

PROCJENA TRANSPIRACIJE HRASTA LUŽNJAKA U SPAČVANSKOJ ŠUMI METODAMA DALJINSKOG MOTRENJA

Jantol, Nela

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:604020>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

Nela Jantol

**PROCJENA TRANSPIRACIJE HRASTA
LUŽNJAKA U SPAČVANSKOJ ŠUMI METODAMA
DALJINSKOG MOTRENJA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF BIOLOGY

Nela Jantol

**ASSESSMENT OF THE TRANSPIRATION OF
PEDUNCULATE OAK IN THE SPAČVA FOREST
USING REMOTE SENSING
METHODS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2024

Ovaj je doktorski rad izrađen u Oikon d. o. o. - Institut za primijenjenu ekologiju, pod mentorstvom izv. prof. dr. dc. Hrvoja Kutnjaka, u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog studija Biologije pri Biološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Životopis mentora

Hrvoje Kutnjak diplomirao je 2001. i doktorirao 2010. godine na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u području prirodnih znanosti, polje biologija, s temom "Utjecaj agroekoloških čimbenika na sukcesiju travnjaka u zoni šume bukve i jele na Medvednici". Svoju znanstvenu aktivnost započinje još 2002. godine kao laboratorijski suradnik i mladi istraživač u laboratoriju tvrtke "Zagreb Biotek d.o.o." gdje 11 mjeseci radi na istraživanjima i razvoju patenta za detekciju imunosupresivnih bolesti kod peradi. Od rujna 2004. godine je zaposlen kao znanstveni novak na Zavodu za specijalnu proizvodnju bilja, Agronomskog fakulteta, te je nakon doktorata, 2011. godine izabran u zvanje znanstveni suradnik, a već 2013. godine u zvanje viši znanstveni suradnik u znanstvenom polju Poljoprivreda, područja biotehničkih znanosti. Na trogodišnje poslijedoktorsko usavršavanje odlazi 2013. godine u Zajednički istraživački centar Europske komisije u Ispru u Italiju gdje radi na Institutu za okoliš i održivost. Tamo se bavi primjenom satelitskih snimaka i daljinskog motrenja u praćenju dinamike produktivnosti vegetacije i degradacije zemljišta kao znanstveno-tehnička podrška europskom svemirskom programu za motrenje Zemlje "Copernicus". U Hrvatskoj je sudjelovao u nizu znanstvenih nacionalnih projekata (HRZZ) kao i međunarodnih projekata (H2020, LIFE, Erasmus+). Njegova svestranost i znanstvena izvrsnost je i prepoznata i od Odbora za znanost Agronomskog fakulteta od kojeg je još 2010. godine dobio priznanje za znanstvenu izvrsnost mladih znanstvenika. Autor je više od 60 znanstvenih radova, 20 sažetaka, priloga u knjizi i atlasa. Na Sveučilištu u Zagrebu Agronomskom fakultetu izabran je u znanstveno-nastavno zvanje docenta 7. 6. 2017. te drži nastavu na dodiplomskom, diplomskom i doktorskom studiju iz tema koje obuhvaćaju daljinska istraživanja u poljoprivredi i primjenu geografskog informacijskog sustava u inventarizaciji prirodnih resursa, biljnu proizvodnju i gospodarenje travnjacima te poljoprivrednu fitocenologiju. U znanstveno-nastavno zvanje izvanrednog profesora izabran je 9. 11. 2022. godine. Osim nastave na fakultetu, Hrvoje Kutnjak, je angažiran i na drugim poljima u kojima objavljuje znanstvene radove iz područja entomologije, ekologije životinja i zaštite prirode. Aktivni je član je Hrvatskog botaničkog društva (HboD), European Grassland Federation (EGF), te je usko surađivao s Državnim zavodom za zaštitu prirode (DZZP), Agencijom za plaćanja u poljoprivredi, ribarstvo i ruralni razvoj (APPRR) i Ministarstvom poljoprivrede, šumarstva i ribarstva.

Zahvale

Ovaj pothvat ne bi bio moguć bez podrške i vodstva dr. sc. Zrinke Mesić, koja mi je pružila priliku za profesionalni razvoj u području ekologije i zaštite prirode. Njezin primjer, predanost i poticaj bili su ključni motiv za moj upis doktorskog studija. Uvela me u svijet daljinskih istraživanja te ukazala na važnost kontinuiranog usavršavanja i inovacija u zaštiti prirode. Kroz njezino mentorstvo, osim stjecanja akademskih i stručnih znanja, izgrađen je odnos ispunjen povjerenjem, podrškom i zajedničkim entuzijazmom, iz kojeg je proizašlo prijateljstvo koje smatram neprocjenjivim dijelom svog profesionalnog i osobnog razvoja.

Veliko hvala mom mentoru, dr. sc. Hrvoju Kutnjaku, koji me stručno i strpljivo vodio kroz proces pisanja disertacije. U trenucima kada mi je opsežna (hrastova) šuma podataka zamaglila vidokrug cilja, svojim me smjernicama vratio na pravi put. Plodove svog rada nesebično je dijelio prenošenjem znanja i iskustva iz područja daljinskih istraživanja, a i doslovno – kroz prvu slučajno uzgojenu uredsku rajčicu, koju sam promatrala kako raste uz kaktus dok sam radila na disertaciji.

Zahvaljujem Oikonu – Institutu za primijenjenu ekologiju na pruženoj financijskoj i stručnoj podršci tijekom izrade doktorata. Posebnu zahvalnost upućujem dr. sc. Vladimiru Kušanu i dr. sc. Tarzanu Legoviću na savjetima i smjernicama prilikom osmišljavanja teme i pristupa istraživanju. Također, zahvaljujem Hrvatskoj zakladi za znanost na financiranju izrade disertacije kroz projekt DOK-2020-01-9841. Hvala dr.sc. Branimiru Hackenbergeru Kutuzoviću i Tamaru Đerđ na savjetima oko obrade podataka, te Davidu Herreri na pomoći s podlogama za Suncem induciranu fluorescenciju. U svijet daljinskih istraživanja Suncem inducirane fluorescencije uveli su me Maria Pilar Cendrero Mateo i Marco Celesti, a Egor Prikaziuk dodatno inspirirao na usvajanje znanja iz programskih jezika.

Kolege iz Oikona i Pro Silve bili su velika podrška kroz razumijevanje, prijateljske savjete i vrijedne perspektive, koje su mi pomogle ublažiti izazove i intenzitet zahtjevnog procesa pisanja disertacije.

Na kraju, iskrena zahvala mojoj obitelji i prijateljima na neizmornoj podršci, zajedničkim šetnjama, planinarenjima i trenucima opuštanja koji su mi pomogli da povremeno odmaknem misli od rada. Vaša prisutnost i razumijevanje bili su neophodni za održavanje ravnoteže i snage potrebne za ovaj rad.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Doktorski rad

PROCJENA TRANSPIRACIJE HRASTA LUŽNJAKA U SPAČVANSKOJ ŠUMI METODAMA DALJINSKOG MOTRENJA

NELA JANTOL

Oikon d.o.o. Institut za primijenjenu ekologiju, Trg senjskih
uskoka 1-2, 10 020 Zagreb

Transpiracija je proces evaporacije vode s površine listova. Regulirana je pučima, a rezultira kontinuiranim prijenosom vode iz korijena biljke u atmosferu. U većini kopnenih ekosustava, transpiracija je najveća komponenta evapotranspiracije tj. ukupnog protoka vode koji se izmjenjuje između atmosfere i biosfere. Cilj ovog rada bio je analizirati podatke protoka ksilemskog soka hrasta lužnjaka u spačvanskoj šumi koji su neizravna mjera za transpiraciju, povezati ih s procesima evapotranspiracije i fotosinteze te utvrditi hijerarhiju okolišnih čimbenika koji utječu na dinamiku transpiracije. Rezultati su pokazali da su podaci daljinskog motrenja za evapotranspiraciju (produkt MOD16A2GF) i Suncem induciranu fluorescenciju (produkt TROPOSIF) uspješno objašnjavali dinamiku transpiracije hrasta lužnjaka tijekom vegetacijske sezone. Također, vegetacijski indeks SELI, dobiven putem snimki senzora Sentinel-2, detektirao je sezonski vrhunac dnevne transpiracije, na temelju čega se modeli mogu dodatno poboljšati. Metode korištene u ovom radu mogu se koristiti za nastavak praćenja sezonske dinamike transpiracije u spačvanskoj šumi, kao i primijeniti na podatke nadolazećih generacija satelitskih sustava.

(158 stranice / 50 slika / 23 tablice / 176 literaturnih navoda / jezik izvornika: hrvatski)

Ključne riječi: ksilemski sok; evapotranspiracija, suncem inducirana fluorescencija; vegetacijski indeksi

Mentor: izv. prof. dr. Hrvoje Kutnjak

Ocjenjivači: dr. sc. Ivan Balenović, viši znan. suradnik, prof. dr. sc. Sven Jelaska, prof. dr. sc. Željka Vidaković-Cifrek, zamjena: izv. prof. dr. sc. Krunoslav Sever

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Doctoral thesis

ASSESSMENT OF THE TRANSPIRATION OF PEDUNCULATE OAK IN THE SPAČVA FOREST USING REMOTE SENSING METHODS

NELA JANTOL

Oikon ltd. Institute of Applied Ecology, Trg senjskih uskoka 1-
2, 10 020 Zagreb

Transpiration is the process of water evaporation from the leaf surface. It is regulated by stomata, and results in a continuous transfer of water from the roots of the plant to the atmosphere. In most terrestrial ecosystems, transpiration is the largest component of evapotranspiration which is the total flow of water exchanged between the atmosphere and the biosphere. This study analysed xylem sap flow data of the pedunculate oak in the Spačva forest, as a proxy for transpiration, relating it evapotranspiration and photosynthesis processes. Additionally, the study aimed to determine the hierarchy of environmental factors influencing transpiration dynamics. The results showed that remote sensing data for evapotranspiration (from the MOD16A2GF product) and sun-induced fluorescence (from the TROPOSIF product) successfully captured transpiration dynamics of pedunculate oak during the growing season. The vegetation index SELI, derived from Sentinel-2 sensor images, detected the seasonal peak of daily transpiration, based on which models can be further improved. The methods used in this study can help in monitoring of transpiration dynamics and be applied to data from upcoming generations of satellite systems.

