integrative Environmental Science. Springer, 564 pp., ISBN: 978-1-4020-1580-9

Glava 9

Christner, B.C., Cai, C., Morris, C.E., McCarter, K.S., Foreman, C.M., Skidmore, M.L., Montross, S.N., Sands, D.C., 2008: Geographic, seasonal, and precipitation chemistry influence on the abundance and activity of biological ice nucleators in rain and snow. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(48), 18854-18859, doi: 10.1073/pnas.0809816105

Edwards, D.C., McKee, T.B., 1997: Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report Number 97-2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins

Garen, D.C., 1993: Revised surface-water supply index for Western United States. Journal of Water Resources Planning and Management, 119, 437–454, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:4(437)

Guttman, N.B., 1998: Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. Journal of the American Water Resources Association, 34, 113–121, doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x

Hatfield, J.L., Prueger, J.H., 2015: Temperature extremes: Effect on plant growth and development. Weather and Climate Extremes, 10, 4–10, doi: 10.1016/j.wace.2015.08.001

Kogan, F.N., 1995: Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research., 5(11), 91-95, doi: 10.1016/0273-1177(95)00079-T

Levitt, J., 1980: Responses of Plant to Environmental Stress: Water, Radiation, Salt and Other Stresses. Academic Press, New York, 365 pp., ISBN 0124455018

Shafer, B. A. and Dezman, L.E., 1982: Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. Proceedings of the Western Snow Conference, Reno, Nevada, 164-175.

Watts, N., Amann, M., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Bouley, T., Boykoff, M., 2017: The Lancet Countdown on health and climate change: From 25 years of inaction to a global transformation for public health. Lancet, 391(10120), 581-630, doi: 10.1016/S0140-6736(17)32464-9

WMO, 2012a: Guide to Agricultural Meteorological Practices (GAMP), World Meteorological Organisation, WMO-No. 134, Geneva, 799 pp., Available online https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/documents/WMO_No134_en.pdf, [accessed on 15 Jun 2020]

WMO, 2012b: Standardized Precipitation Index User Guide, World Meteorological Organisation, WMO-No. 1090, Geneva, Available online https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7768 [accessed on 16 Jun 2020]

Woodruff N. P., Siddoway F. H., 1965: A Wind Erosion Equation. Soil Science Society of America Journal, 29(5), 602-608, doi: 10.2136/sssaj1965.03615995002900050035x

Glava 10

Allen, B., Maréchal, A., 2017: Agriculture GHG emissions: determining the potential contribution to the Effort Sharing Regulation. In: Report prepared for Transport and Environment. Institute for European Environmental Policy, London, 42 pp., Available online http://minisites.ieep.eu/assets/2263/Agriculture_GHG_emissions_ determining_the_potential_contribution_to_the_Effort_Sharing_Regulation._IEEP_2017_.pdf, [accessed on 8 August 2020]

Asfaw, S., Lipper, L., 2016: Managing climate risk using climate-smart agriculture – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Available online http://www.fao.org/3/a-i5402e.pdf, [accessed on 8 August 2020]

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp

FAO, 2013: Climate-Smart Agriculture: Sourcebook. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, Available online http://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/en/, [accessed on 8 August 2020]

Gilard, O., 2016: Hazards, Vulnerability and Risk. In: Torquebiau E. (eds) Climate Change and Agriculture Worldwide. Springer, Dordrecht, 19-29, doi: 10.1007/978-94-017-7462-8_2

Sivakumar, M.V.K., Motha, R.P. (eds), 2007: Managing Weather and Climate Risks in Agriculture. Springer, Berlin, Heidelberg, doi: 10.1007/978-3-540-72746-0, ISBN 978-3-540-72744-6

Glava 11

Abrahamsen, P., Hansen, S., 2000: Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model. Environmental Modelling & Software, 15(3), 313-330, doi: 10.1016/S1364-8152(00)00003-7

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998: Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I.Model development. Journal of American Water Resource Association, 34(1),73-89, doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x

Asseng, S., van Keulen, H., Stol, W., 2000: Performance and application of the APSIM Nwheat model in the Netherlands. European Journal of Agronomy, 12, 37- 54, doi: 10.1016/s1161-0301(99)00044-1

Bellocchi, G., Confalonieri, R., Donatelli, M., 2006: Crop modelling and valiation: Intergration of Irene-DLL in the warm environment. Italian Journal of Agrometeorology 3.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debake, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003: An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy,18, 309-332, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00110-7