(158 pages / 50 figures / 23 tables / 176 references / original in: Croatian)

Keywords: sap flow; evapotranspiration; sun induced fluorescence; vegetation indices

Supervisor: Associate Professor Hrvoje Kutnjak, PhD

Reviewers: Senior Research Associate Ivan Balenović, PhD; Professor Sven Jelaska, PhD; Professor Željka Vidaković-Cifrek, PhD; replacement: Associate Professor Krunoslav Sever, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD.....	4
2. LITERATURNI PREGLED.....	7
2.1. Transpiracija	7
2.1.1. Uloga transpiracije na razini biljke.....	12
2.1.2. Uloga transpiracije na razini ekosustava	13
2.1.3. Metode procjene transpiracije	18
2.2. Spačvanska šuma.....	26
3. MATERIJALI I METODE.....	29
3.1. Područje istraživanja.....	29
3.2. Mjerenje protoka ksilemskog soka metodom toplinskog uravnoteženja.....	38
3.3. Mjerenje godišnjeg debljinskog prirasta hrasta lužnjaka i vlage tla.....	41
3.3.1. Godišnji debljinski prirast hrasta lužnjaka	41
3.3.2. Vlažnost tla.....	41
3.4. Daljinsko motrenje područja spačvanske šume.....	43
3.4.1. Analiza fenologije spačvanske šume.....	43
3.4.2. Evapotranspiracija	44
3.4.3. Suncem inducirana fluorescencija	45
3.4.4. Vegetacijski indeksi.....	46
3.5. Meteorološki podaci	48
3.6. Obrada i analiza podataka.....	51
3.6.1. Obrada i analiza podataka s obzirom na ciljeve rada	51
3.6.2. Obrada podataka terenskih mjerenja	53
3.6.3. Obrada podataka daljinskog motrenja	56

3.6.4.	Analiza povezanosti dinamike transpiracije i vezanih procesa	60
3.6.5.	Hijerarhijska analiza ekoloških čimbenika transpiracije	62
4.	REZULTATI	64
4.1.	Rezultati terenskih mjerenja	64
4.1.1.	Okolišni čimbenici.....	64
4.1.2.	Rezultati protoka ksilemskog soka.....	67
4.1.3.	Prsni promjeri stabala hrasta lužnjaka na plohama	76
4.1.4.	Debljinski prirast hrasta lužnjaka	77
4.1.5.	Vlaga tla.....	78
4.2.	Rezultati daljinskog motrenja.....	79
4.2.1.	Fenološke faze vegetacije.....	79
4.2.2.	Sezonska dinamika evapotranspiracije	83
4.2.3.	Sezonska dinamika Suncem inducirane fluorescencije	92
4.2.4.	Sezonska dinamika vegetacijskih indeksa izvedenih iz satelitskih snimaka Sentinel-2.....	95
4.3.	Analiza povezanosti dinamike transpiracije i vezanih procesa	100
4.3.1.	Evapotranspiracija	100
4.3.2.	Suncem inducirana fluorescencija	101
4.3.3.	Vegetacijski indeksi.....	105
4.4.	Hijerarhijska analiza ekoloških čimbenika transpiracije	110
4.4.1.	Modeli linearne regresije za podatke mjerenja provedenih svakih 30 minuta	110
4.4.2.	Korelacije između okolišnih čimbenika i modeli linearne regresije na dnevnim podacima.....	115
4.5.	Debljinski prirast hrasta lužnjaka u odnosu na vlažnost tla	122
5.	RASPRAVA.....	123

5.1.	Protok ksilemskog soka i transpiracija	123
5.2.	Procjena transpiracije metodama daljinskog motrenja	125
5.2.1.	Procjena fenoloških faza.....	125
5.2.2.	Evapotranspiracija	127
5.2.3.	Suncem inducirana fluorescencija	133
5.2.4.	Vegetacijski indeksi.....	134
5.3.	Hijerarhija okolišnih čimbenika koji su utjecali na transpiraciju	137
5.4.	Debljinski prirast i vlaga u tlu	138
6.	ZAKLJUČAK.....	140
7.	LITERATURA	142
8.	PRILOZI.....	157
9.	ŽIVOTOPIS AUTORICE	158

1. UVOD

Jedinstvenom građom tkiva i regulacijom fizioloških procesa biljke su razvile fenomen transpiracije kojim ostvaruju prijenos vode od korijena do krošnje. Voda u biljkama važna je ne samo za njihov rast i razvoj, nego i za cjelokupno kruženje vode u ekosustavu. Transpiracija je proces kojim biljke oslobađaju vodu u obliku vodene pare, a reguliran je okolišnim i fiziološkim čimbenicima. Od ukupnih oborina na kopnu Zemlje transpiracija vraća 30-50 % vode u atmosferu i čini 46-76 % evapotranspiracije na globalnoj razini (Schlesinger i Jasechko, 2014). Budući da vodena para koja se oslobađa transpiracijom i drugi plinovi dijele isti difuzijski put, postoji međuovisnost između transpiracije i primanja CO₂, a time i fotosinteze.

Mjerenje transpiracije važno je za procjenu odgovora vegetacije na ekološke uvjete, kao što su varijacije u temperaturi, vlažnosti i promjeni razine CO₂ u atmosferi. Podaci dobiveni mjerenjem transpiracije koriste se za validaciju ekohidroloških modela koji su važni za predviđanje promjena u dinamici vegetacije, dostupnosti vode i funkcioniranju ekosustava u različitim klimatskim scenarijima. Istovremeno, direktno mjerenje transpiracije i njeno razlučivanje od procesa evaporacije i ukupne evapotranspiracije još uvijek predstavlja izazov.

Daljinsko motrenje obuhvaća skup metoda koje omogućavaju praćenje dinamika raznih ekoloških procesa, a prednosti uključuju kontinuitet mjerenja, veću prostornu pokrivenost i široku dostupnost podataka.

Spačvanski bazen kao jedinstveni i najveći cjeloviti kompleks nizinskih šuma hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) u Hrvatskoj i Europi ima važnu ulogu u ciklusu kruženja vode i ugljika, a izložena je stresnim čimbenicima zbog klimatskih promjena, regulacije vodotoka i invazivnih vrsta.

Primjenom daljinskog motrenja u nizinskim šumama hrasta lužnjaka istražiti će povezanost transpiracije s evapotranspiracijom i fotosintezom te mogućnost praćenja stanja ekosustava spačvanske šume kroz vegetacijsku sezonu.

Ciljevi i hipoteze istraživanja

Glavna svrha ovog rada je procijeniti transpiraciju hrasta lužnjaka i utvrditi povezanost njene dinamike i vezanih procesa fotosinteze i evapotranspiracije u ekosustavu spačvanske šume korištenjem daljinskog motrenja. Da bi se ostvarila glavna svrha rada, postavljeni su sljedeći istraživački ciljevi:

1. Odrediti transpiraciju stabala hrasta lužnjaka na plohama u spačvanskoj šumi u ovisnosti o okolišnim čimbenicima – temperaturi zraka i tla, vlažnosti zraka i tla, tlaku zraka, deficitu zasićenosti zraka vodenom parom, smjeru i jačini vjetra, broju osunčanih sati i oborinama.
2. Utvrditi povezanost evapotranspiracije spačvanske šume dobivene daljinskim motrenjem i transpiracije hrasta lužnjaka izmjerene na terenu te usporediti njihove dinamike u vegetacijskoj sezoni.
3. Utvrditi povezanost Suncem inducirane fluorescencije, kao pokazatelja fotosinteze, dobivene daljinskim motrenjem i transpiracije hrasta lužnjaka izmjerene na terenu te usporediti njihove dinamike u vegetacijskoj sezoni.
4. Odrediti fenološke faze (početak, maksimum i kraj vegetacijske sezone) podacima daljinskog motrenja.
5. Utvrditi povezanost terenski mjerene vlažnosti tla i debljinskog prirasta hrasta lužnjaka u spačvanskoj šumi.

Ostvarivanje ovih ciljeva dovest će do prvih saznanja o sezonskim dinamikama transpiracije i evapotranspiracije odnosno Suncem inducirane fluorescencije hrasta lužnjaka u spačvanskoj šumi i izdvajanja okolišnih čimbenika koji najviše utječu na transpiraciju. Nadalje, metode kvantificiranja i interpretacije ekosustava spačvanske šume bit će moguće primijeniti i na druga slična područja u svrhu praćenja transpiracije i povezanih procesa uslijed klimatskih promjena.

Temeljem dosadašnjih istraživanja i postavljenih ciljeva ovog istraživanja izvode se hipoteze:

H1. Na vremensku i prostornu sezonsku dinamiku transpiracije utječu najviše temperatura zraka, relativna vlažnost zraka, broj osunčanih sati i jačina vjetra, a manje temperatura tla, tlak zraka, vlažnost tla, smjer vjetra, oborine te postoji jedinstvena hijerarhija čimbenika koja objašnjava tu dinamiku.

H2. Dinamike transpiracije i evapotranspiracije izmjerene daljinskim motrenjem u šumi hrasta lužnjaka čvrsto su vezane u vegetacijskoj sezoni i moguće je koristiti daljinsko motrenje za praćenje transpiracije hrasta lužnjaka.

H3. Dinamike transpiracije i Suncem inducirane fluorescencije izmjerene daljinskim motrenjem u šumi hrasta lužnjaka čvrsto su vezane u vegetacijskoj sezoni i moguće je koristiti daljinsko motrenje za praćenje transpiracije hrasta lužnjaka.

H4. Podacima daljinskog motrenja moguće je odrediti početak, maksimum i kraj vegetacijske sezone u spačvanskoj šumi.

H5. Količina vlage u dubljim slojevima tla bolje objašnjava varijacije u debljinskom prirastu hrasta lužnjaka nego količina vlage u plićim slojevima jer je korijen hrasta lužnjaka prilagođen na crpljenje vode iz podzemnih voda, a manje iz oborina.

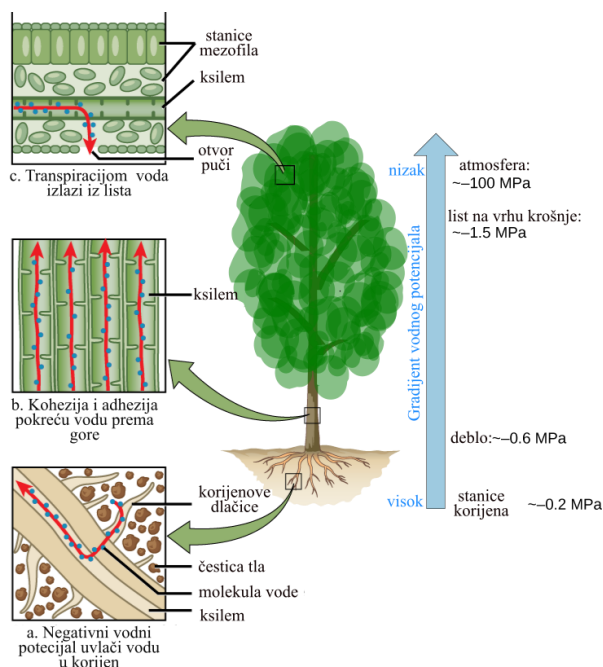
2. LITERATURNI PREGLED

2.1. Transpiracija

Transpiracija je proces kojim biljke oslobađaju vodu u atmosferu u obliku vodene pare, kroz otvore stomatalnog aparata (puči), a u manjoj mjeri kroz kutikulu i lenticеле.