Cabelguenne, M., Debaeke, P., Bouniols, A., 1999: EPIC phase, a version of the EPIC model simulating the effects of water and nitrogen stress on biomass and yield, taking account of developmental stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soybean and winter wheat. Agricultural Systems, 60, 175-196, doi: 10.1016/S0308-521X(99)00027-X

Connor, D.J., Loomis, R.S., Cassman, K.G, 2011: Crop Ecology - Productivity and Management in Agricultural Systems. Cambridge Univ. Press, 576 pp., ISBN: 9780521744034

Donatelli, M., Magarey, R.D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J.P.M., Savary, S., 2017: Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. Agricultural Systems 155, 213–224, doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.019

Gijsman, A.J., Jagtap, S.S., Jones, J.W., 2002: Wadding through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models. European Journal of Agronomy, 18, 77–106, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00098-9

Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Brooking, I.R., Francis, G.S., 1998: Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. European Journal of Agronomy, 8, 161-179, doi: 10.1016/S1161-0301(98)00020-3

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003: The DSSAT cropping system model. European Journal Of Agronomy, 18 (3-4), 235-265, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal Of Agronomy, 18, 267-288, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00108-9

Kersebaum, K.C., Boote, K.J., Jorgenson, J.S., Nendel, C., Bindi, M., Frühauf, C., Gaiser, T., Hoogenboom, G., Kollas, C., Olesen, J.E., Rötter, R.P., Ruget, F., Thorburn, P.J., Trnka, M., Wegehenkel, M., 2015: Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models. Environmental Modeling & Software, 72, 402-417, doi: 10.1016/j.envsoft.2015.05.009

Kersebaum, K.Ch., Hecker, J.-M., Mirschel, W., Wegehenkel, M. (ed.), 2007. Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil-Crop Systems. Springer, ISBN:978-1-4020-4478-6.

Kersebaum, K.Ch., 2007: Modelling nitrogen dynamics in soil–crop systems with HERMES. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 77, 39-52. doi: 10.1007/s10705-006-9044-8

Lalić, B., Eitzinger, J., Thaler, S., Vučetić, V., Nejedlik, P., Eckersten, H., Jaćimović, G., Nikolić-Djorić, E., 2014: Can Agrometeorological Indices of Adverse Weather Conditions Help to Improve Yield Prediction by Crop Models?, Atmosphere, 5, 1020-1041; doi:10.3390/atmos5041020

Martre, P., Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Zyskowski, R.F., Porter, J.R., Triboi, E., 2006: Modelling protein content and composition in relation to crop nitrogen dynamics for wheat. European Journal of Agronomy, 25, 138-154, doi: 10.1016/j.eja.2006.04.007

Matthews, K.B., Sibbald, A.R., Craw, S., 1999: Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: integrating geographic information system and environmental models with search and optimisation algorithms. Computers and Electronics in Agriculture, 23(1), 9-26, doi: 10.1016/S0168-1699(99)00005-8

Matthews, R.B., 2006: The People and Landscape Model (PALM): towards full integration of human decision-making and biophysical simulation models. Ecological Modelling, 194(4), 329-343, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.10.032

Nendel, C. M., Berg, K., Kersebaum, K.Ch., Mirschel, W., Specka, X., Wegehenkel, M., Wenkel, K.O., Wieland, R., 2011: The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. Ecological Modelling, 222(9), 1614-1625, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.02.018

Oerke, E-C., Gerhards, R., Menz, G., Sikora, R.A., 2010: Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity. Springer, 441 pp., ISBN: 978-90-481-9276-2 doi: 10.1007/978-90-481-9277-9.

Parton, W.J., Hartman, M., Ojima, D., Schimel, D., 1998: DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. Global and Planetary Change, 19, 35-48, doi: 10.1016/S0921-8181(98)00040-X

Rötter, R.P., Appiah, M., Fichtler, E., Kersebaum, K.Ch., Trnka, M., Hoffmann, M.P., 2018: Linking modelling and experimentation to better capture crop impacts of agroclimatic extremes - a review. Field Crops Research, 221, 152-156, doi: 10.1016/j.fcr.2018.02.023

Sadras, V., Calderini, D., 2014: Crop Physiology. Applications for Genetic Improvement and Agronomy, Elsevier, 604 pp., ISBN: 9780124171046.

Stockle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003: CropSyst, a cropping system simulation model. European Journal of Agronomy, 18, 289-307, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00109-0

Supit, I., Hooijer, A.A., van Diepen, C.A. (Eds.), 1994: System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Volume 1: Theory and Algorithms. Joint Research Centre of the European Commission, EUR 15956 EN, Luxembourg.

van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., Goudriaan, J., 2003: On approaches and applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy, 18, 201-234, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00106-5

Willmott, C.J., Matsuura, K., 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research 30: 79–82.

Wu, L., Kersebaum, K.-C., 2008. Modeling water and nitrogen interaction responses and their consequences in crop models. In Ahuja, L.R.,, Reddy, V.R., Saseendran, S.A., Yu, Q. (Eds.) Response of crops to limited water: understanding and modeling water stress effects on plant growth processes. Advances in Agricultural Systems Modeling 1: 215-249, Madison, WI, USA (ASA, CSSA, SSSA).

Yang, J., Greenwood, D.J., Rowell, D.L., Wadsworth, G.A., Burns, I.G., 2000: Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N-ABLE. Agricultural Systems 64, 37-53, doi: 10.1016/S0308-521X(00)00010-X

Glava 12

Behringer, W., 2010: A Cultural History of Climate. Verlag Polity, 280 pp., ISBN 0745645291.

Bryant, C.R., Sarr, M.A., Delusca, K. (Eds) 2016: Agricultural Adaptation to Climate Change. Springer, 234 pp., ISBN 978-3-319-31392-4.

Budyko, M.I., 1948: Evaporation under natural conditions. Leningrad: Gidrometeorizdat

Dinar, A., Mendelsohn, R. (Eds.), 2013: Handbook on Climate Change and Agriculture. Edward Elgar Publishing, 544 pp., ISBN: 978 1 78100 194 3

EEA, 2005: Vulnerability and adaptation to climate change in Europe. European Environmental Agency (EEA) Technical Report No. 7. Copenhagen: EEA.

EEA 2007: Climate change: the cost of inaction and the cost of adaptation. European Environmental Agency (EEA) Technical Report No. 13. Copenhagen: EEA.

Eurostat information on greenhouse gas emissions from agriculture: available online at:http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Agriculture_-_greenhouse_gas_emission_statistics&oldid=273928

Fuhrer, J., 2003: Agroecosystem responses to combinations of elevated CO2, ozone and global climate change. Agriculture, Ecosystems and Environment 97, 1–20, doi: 10.1016/S0167-8809(03)00125-7

Global Yield Gap Atlas. Available at www.yieldgap.org [accessed on 10 August 2020]

Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., Mekonnen M.M., 2009: Water Footprint Manual: State of the Art 2009. Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands. Available at https://waterfootprint.org/media/downloads/WaterFootprintManual2009.pdf [accessed on 10 August 2020]

IEEP, 2017: Agriculture GHG emissions: Determining the potential contribution to the effort sharing regulation. Available at https://ieep.eu/uploads/articles/attachments/6882b42e-9769-43be-bb10-f83d06510b7d/Agriculture_GHG_emissions_determining_the_potential_contribution_to_the_Effort_Sharing_Regulation._IEEP_2017_.pdf?v=63664510042 [accessed on 10 August 2020]

Klik, A., Eitzinger, J., 2010: Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria. Journal of Agricultural Science, Cambridge 148, 529–541, doi: 10.1017/S0021859610000158

Köppen, W., 1900: Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. – Geogr. Zeitschr. 6, 593–611, 657–679.

Lalic, B., Francia, M., Eitzinger, J., Podrascanin, Z., Arsenic, I., 2015: Effectiveness of short-term numerical weather prediction in predicting growing degree days and meteorological conditions for Apple Scab appearance. Meteorological Applications, 23, 50–56, doi: 10.1002/met.1521

Lalic, B., Firanj Sremac, A., Eitzinger, J., Stričević, R., Thaler, S., Maksimović, I., Danicic, M., Perišić, D., Dekić, L., 2018: Seasonal forecasting of green water components and crop yield of summer crops in Serbia and Austria. Journal of Agricultural Science, Cambridge, 156, 658-672, doi: 10.1017/S0021859618000047

Louise, E.B., Lassoie, J.P., Fernandes, E.C.M., 1998: Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems. CRC Press, 411 pp., ISBN 9781566702942.

Maharjan, K.L., Joshi, N.P., 2013: Climate Change, Agriculture and Rural Livelihoods in Developing Countries, Springer, 180 pp., ISBN 978-4-431-54343-5.

Manderscheid, R., Erbs, M., Weigel, H-J., 2014: Interactive effects of free-air CO2 enrichment and drought stress on maize growth. European Journal of Agronomy, 52, 11-21, doi: 10.1016/j.eja.2011.12.007

Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N., Foley, J.A., 2012: Closing yield gaps through nutrient and watermanagement. Nature 490, 254-257. doi: 10.1038/nature11420.

Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Trnka, M., Olesen, J. E., Alanca, P., Eckersten, H., Eitzinger, J., Gobin, A., Kersebaum, K. C., Kozyra, J., Kumar, S., Dalla Marta, A., Micale, F., Schaap, B., Seguin, B., Skjelvag, A.O., Orlandini, S., 2010: Coincidence of variation in yield and climate in Europe. Agriculture, Ecosystems and Environment 139, 483–489, doi: 10.1016/j.agee.2010.09.006

Thornthwaite, C.W., 1948: An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., 38(1), 55–94.

Trnka, M., Olesen, J., Kersebaum, C., Skjelvåg, A., Eitzinger, J., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Iglesias, A., Rötter, R., Orlandini, S., Dubrovský, M., Hlavinka, P., Balek, J., Eckersten, H., Cloppet, E., Calanca, P., Gobin, A., Vučetić, V., Nejedlik, P., Kumar, S., Lalic, B., Mestre, A., Rossi, F., Kozyra, J., Alexandrov, V., Semerádová, D., Žalud, Z., 2011: Agroclimatic conditions in Europe under climate change, Global Change Biology, 17, 7, 2298-2318, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x

Rötter, R.P., Höhn, J., Trnka, M., Fronzek, S., Carter, T.R., Kahiluoto, H., 2013. Modelling shifts in agroclimate and crop cultivar response under climate change. Ecology and Evolution, 3, 4197–4214, doi: 10.1002/ece3.782

Torquebiau, E. (Ed.), 2016: Climate Change and Agriculture Worldwide. Springer, 348 pp., ISBN 978-94-017-7462-8

Trnka, M., Eitzinger, J., Semeradova, D., Hlavinka, P., Balek, J., Dubrovsky, M., Kubu, G., Stepanek, P., Thaler, S., Mozny, M., Zalud, Z., 2011. Expected changes in agroclimatic conditions in Central Europe. Climatic Change, 108(1-2): 261-289, doi: 10.1007/s10584-011-0025-9

Troll, C., 1955: Der jahreszeitliche Ablauf des Naturgeschehens in den verschiedenen Klimagürteln der Erde. Studium Generale 8, 713-733.

Glava 13

Brock, F.V., Richardson, S.J., 2001: Meteorological Measurement Systems, Oxford University Press, 290 pp., ISBN: 9780195134513

Darnhofer, T., 1985: Meteorological elements and their observation. Working paper Nr.14. 1st Revision. Available at http://www.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/58_Working_paper_no_14.pdf [accessed on 10 August 2020]

Doraiswamy, P.C., Pasteris, P.A., Jones, K.C., Motha, R.P., Nejedlik, P., 2000: Techniques for methods of collection, database management and distribution of agrometeorological data. Agricultural and Forest Meteorology, 103, 1–2, 83-97, doi: 10.1016/S0168-1923(00)00120-9.

Drlatief, A., Raihana, H.K., Sabah, P., Syed, S.M., 2017: Experimental Agrometeorology: A Practical Manual, Springer, 135 pp., ISBN 978-3-319-69184-8

Dwevedi, A., Kumar, P., Kumar, P., Kumar, Y., Sharma, Y.K., Kayastha, A.M., 2017: Soil sensors: detailed insight into research updates, significance, and future prospects. In Grumezescu, A.M. (Ed.) New Pesticides and Soil Sensors, Academic Press, 561-594, ISBN 9780128042991, doi: 10.1016/B978-0-12-804299-1.00016-3.

Emeis, S., 2010: Measurement Methods in Atmospheric Sciences - In situ and remote. Borntraeger Science Publishers, 257 pp., ISBN 978-3-443-01066-9

Foken, T., 2017: Micrometeorology. Springer, 308 pp., ISBN 3642254403, 9783642254406

Harrison, G., 2015: Meteorological Measurements and Instrumentation, Wiley, 280 pp., ISBN: 978-1-118-74580-9.