Voda ulazi u korijen zbog razlike hidrostatskog tlaka između tla i korijena. U korijenu voda se kreće ili apoplastnim putem (međustanični prostor) ili staničnim putem kroz plazmodezmije ili preko plazmatske membrane. Kad voda dođe do ksilema, kreće se prema krošnji uzlaznim putem kroz lignificirane mrtve stanice - traheje i traheide.

Kohezija (sila koja privlači molekule vode) i adhezija (sila koja privlači stanice vode uz stijenke) osiguravaju neprekinuti tok vode od korijena do lista (Slika 1.b). Kada molekule vode dođu do lista, osmozom prelaze u stanice mezofila lista, a zatim se nakupljaju na mezofilnim staničnim stijenkama. Odavde isparavaju u međustanične prostore lista, te zatim kada su puči otvorene, difuzijom izlaze u atmosferu (Lazarević i Poljak, 2019; Pevalek-Kozlina, 2000) (Slika 1.c).



Slika 1. Shematski prikaz transpiracije na stablu. Preuzeto i prilagođeno iz: <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology2/chapter/transpiration/>

Kretanje vode omogućuje korijenov tlak ili transpiracijski usis. Korijenov tlak je pozitivni hidrostatski tlak u ksilemu korijena. Otopljene tvari ulaze iz tla u tkivo korijena nošene strujom vode, a u stanice korijena ulaze pasivnim te aktivnim prijenosom koji zahtijeva metaboličku energiju. Povećanjem koncentracije otopljenih tvari u korijenu, osmotski potencijal pada, a time pada i vodni potencijal u korijenu. Zbog razlike vodnog potencijala, voda se kreće iz tla u korijen, zatim u ksilem i tamo nastaje pozitivni hidrostatski tlak tj. korijenov tlak. Korijenov tlak nemaju sve biljke (npr. odrasla stabla četinjača), a javlja se uglavnom preko noći i u početku sezone prije listanja stabla (Schenk i sur., 2021). Korijenov tlak postiže maksimalno 0,5 MPa, a tlak potreban za transport vode na velike udaljenosti iznosi i do 3 MPa, pa korijenov tlak ne može biti glavna pokretačka sila u visokim stablima, te ima ograničeno značenje i to najviše za niske zeljaste biljke (Lazarević i Poljak, 2019). Kod intenzivne transpiracije voda se brzo transportira iz korijena u lišće i izlučuje u atmosferu pa se otopljene tvari ne nakupljaju u ksilemu i ne dolazi do razvoja korijenovog tlaka. U takvim uvjetima, kada se transpiracijom gubi voda iz biljke, dolazi do tenzije tj. negativnog hidrostatskog tlaka u ksilemu. Naime, za vrijeme transpiracije, voda isparava sa staničnih stijenki koje graniče sa zračnim prostorima u listu i isparava kroz puči lista u atmosferu. Površinska napetost u mikroporama staničnih stijenki prenosi se na stupce vode u ksilemskim provodnim elementima i voda se kreće uzlazno, tj. ostvaruje se transpiracijski usis (Slika 1.a) (Buchanan i sur., 2015).

Tijekom dana biljka crpi vodu iz tla te u kraćim vremenskim razmacima (minute do sati) usmjerava u skladu sa zahtjevima ključnih fizioloških procesa kao što su skladištenje vode u stablu ili fotosinteza u lišću. Većina vode prolazi kroz biljku nepromijenjena i služi za održavanje turgora tj. hidrostatskog tlaka u stanicama koji se povećava ulaskom vode, kao medij za transport otopljenih tvari i sprječavanje isušivanja staničnih tkiva. Manji dio vode (oko 1 %) koristi se u fotosintezi gdje biljke pomoću apsorbirane energije Sunca oksidiraju molekule vode i oslobođene protone i elektrone koriste u procesu fotosinteze. Kroz dulje periode (jedan ili više dana) biljka približno gubi 99 % vode transpiracijom (Forster, 2017).

Najznačajnije čimbenike koji utječu na stopu transpiracije moguće je svrstati u dvije skupine:

1. fizikalne karakteristike okoliša (temperatura i vlažnost zraka, brzina vjetra, solarno zračenje, količina i salinitet vode u tlu, sposobnost tla da provodi vodu do korijena, deficit zasićenosti zraka vodenom parom)
2. biološke karakteristike biljaka (razlike u anatomiji i orijentaciji lista, gustoći puči i njihovoj provodljivosti, fiziološkim prilagodbama različitim uvjetima okoliša i površini lista) (Allan i sur., 1998; Bernacchi i VanLooche, 2015; Damm i sur., 2021; Lazarević i Poljak, 2019).

Ksilemski sok

Više od 99 % ukupnog transporta vode i u njoj otopljenih tvari provodi se ksilemom (Lazarević i Poljak, 2019). Mladi ksilem (bjeljika) provodi ksilemski sok od korijena prema krošnji, a oko 10 % bjeljike čine žive stanice parenhima u kojima se skladište hranjive tvari. Aktivni ksilem sadrži provodne elemente, kod viših biljaka to su traheide i traheje. Zbog građe ksilema, stabla mogu rasti u visinu i pritom se odupirati snažnim silama koje nastaju prolaskom vode od korijena do krošnje. Starenjem se ksilem pretvara u srž, koja ostaje kao mehanička potpora, ali više ne sudjeluje u fiziološkim procesima (Pallardy, 2008) (Slika 2).



Slika 2. Poprečni presjek debla s karakterističnim dijelovima. Preuzeto i prilagođeno iz: <https://www.britannica.com/summary/wood-plant-tissue>

Otopljene tvari u ksilemskom soku uključuju anorganske makroelemente (dušik, fosfor, sumpor, kalij, kalcij i magnezij) i mikroelemente (bor, klor, molibden, bakar, željezo, nikal, mangan i cink), ali i organske spojevi (najviše jabučna i malonska kiselina, zatim asparagin, glutamin i cistein), čije se koncentracije mijenjaju tijekom sezone (Glavač, 1996; Meerts, 2002).

Širi provodni elementi učinkovitiji su u provođenju vode od užih elemenata, s gornjom granicom promjera od otprilike 0,5 mm. Rod *Quercus* ima predstavnike vrsta sa širokim provodnim elementima i one s užim kao što su zimzelene vrste suhih ili suptropskih područja. Širi elementi povećavaju učinkovitost provođenja vode, ali smanjuju sigurnost zbog kavitacije ili napada štetnika jer postoji manji broj provodnih elemenata, ali i drugih rizika kao što je stvaranje leda zimi (Zimmermann, 1983). Količina vode koja se oslobađa transpiracijom razlikuje se prema veličini biljke, npr. transpiracija u kukuruza iznosi 4 L dnevno, za 4 m visoko stablo bagrema 10 L, a za 60 m visoki eukaliptus 800 L (Forster, 2017).

Protok ksilemskog soka koristi se za procjenu transpiracije, iako između njih postoji vremenski pomak i moguće su promjene u odnosima uzrokovane nedostatkom vode (Granier i sur., 1996). Analiza podataka protoka ksilemskog soka za vrstu *Quercus montana* Wild. pokazala je da su Sunčeva radijacija, deficit zasićenosti vodene pare u zraku i indeks površine lista (LAI - eng. Leaf Area Index) najbolje opisivali brzinu dnevne transpiracije (Wullschleger i sur., 2001). Deficit zasićenosti utjecao je na sezonske varijacije transpiracije u šumama hrasta crnike (Morales i sur., 2021). Sunčeva radijacija imala je najznačajniji utjecaj na protok ksilemskog soka maslina (Amani i sur., 2013), i bukve, gdje je radijacija dominirala uz temperaturu i vlagu zraka, objašnjavajući 69 % sezonske varijabilnosti transpiracije sastojine (Nalevanková i sur., 2020). Cienciala i sur. (2000) su predložili model koji kombinira parabolični odgovor na radijaciju i inverzni linearni odgovor na vlažnost zraka.

Stomatalna transpiracija

Stomatalna transpiracija je proces isparavanja vode kroz puči, a postoje još i kutikularna transpiracija tj. isparavanje kroz kutikulu i lenticelna transpiracija na oplutjelim dijelovima biljke kroz otvore koji se ne mogu regulirati. Stomatalnom transpiracijom gubi

se do $\frac{2}{3}$ ukupnog volumena vode zaprimljene korijenom koji ovisi o površini lista i gustoći puči (Lazarević i Poljak, 2019).

Puči (lat. stomata) su otvori širine 3-12 μm , duljine 10-40 μm , na epidermi zelenih dijelova viših biljaka koji reguliraju izmjenu plinova, a osobito transpiracije. Svaka puč ima dvije stanice zapornice, tj. specijalizirane zadebljale epidermske stanice koje okružuju pukotinu puči. Za razliku od ostalih epidermskih stanica, zapornice imaju kloroplaste i mogu fotosintetizirati.

Najveći broj puči nalazi se u epidermi listova, ali mogu se nalaziti i na peteljki, izdancima, plodovima i stabljici. Otvorene puči zauzimaju oko 1 % ukupne površine lista. Građa, veličina, gustoća i raspored puči ovise o biljnoj vrsti. Kod hrasta lužnjaka puči se nalaze samo na donjoj strani lista (hipostomatski listovi), s procjenom od 322 puči po mm^2 lista (Škvorec i sur., 2013).

Stomatalna transpiracija ovisi o:

- 1) Razlici koncentracije vodene pare između međustaničnih prostora lista i vanjskog zraka.
- 2) Otporu difuziji koji se javlja pri transpiraciji
 - a) u otvorenim i poluotvorenim pučima (stomatalni otpor)
 - b) uz samu površinu lista (otpor graničnog sloja zraka) (Lazarević i Poljak, 2019).

Stomatalni otpor odvija se u pučima zbog difuzije molekula vode kroz otvorene i poluotvorene puči.

Otpor zbog graničnog sloja zraka uz list javlja se u statičnom sloju zraka kroz koji se vodena para raspršuje u atmosferu. Debljina graničnog sloja zraka uz list određena je brzinom vjetra. Primjerice, dok nema vjetra, veća je debljina graničnog sloja zraka na površini lista, čime raste otpor difuziji molekula vode. Posljedica toga je smanjenje gubitka vodene pare (nizak stupanj transpiracije) te veličina otvora puči u ovim uvjetima nema značajan utjecaj na transpiraciju. S druge strane, kad je brzina vjetra visoka, smanjuje se debljina graničnog sloja zraka, time i otpor difuziji molekula vode, a transpiracija se povećava. U ovim uvjetima, veličina otvora puči znatno utječe na kontrolu gubitka vode iz lista.