Sivakumar, M.V.K., 2006: Dissemination and communication of agrometeorological information—global perspectives. Meteorological Applications, 13(S1), 21. doi:10.1017/s1350482706002520

Strangeways, I., 2003. Measuring the Natural Environment. Cambridge University Press, 534 pp., ISBN 9781139087254

TDR and FDR/capacitive soil water measurement method. Available at http://www.environmentalbiophysics.org/tdr-versus-capacitance-or-fdr/ [accessed on 10 August 2020]

Glava 14

Asrar, G., Fuch, M., Kanemasu, E.T., Hatfield, J.L., 1984: Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomy Journal, 76, 300-306, doi: 10.2134/agronj1984.00021962007600020029x

Baghdadi, N., Zribi, M., 2016: Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest, Elsevier, 496 pp., ISBN: 9781785481031

Brocca, L., Crow, W.T., Ciabatta, L., Massari, C, de Rosnay, P., Enenkel, M, Hahn, S., Amarnath, G, Camici, S, Tarpanelli, A., Wagner, W., 2017: A review of the applications of ASCAT soil moisture products. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 10, 2285–2306, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2651140

Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., Strachan, I., 2004: Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. Remote Sensing of Environment, 90, 337-352, doi: 10.1016/j.rse.2003.12.013

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002: Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83, 195–213, doi: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2

Kogan, F. N., Gitelson, A., Edige, Z., Spivak, l., Lebed L., 2003: AVHRR-Based Spectral Vegetation Index for Quantitative Assesment of Vegetation State and Productivity: Calibration and Validation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69(8), 899-906, doi: 10.14358/PERS.69.8.899

Krishna, K.R., 2018: Agricultural Drones: A Peaceful Pursuit. Apple Academic Press, 413 pp., ISBN-10: 1771885955

Mulla, D.J., 2013: Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Bio-systems Engineering 114/4, 358-371, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., Stenseth, N.C., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology & Evolution, 20, 503-510, doi: 10.1016/j.tree.2005.05.011

Reed, B.C., Brown, J.F., Zee, D.V., Loveland, T.R., Merchant, J.W., Ohlen, D.O., 1994: Measuring phenological variability from satellite imagery. Journal of Vegetation Science, 5(5), 703-714, doi: 10.2307/3235884

Thaler, S., Eitzinger, J., Trnka, M., Možný, M., Hahn, S., Wagner, W., Hlavinka, P, 2018: The performance of Metop Advanced SCATterometer soil moisture data as a complementary source for the estimation of crop-soil water balance in Central Europe. The Journal of Agricultural Science, 156, 577-598, doi: 10.1017/S0021859618000011

Thenkabail, P., Lyon, J.G., Turral, G., Biradar, C., 2018: Remote Sensing of Global Croplands for Food Security. CRC Press, 556 pp., ISBN 9781138116559

Vuolo, F., Urso, D., De Michele, G., Bianchi, C., Cutting, B., 2015: Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia. Agricultural Water Management, 147, 82-95, doi: 10.1016/j.agwat.2014.08.004

Wagner, W., Hahn, S., Kidd, R, Melzer,T., Bartalis, Z., Hasenauer, S., Figa-Saldana, J., De Rosnay, P., Jann, A., Schneider, S., Komma, J., Kubu, G., Brugger, K., Aubrecht, C., Züge, J, Gangkofer, U., Kienberger, S., Brocca L., Wang, Y., Blöschl, G., Eitzinger, J., Steinnocher, K., Zeil, P., Rubel, F., 2013: The ASCAT soil moisture product: a review of its specifications, validation results, and emerging applications. Meteorologische Zeitschrift 22, 5–33, doi: 10.1127/0941-2948/2013/0399

Xie, Y., Sha, Z., Yu, M., 2008: Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. Journal of Plant Ecology, 1(1), 9–23, doi: 10.1093/jpe/rtm005

Glave 15 i 16

Lalić, B., Mihailović, D. T., Podraščanin, Z., 2011: Buduće stanje klime u Vojvodini i očekivani uticaj na ratarsku proizvodnju. Ratarstvo i povrtarstvo, 48(2), 403-418, doi: 10.5937/ratpov1102403L

Lalić, B., Firanj Sremac, A., Dekić, Lj., Eitzinger, J., Perišić, D. (2017) Seasonal forecasting of green water components and crop yields of winter wheat in Serbia and Austria. The Journal of Agricultural Science, 1-17, doi: 10.1017/S0021859617000788

Lalić, B., Firanj Sremac, A., Eitzinger, J., Stričević, R., Thaler, S., Maksimović, I., Daničić, M., Perišić, D., Dekić, Lj. (2018) Seasonal forecasting of green water

components and crop yield of summer crops in Serbia and Austria. The Journal of Agricultural Science , 1-15, doi:10.1017/S0021859618000047

Mihailović, D.T., I. Koči, B. Lalic, I. Arsenić, D. Radlović and J. Balaž, 2001: The main features of BAHUS - biometeorological system for messages on the occurrence of diseases in fruits and vines. Environmental Modelling & Software, 16, 691-696, doi: 10.1016/S1364-8152(01)00032-9