U manjoj mjeri veličina, oblik i struktura površine lista (npr. dlake, uvučene puči u epidermi) utječu na debljinu graničnog sloja zraka. Ova svojstva ipak ne mogu brzo utjecati na transpiraciju, kao što to može kontrola otvaranja i zatvaranja puči.

Turgor (hidrostatski tlak) kontrolira otvaranje i zatvaranje puči, koje reagiraju na vanjske čimbenike uključujući intenzitet i kvalitetu svjetla, temperaturu i vlagu zraka, nedostatak vlage u tlu, deficit zasićenosti zraka vodenom parom i unutarstaničnu koncentraciju CO₂ (Lazarević i Poljak, 2019; Xu i sur., 2016). Biljke dugoročno reagiraju na okolišne faktore promjenom veličine otvora puči ili njihove gustoće. Pod povišenim CO₂, uzrokovanim antropogenim djelovanjem, smanjuje se koncentracija iona (K⁺, Ca²⁺, Cl⁻, malat), zeaksantina i pH u citosolu stanica zapornica, što smanjuje turgor i zatvara puči (Xu i sur., 2016).

2.1.1. Uloga transpiracije na razini biljke

Uloga transpiracije na razini biljke ključna je za nekoliko fizioloških procesa - prijenos nutrijenata, hlađenje lista, održavanje turgora te izmjena plinova gdje CO₂ ulazi u biljku, a vodena para izlazi iz biljke (Bernacchi i VanLoocke, 2015; Lazarević i Poljak, 2019). Voda prenosi otopljene tvari kroz ksilem od korijena do izdanaka. Otvaranjem puči za zaprimanje CO₂ iz atmosfere dolazi do gubitka vode iz biljke, što dovodi do hlađenja listova (Cramer i sur., 2009; Lambers i sur., 2008). Neke biljke nemaju strategiju čuvanja vode, već maksimiziraju njen protok kad je dostupna, što je važno za razumijevanje distribucije biljaka i njihovih prilagodbi na okolišne gradijente. Nutrijenti, posebice dušik (u obliku NO₃⁻) u tlu, djelomično reguliraju transpiraciju promjenom ekspresije gena za proteine membranskih vodnih kanala (akvaporina) u korijenu (Cramer i sur., 2009). Vadez i sur. (2014) su u svom radu predložili da akvaporini imaju ulogu u odgovoru biljaka na visok deficit zasićenosti zraka vodenom parom temeljenom na hidrauličkoj vodljivosti što utječe na različite stope transpiracije biljaka poljoprivrednih kultura odnosno njihovih genotipova.

Za asimilaciju ugljika biljkama je potrebna intenzivna razmjena CO₂ i H₂O, ali istovremeno biljka nastoji spriječiti preveliki gubitak vode što onda smanjuje intenzitet razmjene ovih molekula. Ovo je još 1976. Raschke nazvao dilemom kopnenih biljaka jer

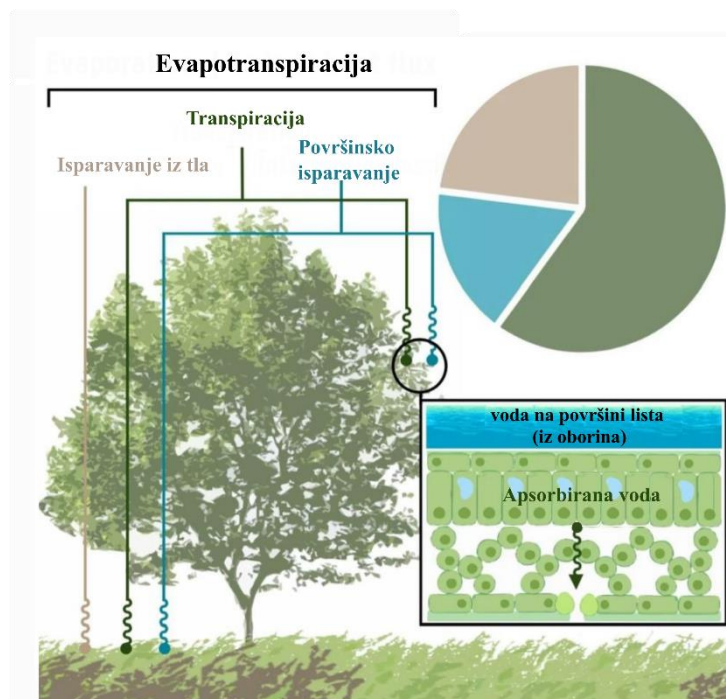
puči koje se otvaraju zbog ulaska CO₂ propuštaju i molekule H₂O prema atmosferi (transpiracija) (Raschke, 1976). Evolucijom se još nije razvila membrana koja propušta CO₂ u biljku, a sprječava izlazak H₂O (Cowan, 1978; Cramer i sur., 2009). Većina molekularnih modela pretpostavlja da biljni hormon, abscizinska kiselina (ABA) određuje prioritete mehanizama povezanih s CO₂ i H₂O (Leung i sur., 2016).

Učinkovitost fotosinteze (konverzija solarne energije u kemijsku) iznosi oko 3 % za C₃ biljke, dok je za C₄ biljke ta učinkovitost oko 6 % (Leung i sur., 2016). Kako bi zadržao i ovako relativno nisku učinkovitost, fotosintetski aparat ne smije biti izložen previsokoj temperaturi. Kučera je u svom radu (2023) zaključio da je skoro sva dolazna solarna energija trebala biti utrošena na isparavanje kako bi se održala optimalna temperatura lista od 24°C. Lin i sur. (2017) pokazali su da doprinos transpiracije i strukture lista u regulaciji temperature nije potpuno jasan, te da su važne i klimatske prilike u kojima vrsta raste. Nadalje, Still i sur. (2022) navode da su listovi u različitim šumskim ekosustavima bili sustavno topliji od okolne temperature zraka tijekom dana kada se i odvija većina fotosinteze.

2.1.2. Uloga transpiracije na razini ekosustava

Transpiracija je ključni čimbenik u odnosu tlo-biljka-atmosfera, koji opisuje kretanje vode iz tla, kroz biljku u atmosferu. Ovaj proces je kritičan za ciklus vode i ugljika, te utječe na vremenske obrasce i klimu doprinoseći razini atmosferske vlage (Bernacchi i VanLooche, 2015).

Za razumijevanje transpiracije potrebno je promotriti procese isparavanja (evaporacije) i evapotranspiracije jer su međusobno povezani (Slika 3). U sljedećim odlomcima ovi su procesi pojašnjeni, s naglaskom na procese u šumama.



Slika 3. Shematski prikaz evapotranspiracije koju čine isparavanje iz tla, transpiracija i površinsko isparavanje. Preuzeto i prilagođeno iz: <https://www.gleam.eu/>

Isparavanje (evaporacija)

Isparavanje, proces u kojem se voda iz tekućeg stanja pretvara u vodenu paru (evaporacija), događa se na različitim površinama poput jezera, tla i vegetacije, prvenstveno potaknuta sunčevim zračenjem i temperaturom zraka. Kako isparavanje napreduje, okolni zrak postaje postupno zasićen vodenom parom, što usporava proces koji može prestati ako se vlažni zrak ne prenese u atmosferu. Zamjena zraka zasićenog vlagom s nezasićenim zrakom uvelike ovisi o brzini vjetrova.

Na isparavanje iz tla utječu čimbenici kao što su zasjenjenost krošnjom i dostupna voda, uz česte kiše ili navodnjavanje koji održavaju razinu vlage u tlu. Međutim, produljeni intervali između padalina mogu dovesti do smanjene vlažnosti tla i smanjene stope isparavanja, naglašavajući kritičnu ulogu dostupnosti vode u dinamici isparavanja tla. Kada se smanji opskrba površine tla vodom, isparavanje se brzo smanjuje i može potpuno prestati unutar nekoliko dana (Allan i sur., 1998).

Evapotranspiracija

Evapotranspiracija (ET) je ukupna količina vode koja se prenosi s kopna u atmosferu, uključujući isparavanje s tla i vodenih površina (E) i transpiraciju biljaka (T).

Evapotranspiracija iznad kopnenih površina je ključna varijabla u ciklusu vode, kruženju energije, klimi i protoku ugljika, što je čini važnim pokazateljem funkcija i zdravlja ekosustava. Na globalnoj razini, evapotranspiracija vraća više od 60 % oborina iznad kopna natrag u atmosferu. Ostatak oborina s kopna otječe u oceane i isparavanjem iznad njih se vraća u atmosferu. Ovaj proces predstavlja važno ograničenje dostupnosti vode na kopnenoj površini (Oki i Kanae, 2006).

U literaturi se spominju tri oblika evapotranspiracije: stvarna, potencijalna i referentna evapotranspiracija. Potencijalna evapotranspiracija (PET) je modelirana evapotranspiracija i koristi se kad nije moguće mjeriti stvarnu evapotranspiraciju (ET). Pretpostavka za potencijalnu evapotranspiraciju je neograničena dostupnost vode u tlu, tj. maksimum vode koja može biti prenesena iz tla i vegetacije u atmosferu uzimajući u obzir čimbenike kao što su temperatura i brzina vjetra. Kada se potencijalna evapotranspiracija mjeri iznad referentne površine (npr. kod meteorološke stanice ili iznad homogene vegetacije), ona se naziva referentna evapotranspiracija (ET_0). Izraz referentna evapotranspiracija preferiran je u odnosu na potencijalnu evapotranspiraciju, a u literaturi se najčešće koristi za poljoprivredne površine (Allan i sur., 1998).

Najčešće primjenjivane metode za mjerenje brzine evapotranspiracije su BREB (Bowenov omjer mjerene topline i latentne topline) i EC (vrtložna koleracija, eng. eddy correlation). Ove metode primjenjive su na topografski homogenim područjima. Moguće je koristiti i meteorološke varijable za računanje brzine evapotranspiracije, primjerice Penman-Monteith kombinirana jednadžba ili Priestley-Taylor aproksimacija (Pauwels i Samson, 2006). EC metoda, iako najpreciznija jer mjeri kretanje vjetra, protok vodene pare i topline, koristi se na tornjevima iznad promatranog područja, ali senzori postaju nepouzdana tijekom kiše i rose te je ograničena na područje na kojem je postavljen toranj (Shi i sur., 2008).