Mihailović, D.T., Lalić, B., Dreškovic, N., Mimić, G., Djurdjević, V. and Jančić, M., 2015: Climate change effects on crop yields in Serbia and related shifts of Köppen climate zones under the SRES-A1B and SRES-A2. International Journal of Climatology, 35, 3320-3334, doi:10.1002/joc.4209

Ruml, M., Vuković, A., Vujadinović, M., Djurdjević, V., Ranković-Vasić, Z., Atanacković, Z., Sivčev, B., Marković, N., Matijašević, S., Petrović, N., 2012: On the use of regional climate models: Implications of climate change for viticulture in Serbia, Agricultural and Forest Meteorology, 158–159, 53-62, doi: 10.1016/j.agrformet.2012.02.004.

Vuković, A.J., Vujadinović, M.P., Rendulić, S.M, Đurđević, V.S., Ruml, M.M., Babić, V.P., Popović, D.P., 2018: Global warming impact on climate change in Serbia for the period 1961-2100. Thermal Science, 22, 6A, 2267-2280, doi: 10.2298/TSCI180411168V

Unkašević, M., Tošić, I., 2009: An analysis of heat waves in Serbia, Global and Planetary Change, 65, 1–2, 17-26, doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.10.009.

Gocic, M., Trajkovic, S., 2013: Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980–2010, Journal of Hydrology, 494, 32-42, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.044.

Numerički primeri

Jacobson, M.Z., 2005: Fundamentals of Atmospheric Modeling, Cambridge University Press, 829 pp., ISBN 978-0-521-83970-9

Munn, R. E., 1970: Biometeorological methods., Academic Press, New York, 336 pp., ISBN 9781483272412

Phillips, R., Kondev, J., Theriot, J., Garcia, H. (2013). Physical Biology of the Cell. New York: Garland Science, doi: 10.1201/9781134111589, Exercises available at https://routledgetextbooks.com/textbooks/9780815344506/downloadable_resources.php [accessed on 18 August 2020]

Seemann, J., Chirkov, I., Lomas, J., Primault, B., 1979: Agrometeorology. Springer, Berlin, Heidelberg, 327 pp., ISBN 978-3-642-67290-3

Stigter, K. (Ed.), 2010: Applied Agrometeorology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1100 pp., ISBN 978-3-540-74697-3

WMO 2017: WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals, WMO-No. 1203. Available at https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166 [accessed on 10 August 2020]

Internet izvori

– Američka fenološka mreža (https://www.usanpn.org/) [pristupljeno 3. 6. 2020.]

– AQUACROP model zvanični model FAO (http://www.fao.org/aquacrop) [pristupljeno 3. 8. 2020.]

– Atlas biosfere (https://nelson.wisc.edu/sage/data-and-models/atlas/index.php) [pristupljeno 20. 6. 2020.]

– Evropska fenološka baza (PEP725) (http://www.pep725.eu/) [pristupljeno 15. 8. 2020.]

– Evropska mreža prostornog planiranja i osmatranja (European Spatial Planning Observation Network, ESPON https://www.preventionweb.net/english/professional/maps/v.php?id=3833) [pristupljeno 15. 6. 2020.]

– Evropska svemirska agencija (www.esa.int/eo) [pristupljeno 15. 8. 2020.]

– Evropskog sistema za prognozu prinosa useva, MARS (Monitoring Agricultural Resources System; https://ec.europa.eu/jrc/en/mars) [pristupljeno 15. 8. 2020.]

– Fenološka baza (PPODB) (http://www.ppodb.de/) [pristupljeno 15. 8. 2020.]

– Geološke i druge mape Austrije i Evrope dostupne za preuzimanje u visokoj rezoluciji (http://www.geologie.ac.at/en/research-development/mapping/substrate-floor/natural-region-carnuntum/) [pristupljeno 10. 8. 2020.]

– Kepen-Gajgerova klimatska mapa sveta za period 1953-2000. (http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/) [pristupljeno 15. 8. 2020.]

– Klimatski dijagram (prema Walter and Lieth, 1967) za izabranu geografsku širinu i dužinu (https://climatecharts.net/) [pristupljeno 15. 8. 2020.]