Evapotranspiracija je važan čimbenik u kopnenom ciklusu vode, utječe na lokalne i regionalne klimatske obrasce i ključna je za održavanje produktivnosti ekosustava. Omjer recikliranja vode koja se nalazi u evapotranspiraciji i vraća se kao oborina je ukupno 1 na globalnoj razini tj. voda koja dospijeva evapotranspiracijom u atmosferu na globalnoj razini vraća se u potpunosti kao oborina na kopno i more. Na manjim prostornim skalama omjer se kreće od 0, što znači da lokalna evapotranspiracija ne pridonosi oborinama, do

1, što znači da sve oborine dolaze od evapotranspiracije. Transpiracija je važna kao najveća komponenta evapotranspiracije i čini 46 - 76 % globalne evapotranspiracije iznad kopna te pokazuje koliko je velik utjecaj kopnenih ekosustava na atmosferske procese (Bernacchi i VanLoocke, 2015; Schlesinger i Jasechko, 2014). Globalne vrijednosti transpiracije i evapotranspiracije koriste se za procjenu vodnih resursa, pokretanje hidroloških modela riječnih slivova, proučavanje globalne klime i validaciju klimatskih modela (Bittencourt i sur., 2023).

Modeli evapotranspiracije na regionalnoj razini variraju u procjenama omjera T/ET, odnosno koliko transpiracija pridonosi ukupnoj evapotranspiraciji. Ta nesigurnost procjene ograničava sposobnost modela da kvantificiraju utjecaj manjka padalina i promjene pokrova zemljišta na evapotranspiraciju (Wang i Dickinson, 2012). Stvarna evapotranspiracija usjeva može se razlikovati od referentne zbog nepovoljnih uvjeta kao što su prisutnost štetnika i bolesti, zasoljenost tla, niska plodnost tla, nedostatak vode ili prevelika zasićenost vodom, što opet može rezultirati smanjenjem stope evapotranspiracije ispod očekivane (Allan i sur., 1998).

Kada je vegetacija niska i rijetka, prevladava isparavanje, dok kod dobro razvijene vegetacije transpiracija postaje dominantna. Primjerice, prilikom sjetve usjeva, gotovo 100 % evapotranspiracije ($T/ET=0$) dolazi od isparavanja, dok kod potpune pokrivenosti usjeva transpiracija čini više od 90 % evapotranspiracije ($T/ET = 0,9$) (Allan i sur., 1998).

U šumama umjerenog pojasa istraživanja udjela transpiracije u evapotranspiraciji uključivala su 21 studiju šuma vrba i topola u Češkoj ($T/ET = 0,8$ u vegetacijskoj sezoni, $T/ET = 0,1$ izvan vegetacijske sezone) (Fischer i sur., 2013). Nadalje, Čermák i sur. (1982) su također došli do sličnih rezultata u vegetacijskoj sezoni za šume hrasta lužnjaka u Češkoj gdje je transpiracija činila 80 % evapotranspiracije. Nalevanková i sur. (2020) proučavali su vezu između transpiracije bukve, okolišnih uvjeta i deficita vode u tlu. Transpiracija bukve od svibnja do rujna dosegla je 59 % evapotranspiracije u 2014. i 46 % u 2015. Sezonska dinamika T/ET šuma umjerenog pojasa u Kini bila je uvjetovana nizom čimbenika kao što su promjene indeksa lisne površine (leaf area index - LAI), deficitom tlaka pare i temperaturom zraka (Zhu i sur., 2015), a iznosila je 0,6. U suhim područjima omjer T/ET iznosio je oko 0,5 a u tropskim šumama 0,7 (Schlesinger i Jasechko, 2014). Scott i sur. (2006) opazili su da je srednja vrijednost T/ET za grmlje u stepskoj klimi

Arizone od srpnja do listopada 0,58, dok je u vrhu vegetacijske sezone ta vrijednost porasla na oko 0,7. Navedeni omjeri T/ET u skladu su s rezultatima studija koje pokazuju da transpiracija čini većinu (46 - 76 %) globalne evapotranspiracije (Schlesinger i Jasechko, 2014; Wei i sur., 2017) s naznakom da su vrijednosti veće u šumama umjerenog pojasa Europe.

Utjecaj temperature i vode na transpiraciju

Temperatura zraka i dostupnost vode smatraju se glavnim čimbenicima koji oblikuju globalne biome, pri čemu je suša najveće ograničenje produktivnosti ekosustava. Bernacchi i VanLoocke (2015) uočili su da ako je prosječna godišnja temperatura bila ispod određenog praga, oborine u šumskim ekosustavima imale su mali utjecaj na ciklus ugljika u ekosustavu. Obrnuto, utjecaj temperature bio je značajan ako je oborina bila ispod određenog praga. U australskim mediteranskim šumama, transpiracija i fotosinteza bile su linearno vezane do temperature zraka od 35°C, nakon čega su se ovi procesi razdvojili - transpiracija se povećala, a fotosinteza smanjila zbog osjetljivosti samog procesa na povišene temperature (Krich i sur., 2022).

Klimatske promjene i transpiracija

Nedavne studije pokazuju da klimatske promjene utječu na povećavanje važnosti vegetacije u globalnom protoku vode jer biljke utječu na ekstremne vrućine regulacijom vode i energije između tla i atmosfere.

Uslijed povećanja koncentracije CO₂ u atmosferi, on postaje dostupniji biljkama čime se povećava učinkovitost fotosinteze i povećanje produkcije biomase. Takvo povećanje produktivnosti se naziva CO₂ fertilizacija. Hipoteze sugeriraju da će zbog povećanja koncentracije CO₂ u atmosferi doći do povišenog ugrađivanja ugljika i posljedično povećanja površine listova. Dodatno, procjenjuje se da je CO₂ fertilizacija usporila očekivani porast koncentracije atmosferskog CO₂ uzrokovanog emisijama iz industrije jer je došlo do značajnih promjena u neto bazenu ugljika između 1981. i 2020., a učinkovitost ukupne globalne fotosinteze povećala se za $13,5 \pm 3,5\%$ (Keenan i sur., 2023). S druge strane, zatvaranje puči i smanjenje njihove provodljivosti zbog povećanih koncentracija CO₂ će ograničiti površinsko hlađenje isparavanjem, što može dovesti do povišenja ljetnih prosjeka temperature i ekstremnih temperatura, a područja s vegetacijom bilježiti će učestaliju pojavu toplinskih valova (Skinner i sur., 2018). Najveće smanjenje

transpiracije ljeti, a time i povećanje pojavnosti toplinskih valova, očekuje se u tropskim područjima i područjima s gustim sklopovima krošnji na srednjim do visokim geografskim širinama. S druge strane, područja u toplim, poluvlažnim i vlažnim klimama gdje je voda dominantni čimbenik rasta, imat će stalno povećanje transpiracije (Skinner i sur., 2018).

Učinkovitost korištenja vode

Bernacchi i VanLoocke (2015) predviđaju da će rastuće koncentracije CO₂ u atmosferi značajno smanjiti stopu gubitka vode po jedinici fotosintetski asimiliranog ugljika i povećati učinkovitost korištenja vode (UKV) (eng. water use efficiency, WUE) u kopnenim ekosustavima. Definicija učinkovitosti korištenja vode varira prema vremenskoj gdje postoje trenutna, integrirana, intrinzična UKV, te strukturalnoj razini na razini lista, krošnje, ekosustava, bioma. Na razini krošnje, trenutni UKV je omjer bruto primarne proizvodnje i transpiracije, a integrirani UKV omjer ukupne biomase i evapotranspiracije (Xiaoliang Lu i sur., 2018; Vadez i sur., 2014). Na razini ekosustava, trenutni UKV je omjer neto razmjene ekosustava i evapotranspiracije (Bernacchi i VanLoocke, 2015).

Međutim, povećanje UKV-a će vjerojatno biti kompenzirano istodobnim povećanjem atmosferskih temperatura i deficita zasićenosti zraka (Bernacchi i VanLoocke, 2015). Cao i sur. (2010) predviđaju da će fiziološki učinak povećavanja atmosferskog CO₂ na kopnene biljke povećati temperaturu zraka za oko 0,4°C, te uz radijativni učinak CO₂ doprinijeti globalnom zagrijavanju.

2.1.3. Metode procjene transpiracije

Stephen Hales je već 1727. istraživao transpiraciju u svojoj knjizi 'Vegetable Staticks', u kojoj je opisao različite eksperimente kojima je proučavao protok vode i ksilemskog soka u biljkama (Cohen, 1976). Primjerice, koristio je manometre pričvršćene na odrezane ogranke vinove loze i pratio promjenu tlaka u početku vegetacijske sezone. Mjerio je i koliko vode drvo stablo kad je uronjeno u vodu, te usporedio sa stablom bez krošnje i s krošnjom uronjenom u potpunosti u vodu čime je potvrdio da listovi (krošnja) imaju važnu ulogu u transpiraciji. Julius von Sachs je u 'Handbuch der Experimental-Physiologie der Pflanzen' iz 1865, nastavio s usavršavanjem aparata za mjerenje

transpiracije i naglašavao potrebu za kontroliranim uvjetima za izvođenje eksperimenta. Tijekom 20. stoljeća nastavljen je napredak u razvoju uređaja za praćenje transpiracije (potometri) (Knight i sur., 1981; Miller i Gates, 1967; Willis i sur., 1963).

2.1.3.1. Procjena transpiracije na osnovi dinamike protoka ksilemskog soka

Procjena transpiracije moguća je mjerenjem protoka ksilemskog soka (eng. sap flow) (Alarcón i sur., 2000). Postoji više različitih uređaja za praćenje protoka ksilemskog soka, a svi se temelje na mjerenju promjene temperature u ksilemu nakon zagrijavanja. Najčešće se koriste senzori zasnovani na odvođenju topline (eng. thermal dissipation, TD), toplinskom uravnoteženju (heat balance, HB) i brzini toplinskog pulsa (heat pulse velocity, HPV). Metode koje se baziraju na mjerenju odvođenja topline i toplinskog uravnoteženja zahtijevaju kontinuirano zagrijavanje elektroda, dok metode bazirane na mjerenju brzine toplinskog pulsa koriste periodično zagrijavanje elektroda za mjerenje brzine toka (Čermák i sur., 2004; Edwards i sur., 1997; Forster, 2017; Kučera, 2023).

Pri procjeni transpiracije na razini sastojine ili šume, važno je uzeti u obzir broj, veličinu i vrstu stabala (Čermák i sur., 2004). Dodatno, procjena brzine transpiracije u kratkim vremenskim intervalim, na razini sata ili manje, može biti precijenjena jer biljka koristi vodu u fiziološkim procesima (Forster, 2017). S druge strane, Kučera i sur. (2017) koristili su Penman-Monteith jednadžbu za procjenu transpiracije krošnje i pojednostavili je tako da je za dulja vremenska razdoblja (24 h) transpiracija sastojine jednaka protoku ksilemskog soka.

Vezano za hrast, Čermák i sur. (1982) izvijestili su da odrasli hrast lužnjak, u uvjetima neograničene zalihe vode u tlu, može transpirirati do 400 kg vode dnevno, odnosno 39.000 kg u sezoni, uz karakteristične dnevne krivulje protoka s maksimumom u podne. Pietras i sur. (2016) proučavali su protok transpiracije kod sadnica i mladica hrasta kitnjaka (*Quercus petraea* L.) i zaključili da mladice imaju veći dnevni protok transpiracije od sadnica (0,5 kg u odnosu na 0,2 kg). Vannasche (2011) je mjerio protok ksilemskog soka kod jednog stabla hrasta kitnjaka u razdoblju od 1977. do 1978. i zatim 30 godina kasnije, te je primijetio varijacije u prosječnom protoku i povećanje

provodljivosti puči u jutarnjim satima tijekom sušnog razdoblja te noću nakon kiše, uz zatvaranje puči u podne radi sprječavanja gubitka vode.

Na dnevnoj skali, kada je vlaga u tlu neograničena, protok ksilemskog soka normaliziran s površinom lista linearno je povezan s referentnom evapotranspiracijom (Forster, 2021). Gan i sur. (2021) koristili su ukupnu evapotranspiraciju kao neizravnu mjeru za transpiraciju pod uvjetom visoke pokrivenosti vegetacije kad je minimalno isparavanje iz tla.

Vremenski pomak između transpiracije lista i protoka ksilemskog soka događa se kod stabala koja mogu skladištiti velike količine vode (Čermák i sur., 2004; Granier i sur., 1996). Na primjer, američka duglazija (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) skladištila je oko 20 % dnevnog protoka transpiracije, uglavnom u deblu i manje u krošnji, a ksilemskom soku trebalo je oko 3 sata da dođe od baze debla to vrha izdanaka. Najveća transpiracija događala se upravo u krošnji zbog djelovanja vjetra, veće solarne radijacije i negativnog vodnog potencijala (Čermák i sur., 2007). Kad su se radijacija, vlažnost zraka i deficit zasićenosti zraka vodenom parom promatrali u intervalima od -60 min do +40 minuta u odnosu na transpiraciju, činili su 73 % njene varijabilnosti u sastojinama bukve. Intervali pomaka su se smanjivali s duljinom trajanja suše u tlu (Nalevanková i sur., 2020). Pomak između protoka ksilemskog soka i transpiracije od 60 minuta za hrast kitnjak i 90 minuta za šumski bor (*Pinus sylvestris* L.) objašnjavao se većim kapacitetom izmjene vode kod četinjača nego kod listopadnih vrsta (Granier i sur., 1996). Herbst i sur. (2007) pratili su gustoću protoka ksilemskog soka kod jasena (*Fraxinus excelsior* L.) i javora (*Acer campestre* L.) te su zaključili da je vremenski pomak evapotranspiracije u odnosu na transpiraciju bio specifičan prema vrsti tj. jedan sat za jase i dva sata za javor.

Skaliranje izmjerene transpiracije s razine stabla na razinu sastojine

Mjerenje protoka ksilemskog soka i posljedično transpiracije moguće je provoditi na razini stabla, sastojine, pa čak i do regionalne razine (Granier i sur., 1996). Martin i sur. (1997) pojašnjavali su načine mjerenja transpiracije, te naveli da je jedan od češćih pristupa promatranje na razini sastojine, pri čemu je potrebno zadovoljiti aerodinamičke uvjete koji uključuju vrtložnu korelaciju i Bowenov omjer. Nasuprot tome, moguće je bilo mjeriti transpiraciju i na individualnim stablima u sastojini te potom ekstrapolirati

podatke kako bi se dobila transpiracija sastojine. Prednosti ovog pristupa bile su što ne treba biti pretpostavki o topografiji okoliša da bi se utvrdio izvor vodene pare jer se protok transpiracije mjerio direktno. Nadalje, mjerenja se provode neovisno o vremenskim uvjetima i nisu ograničena na “dobre” dane (optimalna osunčanost, vlaga zraka, jačina i smjer vjetra itd.). Na kraju, mjerenje transpiracije na pojedinačnim stablima otkrivalo je funkcionalne doprinose različitih klasa stabala unutar miješane sastojine.

Nalevanková i sur. (2020) su u svom istraživanju koristili uređaj koji se temeljio na metodi toplinskog uravnoteženja za mjerenje protoka ksilemskog soka na stablima bukve i izračunali protok transpiracije koristeći opseg bjeljike (prsni opseg stabla umanjen za debljinu kore i floema). Zatim su izračunali prosječni protok transpiracije, u uvjetima dovoljne količine vode u tlu, za sve klase prsnih promjera koristeći regresiju na izmjerenim protocima transpiracije na uzorkovanim stablima. Paloschi i sur. (2021) normalizirali su gustoću protoka ksilemskog soka i potom je prenijeli na razinu sastojine uzimajući u obzir površinu bjeljike i njezin relativni doprinos ukupnoj površini za svaku vrstu. Površina bjeljike određena je pomoću poprečnih isvrđanih i obojenih uzoraka, na kojima su identificirane površine srčike i kore, koje su zatim oduzete od ukupne površine presjeka stabla (tzv. temeljnica).

2.1.3.2. Procjena transpiracije metodama daljinskog motrenja

Razvitkom tehnologije, osim procjene transpiracije na osnovi protoka ksilemskog soka, pojavile su se i metode daljinskog motrenja. One uključuju mjerne tornjeve (koji mjere i evapotranspiraciju i isparavanje iz tla) i satelitske snimke.

Daljinska istraživanja su danas ključan skup metoda za procjenu i praćenje transpiracije na velikim područjima. Daljinsko motrenje ili daljinska istraživanja (eng. remote sensing) je skup tehnika i metoda prikupljanja informacija o zemljištu, vegetaciji i drugim objektima na Zemlji iz daljine, obično uz pomoć satelita ili letjelica. U biologiji, daljinsko motrenje se koristi za praćenje ekoloških procesa, kao što su promjene u pokrovu zemljišta ili Zemljine površine, rast i razvoj biljaka, te dinamika populacija i staništa (Almalki i sur., 2022). Ova tehnologija omogućuje znanstvenicima praćenje promjene u

biljnom svijetu na različitim prostornim i vremenskim skalama, što je ključno za razumijevanje ekosustava.

Primjene daljinskog motrenja u biologiji su široke i među ostalim obuhvaćaju promatranje i praćenje deforestacije (Hansen i sur., 2013; Mitchell i sur., 2017; Ortega Adarme i sur., 2022), biomase (Battude i sur., 2016; Lu i sur., 2016), procjenu stanja i promjene staništa (X.-P. Song i sur., 2018; Yang i Huang, 2021) i analizu utjecaja klimatskih promjena na ekosustave (Hersbach i sur., 2020; Hussain i sur., 2022).

Daljinska istraživanja pružaju dragocjene podatke o biološkim procesima na lokalnoj, regionalnoj i globalnoj razini i tako doprinose očuvanju prirode i održivom upravljanju ekosustavima.

Kod korištenja daljinskog motrenja bitno je uzeti u obzir tip senzora, vremensku i prostornu rezoluciju snimki i njihovu dostupnost. Za praćenje vegetacije optičkim sensorima moguće je koristiti multispektralne i hiperspektralne snimke. Hiperspektralne snimke sadrže relativno više podataka i omogućuju izradu boljih modela za transpiraciju, evapotranspiraciju i evaporaciju (Marshall i sur., 2016), no nisu široko dostupne i nemaju uvijek kontinuitet mjerenja. Mnoge snimke su dostupne u obrađenom obliku, npr. već je na njima pružatelj podataka napravio georektifikaciju i atmosfersku korekciju, primjerice L2A razina Sentinel-2 snimki. Postoji i viša razina naknadne obrade satelitskih snimaka kao što je MOD16A2GF produkt temeljen na MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) snimkama i razvijenim modelom za procjenu evapotranspiracije (Mu i sur., 2013) ili TROPOSIF produkt temeljen na podacima senzora TROPOMI i razvijenim modelom za dohvaćanje suncem inducirane fluorescencije (SIF)(Guanter i sur., 2021).

Transpiracija se daljinskim motrenjem često istraživala na različitim tipovima usjeva zbog boljeg planiranja navodnjavanja te odabira i rasporeda kultura. Pošto je transpiracija zajedno s evaporacijom dio ukupne evapotranspiracije, a daljinskim motrenjem se dobivaju snimke iznad visine vegetacije, razdvajanje komponenti evapotranspiracije predstavlja izazov jer su signali transpiracije i evaporacije izmiješani.

Primjeri istraživanja omjera transpiracije i evapotranspiracije uključuju snimke kineskog satelitskog sustava Huan Jin (HJ-1A i HJ-1B) iznad poljoprivrednih područja u Kini (Yu i Shang, 2020), MODIS snimke koje su koristile indeks SAVI (eng. Soil-Adjusted

Vegetation Index) iznad ozime pšenice za procjenu regionalne transpiracije usjeva (Li i sur., 2013) i termalne infracrvene snimke bespilotnih letjelica za procjenu transpiracije iznad usjeva kukuruza (Hou i sur., 2021).

U posljednje vrijeme, kao alternativa indeksa SAVI (neizravne mjere za transpiraciju), indeksi EVI (eng. Enhanced Vegetation Index) i NDVI (eng. Normalized Difference Vegetation Index) su se počeli šire upotrebljavati zbog smanjene osjetljivosti na učinke atmosfere odnosno na tip tla i saturaciju signala u gustim krošnjama (Huete i sur., 2002; Marshall i sur., 2016). Iako se transpiracija daljinskim motrenjem najčešće istraživala na usjevima, principe je moguće primijeniti i na druge površine. U šumskim staništima, studije koje su proučavale transpiraciju daljinskim motrenjem koristile su i terenski mjerene protoke ksilemskog soka za njenu procjenu. Tako su snimke misije KR 1 (Kent Ridge 1), mikrosatelita kojem je namjena promatranje i praćenje kriznih situacija na području Azije (Hashimoto i sur., 2023) korištene za procjenu transpiracije nasada čempresa. Zaključili su da površina bjeljike značajno utječe na transpiraciju, a koristili su i indeks za oborine koji je predstavljao vlažnost površine kojim se model za procjenu transpiracije poboljšao. Satelitske snimke senzora ECOSTRESS (ECOsysteM Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station) koristile su se u objašnjavanju varijacija u protoku ksilemskog soka u šumama hrasta medunca i običnog bora u Francuskoj (Frear, 2021). Snimke MODIS i Sentinel-2 senzora korištene su za usporedbu protoka ksilemskog soka u suhim šumama Brazila (Paloschi i sur., 2021).

Snimke senzora MODIS su se koristile i za praćenje odnosa transpiracije i evapotranspiracije, te njihove prostorno-vremensko dinamike na području s različitim staništima, među ostalim i obalne šumske vegetacije (Song i sur., 2018). Transpiracija šumskih sastojina umjerenih i subarktičkih regija procijenjena je pomoću fotokemijskog indeksa PRI (eng. Photochemical Reflectance Index) koji predstavlja normaliziranu razliku vrijednosti u kanalima na 529 nm i 569 nm) korištenjem snimki senzora CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectroradiometer) (Hilker i sur., 2013).