- Međunarodni atlas oblaka (https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html) [pristupljeno 3. 6. 2020.]
- Mislite zeleno, web stranica sa izvorima (https://followgreenliving.com/) [pristupljeno 15. 8. 2020.]
- Monitoring vremena i klime iz svemira (https://www.eumetsat.int/website/home/index.html) [pristupljeno 3. 8. 2020.]
- Nacionalna informaciona služba životne sredine i informacija zabeleženih satelitskim merenjima (https://www.nesdis.noaa.gov/) [pristupljeno 13. 8. 2020.]
- Nacionalni centar životne sredine SAD (https://www.ncdc.noaa.gov/) [pristupljeno 13. 8. 2020.]
- Operativni sistem ARIS (https://aris.boku.ac.at/home.html) [pristupljeno 15. 8. 2020.]
- Praćenje vegetacionog pokrivača iz svemira (https://vegetation.cnes.fr/en/VEGETATION/index.htm) [pristupljeno 13. 8. 2020.]
- Republički hidrometeorološki zavod (http://www.hidmet.gov.rs/) [pristupljeno 3. 6. 2020.]
- Satelitska osmatranja Zemlje u službi nauke i društva (http://ceos.org/) [pristupljeno 3. 6. 2020.]
- SIRIUS model biljne proizvodnje (http://resources.rothamsted.ac.uk/mas-models/sirius) [pristupljeno 3. 6. 2020.]
- Sistem upozorenja Lamma – regiona Toskane (http://www.lamma.rete.toscana.it/) [pristupljeno 3. 6. 2018.]
- Smart farming za optimizacije prinosa i upravljanja navodnjavanjem (https://business.esa.int/projects/showcases/smart-farming-satellites) [pristupljeno 15. 8. 2020.]
- Ukupna godišnja antropogena emisija osnovnih gasova staklene bašte (GtCO2 ekv./god.) prikazana za različite grupe gasova i za period 1970-20120 u EDGAR baza (https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=temp_profile) [pristupljeno 15. 8. 2020.]
- Upotreba dronova u poljoprivredi (http://www.droneomega.com/drones-in-agriculture/) [pristupljeno 16. 8. 2020.]
- Vežbe u elektronskom obliku (http://serbiaforexcell.com/education/book/) [pristupljeno 18. 8. 2020.]

- Zajednički program NASA/USGS koji pruža najduži niz osmatranja površine Zemlje iz svemira (https://landsat.gsfc.nasa.gov/) [pristupljeno 13. 8. 2020.]
- Zemaljska opservatorija NASA SAD, (https://earthobservatory.nasa.gov/) [pristupljeno 13. 8. 2020.]

Registar pojmova

A

abiotski
adaptacija
adijabatski gradijent
advekcija
aerobni proces
aerodinamički otpor
aerosoli
agregacija
agroekosistem
agroklimatski indeks
agrometeorologija
agrometeorološka meteorološka stanica
agrošumarstvo
akumulisani stepen-dani
albedo
algoritam
altokumulus
altostratus
amonijum joni
anabatski vetrovi
anaerobni proces
anemometar

anticiklon
antropogeni procesi
apsorpcija
apsorpcioni spektar
apsulutna vlažnost
atmosfera
atmosferska cirkulacija
atmosferska stabilnost
atmosferski pritisak
azot
azot-suboksid

B

barometar
BBCH skala
Bilans
bilans zračenja
biljni sklop
biološki minimum
biomasa
biotički rizik
Boforova skala
Bovenov količnik

C

Celzijus
centrifugalna sila
ciklon
cirokumulus
cirostratus
cirus
cvetanje

D

daljinska merenja
Darsijev zakon
deficit zasićenosti
denitrifikacija

difuzna refleksija
dinamički model
direktno zračenje
dolinski vetar
dormancija
dron
dugotalasno zračenje

E

efekat stalene bašte
ekotip
ekstremne vremenske prilike
električni senzori
elektromagnetni spektar
elektromagnetno zračenje
emisivnost
empirijski model
endodormancija
energetski bilans
energija
erozija
evaporacija
evapotranspiracija

F

Farenhajt
fen
fenofaza
fenologija
fenološke faze
fenološki model
fotoperiod
fotosintetski aktivno zračenje
fotosinteza
frekvencija
front

G

gasovi staklene bašte
globalno zračenja
grad
gradijent
gravimetrijski metod
grejači zasada
gustina

H

heliograf
hidrometeori
higrometar
hladne jedinice
hrapavost
Hulinov indeks

I

indeks lisne površine
infiltracija
infracrveni prozor
infracrveno zračenje
inje
intercepcija
isparavanje
ispiranje azota
izloženost
izobare