Satelitsko mjerenje Suncem inducirane fluorescencije

Novija istraživanja pokazala su da je transpiracija usko povezana sa suncem induciranom fluorescencijom klorofila (SIF) (Damm i sur., 2021; Maes i sur., 2020; Martini, 2022). Sunčevu svjetlost koju apsorbira klorofil biljke koriste za fotosintezu, no dio energije se

rasipa kao toplina, a dio se ponovo emitira kao svjetlost duljih valnih duljina, u crvenom području vidljivog dijela spektra, tj. kao SIF. Posebne tehnike daljinskih istraživanja kojima je moguće izmjeriti SIF mogu pružiti relevantne informacije o stvarnom fotosintetskom kapacitetu biljaka, povezujući mehanizam na molekularnoj razini u listu s globalnim fenomenima i ciklusima na razini planeta (Mohammed i sur., 2019).

SIF je do sada korišten u različitim studijama za poboljšanje daljinskih procjena bruto primarne proizvodnje (eng. gross primary production - GPP) (Damm i sur., 2015; Zhan i sur., 2022) za rano otkrivanje stresa (Cendrero-Mateo i sur., 2015; Zarco-Tejada i sur., 2018), te za proučavanje dinamike vegetacije u različitim klimatskim zonama (Luus i sur., 2017; Mengistu i sur., 2021; Turner i sur., 2020).

Tijekom posljednjih godina satelitske misije s grubom prostornom rezolucijom (npr. GOSAT: promjer 10 km, OCO-2: $1,29 \times 2,25 \text{ km}^2$, OCO-3: $1,6 \times 2,2 \text{ km}^2$, TROPOMI: $3,5 \times 7,5 \text{ km}^2$) korištene su za izradu globalnih karata SIF-a (Doughty i sur., 2022; Guanter i sur., 2021). Očekuje se da će mjerenje neizravne mjere (eng. proxy) za procjenu fotosinteze poboljšati procjenu transpiracije na razini krošnje (Shan i sur., 2021). Primjerice, indeks NIRv odnosno refleksija vegetacije blisko infracrvenog zračenja je u jakoj korelaciji sa SIF-om i procjenama GPP-a na lokalnoj i globalnoj razini (Badgley i sur., 2017). Ovaj indeks moguće je dobiti putem satelitskih snimki senzora Sentinel-2, Landsat 8, Landsat 9, MODIS i sličnih koji snimaju u crvenom i blisko infracrvenom spektralnom kanalu.

U šumama eukaliptusa manje gustoće istraživane su korištenjem snimki Sentinel-2 i LiDAR za strukturu vegetacije (Gao i sur., 2024). U tom istraživanju kao najprikladnija neizravna mjera za SIF pokazao se blisko infracrveni kanal NIR (740 nm) koji je objasnio 85 % varijacije transpiracije na razini sata i 93 % na mjesečnoj razini.

Jin i sur. (2023) su u svojoj studiji za aproksimaciju transpiracije suptropske vegetacije koristili meteorološke podatke i produkt GOSIF generiran iz senzora OCO-2 (orbitalni sustav za praćenje ugljika) te MODIS. Relativni doprinos vlažnosti tla promjeni transpiracije bio je oko pet puta veći nego doprinos deficita zasićenosti zraka vodenom parom.

SIF dobiven iz TROPOMI senzora postavljenog na Copernicus Sentinel-5P satelitu se uspješno koristio za usporedbu s mjerenim podacima transpiracije krošnje na usjevima

(Shan i sur., 2021). Dodatno, SIF izmjeren u daleko-crvenom spektru je bio točniji od onog u crvenom spektru produkta TROPoSIF (modeliran na podacima TROPOMI) (Du i sur., 2023).

Lu i sur. (2018) koristili su SIF i različite kombinacije spektralnih duljina SIF-a za procjenu transpiracije u šumi američke bukve, crvenog hrasta i crvenog javora u SAD-u. Budući da puči reguliraju i unos CO₂ i gubitak vodene pare u atmosferu, transpiracija i bruto primarna proizvodnja (BPP, eng. Gross Primary Product - GPP) su sinkronizirani, a njihov odnos se obično naziva učinkovitost korištenja vode (UKV = BPP/T). Biokemijska svojstva lista i struktura biljke kontroliraju SIF i fotosintezu (koja se mjeri i preko BPP-a), no Maes i sur. (2020) su uočili da je odnos SIF i transpiracije određen temperaturom zraka i UKV.

S druge strane, Damm i sur. (2021) proučavali su vezu SIF i transpiracije u mješovitim šumama u Švicarskoj i uočili da je ta veza izgledno ko-varijacija s drugim okolišnim čimbenicima, s naglaskom na neto zračenje i LAI. To upućuje na to da procjena transpiracije samo pomoću SIF smanjuje njenu vremensku i prostornu robusnost i da je potrebno uzeti u obzir i druge okolišne čimbenike. Martini (2022) je zabilježio da se u stresnom periodu transpiracija mogla predviđati procesima kao što su nefotokemijsko gašenje, što predstavlja višak energije svjetla koja se raspršuje iz biljke kao toplina, te sa SIF. U istoj studiji, u periodu kada nije bio prisutan stres, APAR (apsorbirana fotosintetski aktivna radijacija) i temperatura površine najbolje su previđali transpiraciju. Zaključio je da se buduće studije trebaju usredotočiti na razumijevanje uvjeta i tipova ekosustava u kojima se SIF može koristiti za predviđanje transpiracije, jer njihova povezanost još uvijek nije dovoljno istražena.

2.2.Spačvanska šuma

Šume su globalno važne jer pružaju ključne koristi koje ljudi imaju od zdravih ekosustava, tzv. usluge ekosustava. Osim opskrbnih usluga kao što su izvori sirovina, one pružaju i niz važnih regulacijskih usluga kao što su skladištenja ugljika, bioraznolikost staništa i regulaciju klime. Ipak, unatoč svojoj važnosti, izložene su degradaciji zbog ljudskih aktivnosti.

Spačvanska šuma je izuzetno važno područje koje obuhvaća raznolika nizinska staništa, s hrastom lužnjakom kao dominantnom vrstom šuma koje čine 96 % ukupne površine. Smještena između rijeka Save i Dunava, te njihovih pritoka, ovo područje predstavlja jedan od najvećih kompleksa nizinskih lužnjakovih šuma u Europi, protežući se na 40.000 ha. Dodatno se oko 10.000 ha ove šume nalazi na području Srbije. Površina šumske cjeline predstavlja jednu petinu svih lužnjakovih šuma u Republici Hrvatskoj, što govori o veličini, ekološkoj, hidrološkoj i gospodarskoj važnosti spačvanskih šuma.

Geografski, Spačvanski bazen se nalazi na nadmorskim visinama od 77 do 90 m, s valovitom kotlinastom ravninom kroz koju teku brojni potoci. Ime kompleksa dolazi od središnje i najduže rijeke Spačve.

Spačva je zemljopisni pojam (a postoji i naselje tog imena) između Vrbanje, Bošnjaka i Lipovca. Znatno je površinski veća od drugih lokaliteta (Desičevo, Sočna, Radiševo itd.) pa se 40.000 ha čuvenih šuma hrasta lužnjaka iz tog područja označava spačvanskom šumom.

U ovom radu, pod pojmom spačvanske šume uključila sam Biđ-Bosutsko šumsko područje i Spačvanski bazen. Oba područja pripadaju Panonskoj ravnici koja je u neogenu bila ispunjena Panonskim morem, a u pleistocenu je more potpuno nestalo.

Hrast lužnjak

Kvaliteta hrasta lužnjaka, dug vijek (ophodnja od 140 godina), visoka ekonomska vrijednost, sirovina za drvnu industriju te uloga u očuvanju biološke ravnoteže i ekoloških prilika, čine ga jednom od najcejenjenijih i najvažnijih vrsta drveća u hrvatskim šumama. Raste na vlažnim i bogatim tlima do 700 m nadmorske visine. Može dosegnuti visinu i do 50 m, s prsnim promjerom do 2,5 m i starosti do 2.000 godina. Krošnja je razgranata i široka, s jakim, nepravilnim i koljenasto savijenim granama (Dubravac 2020). Rasprostranjen je od Skandinavije na sjeveru do sjeverne Afrike na jugu, Engleske na zapadu do Urala i Kavkaza na istoku. U Hrvatskoj raste na području Save, Drave i Kupe, na nadmorskim visinama od 80 do 120 m, ali i na poplavnim dijelovima Ličkog, Imotskog, Sinjskog i Vrličkog polja, u porječju rijeke Mirne i u Omišaljском lugu (Krk). Na blago uzdignutim položajima redovito izvan utjecaja poplavnih voda (tzv. grede) dolazi s običnim grabom, a ponegdje i s bukvom. Na nižim mikro depresijama u kojima se poplavna ili oborinska voda dulje zadržava (tzv. nize), dolazi u zajednici s velikom žutilovkom, te je izmiješan najčešće s poljskim jasenom i crnom johom. Kad raste na osami, počinje rađati sjemenom oko 50. godine starosti, kad je u sastojini onda rađa u starosti 20 do 30 godina, a u panjači već oko 20. godine starosti (Dubravac i sur., 2020).

Stresni čimbenici

O sušenju hrasta postoje podaci još iz 1909. godine zbog napada pepelnice (Petračić 1926 prema Dubravac i Dekanić, 2009). Sušenje je složen proces s različitim stanišnim i biotskim čimbenicima, koji mogu biti kontinuirani, iznenadni i terminalni (patogeni) (Dubravac i Dekanić, 2009). Tikvić i sur. (2009) navode da je zbog sušenja lužnjaka došlo do gubitka 40 % potencijalne tržišne vrijednosti drva, no dolazi i do propadanja ksilema i smanjenja promjera sastojine i do 33 %. Cestarić i sur. (2017) usporedili su istraživanja i ustanovili da je u 40 godina (od 1970. do 2008.) došlo do značajne promjene strukture vrsta, izraženo u povećanju onih koje nisu tolerantne na poplave i smanjenju poplavnih vrsta, među njima i lužnjaka. Ovo su objasnili smanjenjem učestalosti poplava zbog izgradnje nasipa, snižavanjem razine podzemnih voda i klimatskim promjenama. Također navode da se zbog smanjenja broja stabala hrasta lužnjaka smanjila i voda korištena za transpiraciju, koja zaostaje na području i povećava vlažnost.

Smanjivanje stupca vode na području spačvanske šume istraživalo se od 1996. do 2012. (Dubravac i sur., 2020; Nemeš i Dekanić, 2013). Prosječno trajanje zasićenosti tla vodom padalo je u mjerenom 16-godišnjem razdoblju, uz izuzetke godina koje su imale ekstremnu količinu oborina s visokim stupcem podzemnih voda. Uočeno je i da je u izrazito sušnim godinama dolazilo do izostanka vode u sloju rizosfere (0-250 cm) što upućuje na pojačanje djelovanja klimatskih promjena i učestalosti temperaturnih ekstrema. Posljedica suša bile su i češće sječe, pa su se pojedini dijelovi šume sjekli pet puta češće od uobičajenog, što je ekonomski i ekološki neodrživo.