J

jari usev
jarovizacija

K

kalibracija
kardinalna temperatura
katabatski vetrovi
Kelvin
kiša

kiseonik
kišomer
klijanje
klima
klima dijagrami
klimatološke stanice
klimatske simulacije
klimatski modeli
kolebanje temperatute
kondenzacija
kondukcija
konvekcija
koren srednje kvadratne greške
Koriolisova sila
kratkotalasno zračenje
kritična temperatura
kumulonimbus
kumulus

L

latentna toplota
ledeni džep
letalna temperatura
lokalni vetar

M

magla
mašine za vetar
mehanički senzori
mehanistički model
metan
meteorološka stanica
mezopauza
mezosfeta
mikroklima
mikrometeorologija
mitigacija

model biljne proizvodnje
model za prognozu vremena
monohromatska iradijansa
monsuni
mraz
mržnjenje

N

nalivanje zrna
navodnjavanje
nestabilna stratifikacija
neto zračenje
nimbostratus
nitratni joni
nitrifikacija
Normalized difference vegetation index

O

oblak
oluja
opšta cirkulacija atmosfere
optimalna temperatura
orošavanje
osetna toplota
ozimi usev
ozon

P

padavine
pametna poljoprivreda
Penman-Montitov metod
periodični vetar
piranometar
planinski vetar
poledica
poljozaštitni pojas
poljski vodni kapacitet
poplava

poplava
povetarac
precizna poljoprivreda
prezimljavanje
pritisak vodene pare
pritisak zasićene vodene pare
procena rizika
procesni model
prognoza vremena
promena klime
protivgradne mreže
protivgradni top
psihrometar

R

radar
ranjivost
rasejanje
ravan nultog pomeranja
redukcija
reflektovano zračenje
regresiona analiza
relativna vlažnost vazduha
relativna vrednost korena srednje kvadratne greške
respiracija
rizik
rosa
rosulja

S

satelit
selektivna apsorpcija
senzor
sila gradijenta pritiska
sila trenja
sineoptičke razmere
sistemi ranog upozorenja

slana
sneg
solarna konstanta
specifična vlažnost
specifični toplotni kapacitet
srednja apsolutna greška
stabilna stratifikacija
standardna devijacija
standardni pritisak
statička nestabilnost
statička stabilnost
statistički model
stohastički model
stoma
stomaterni otpor
stratifikacija
stratokumulus
stratopauza
stratosfera
stratus
sublimacija
suhovej
suma temperatura
sumpor-dioksid
sunčev sjaj
superćelija
superrashlađen
superzasićen
suša
suvoadijabatski gradijent
svetlost

T

tačka rose
talasna dužina
tempearturni prag

temperatura
temperaturni stres
tenziometar
terestrijalno zračenje
termalna difuzivnost
termalna provodnost
termohigrograf
termometar
termosfera
topljenje
toplota
toplotna difuzivnost
toplotna provodnost
toplotni kapacitet
toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku
toplotnog kapaciteta pri konstantnoj zapremini
transmitivnost
transpiracija
tropopauza
troposfera
turbulencija
turbulentni fluks
turbulentno mešanje

U

ugljen-dioksid
ultraljubičasto zračenje
ultrazvučni anemometar
upravljenje rizikom
usev

V

validacija
vegetacioni period
vernalizacija
verovatnoća
vertikalni profil

vetar
vetar s kopna
vetar s mora
vetar uslovljen reljefom
vlažnoadijabacki gradijent
vlažnost vazduha
vodena para
vodni bilans
vodni potencijal
volumetrijski metod
vreme

Z

zapremina
zračenje

Autor
dr Branislava Lalić
Poljoprivredni fakultet u Novom Sadu, Departman za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, Srbija

dr Jozef Ejcinger
University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Meteorology and Physics, Vienna, Austria

dr Ana Dalamarta
University of Florence, Department of Agrifood Production and Environmental Sciences, Florence, Italy

dr Simone Orlandini
University of Florence, Department of Agrifood Production and Environmental Sciences, Florence, Italy

dr Ana Firanj Sremac
Poljoprivredni fakultet u Novom Sadu, Departman za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, Srbija

Bernard Paher
Consultant, Vienna, Austria

Glavni i odgovorni urednik
Prof. dr Nedeljko Tica
Dekan Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu

Lektor
Ivana Koči

Recenzenti
Prof. Rudolf Kastori, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad
Prof. Ružica Stričević, Poljoprivredni fakultet, Beograd
Prof. Nenad Aleksić, Division of Air Resources, New York State Department of Environmental Conservation, Albany

Izdavač
Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet u Novom Sadu

Zabranjeno je preštampavanje i fotokopiranje. Sva prava zadržava izdavač

CIP