Sever i sur. (2023) su istraživali utjecaje suše i razine dušika na fotosintezu, prirast, visinu i masu žira hrasta lužnjaka u spačvanskoj šumi. Urod žira ovisio je o vitalnosti krošnje, a starije sastojine imale su najveći urod, no i to se smanjivalo s povećanjem starosti (Gradečki-Poštenjak i sur., 2011).

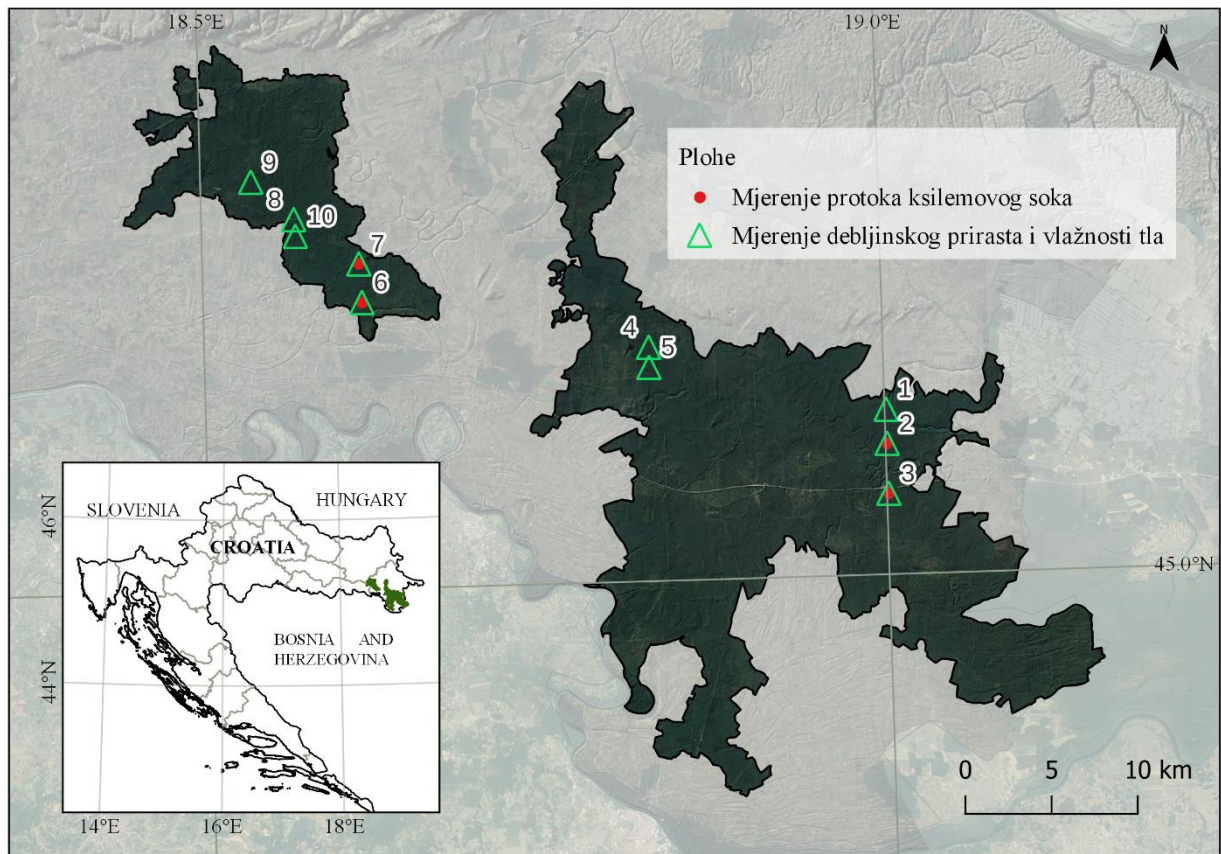
Od 2013. prisutna je i invazivna hrastova mrežasta stjenica (*Corythucha arcuata*, Say 1832) koja uzrokuje štetu na krošnjama (Hrašovec i sur., 2013). Kern i sur. (2021) koristili su MODIS snimke u Spačvanskom bazenu kako bi pratili njeno širenje od 2013. do 2019. Istraživanja koja koriste daljinsko motrenje radili su Seletković i sur. (2011) gdje su istraživali mogućnost korištenja IKONOS satelitskih snimki u Spačvi za potrebe šumarskih izmjera, dok su Balenović i sur. (2017) koristili aviosnimke i izrađene digitalne modele visine krošnje.

3. MATERIJALI I METODE

3.1. Područje istraživanja

Spačvanska šuma nalazi se većim dijelom u Vukovarsko-srijemskoj županiji, te manjim dijelom u Brodsko-posavskoj i Osječko-baranjskoj županiji (SZ: 45,27; 18,49; JI: 44,94; 19,11). Smještena je između rijeka Save i Dunava u porječju rijeke Bosut i njenih pritoka. U okviru ove disertacije, pod pojmom spačvanske šume uključila sam, uz Spačvanski bazen, i Biđ-Bosutsko šumsko područje. Ukupna površina područja spačvanske šume iznosila je 55.243 ha. Klima na ovom području izrazito je kontinentalna, s prosječnom godišnjom temperaturom od 11,1°C. Najtopliji mjesec je srpanj (prosječno 21,7 °C), a najhladniji siječanj (prosječno -0,5 °C). Prosječna mjesečna oborina je 57,7 mm, s najvećim prosjekom u lipnju (82,1 mm). U srpnju je prosječno najveći ukupan broj osunčanih sati (279 h) (podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda za postaju Osijek i za razdoblje 1899.-2022.). Srednja godišnja oborina na postaji Osijek za razdoblje 2014.-2020. bila je 696 mm. Langov kišni faktor računa se kao omjer srednje godišnje količine oborina i srednje godišnje temperature. Langov faktor je prema tome $F = 696/11,5 = 60,6$ što područje oko Osijeka i spačvansku šumu kategorizira između poluvlažne i umjereno tople kontinentalne klime.

Podaci za opseg debla i vlagu tla prikupljani su od veljače 2019. do prosinca 2020. na ukupno 10 ploha (na svakoj plohi 5 stabala, ukupno 50). Od toga je na 4 plohe na 20 stabala dodatno mjereno protok ksilemskog soka i postavljene su meteo-stanice za mjerenje temperature i vlažnosti zraka i konduktiviteta tla (Slika 4, Tablica 1)



Slika 4. Područje spačvanske šume s lokacijama ploha 2, 3, 6 i 7 na kojima je mjeren protok ksilemskog soka i gdje su postavljene meteo-stanice (mjerenje temperature zraka i tla, vlage zraka i tla) te dodatne plohe 1, 4, 5, 8, 9 i 10 na kojima je mjeren samo opseg stabala i vlaga tla.

Tablica 1. Podaci za plohe na kojima su se provodila mjerenja

PLOHA	Mjesto	HTRS96/TM		WGS84		mjerenje protoka ksilemskog soka	Nadmorska visina (m)
		E	N	λ	ϕ		
PL1	Lipovac	696896	4997054	19,0012	45,0861		81
PL2	Lipovac	696956	4995072	19,0012	45,0682	da	79
PL3	Lipovac	69705	4992176	19,0013	45,0422	da	80
PL4	Otok	683111	5000643	18,8276	45,1220		78
PL5	Otok	683136	4999482	18,8274	45,1116		80
PL6	Cerna	666475	5003238	18,6171	45,1495	da	83
PL7	Cerna	666295	5005476	18,6156	45,1697	da	81
PL8	Cerna	662511	5008048	18,5683	45,1937		82
PL9	Strizivojna	660020	5010219	18,5373	45,2138		82
PL10	Strizivojna	662611	5007075	18,5693	45,1849		81

Početni promjeri izmjereni 19.2.2019. za 20 stabala na kojima se mjerio protok ksilemskog soka na četiri plohe prikazani su tabelarno (Tablica 2).

Tablica 2. Podaci za stabla na plohama na kojima se mjerio protok ksilemskog soka izmjereni 19.2.2019.

Ploha	Stablo	početni promjer 2r (cm)	početni opseg (cm)
2	21	64,0	201
	22	61,5	193
	23	51,0	160
	24	53,5	168
	25	68,2	214
3	31	64,3	202
	32	85,0	267
	33	69,7	219
	34	60,8	191
	35	75,2	236
6	61	66,6	209
	62	75,8	238
	63	78,7	247
	64	55,1	173
	65	68,2	214
7	71	61,5	193
	72	43,6	137
	73	66,2	208
	74	60,2	189
	75	65,0	204

Područjem spačvanske šume gospodare Hrvatske šume d.d., na ukupno 5624 odjela i odsjeka kojima upravljaju Uprave šuma- podružnice Vinkovci (šumarije: Cerna, Gunja, Lipovac, Mikanovci, Otok, Strizivojna, Strošinci, Vinkovci, Vrbanja, Županja) i Osijek (šumarija Đakovo). Zatraženi su i dobiveni podaci Hrvatskih šuma iz osnova gospodarenja (struktura, površina, starost, produktivnost) za četiri odsjeka u kojima se nalaze plohe na kojima se mjerio protok ksilemskog soka (Tablica 3). Navedene godine podataka odnose se na završnu godinu u kojoj su se objedinili podaci za određeni odjel/odsjek prema njegovom planu gospodarenja, a radili su se za razdoblje od 10 godina. U praksi se podaci za odjele i odsjeke prikupljaju godinu dana prije godine završnog izvještaja za 10-godišnji period.

Tablica 3. Podaci izmjera iz šumskogospodarskih osnova Hrvatskih šuma za 10-godišnja razdoblja za odjele na kojima su provedena mjerenja protoka ksilemskog soka hrasta lužnjaka

PLOHA	PL2	PL3	PL6	PL7
Gospodarska jedinica	Narače	Topolovac	Banov dol	Banov dol
Šumarija	Lipovac	Lipovac	Cerna	Cerna
Odjel/odsjek	17a	8a	26c	10a
Površina [ha]	55,76	53,23	18,06	46,73
Općina	Nijemci	Nijemci	Cerna	Cerna
Sklop	nepotpun	nepotpun	nepotpun	nepotpun
Starost [god]	116	119	132	120
Razdoblje	2013.-2022.	2012.-2021.	2010.-2019.	2010.-2019.
Nadmorska visina [m]	79-80	78-80	83	81-83
Opis	Niza	Niza	Greda	Greda
Fitocenoza	Šuma hrasta lužnjaka s velikom žutilovkom-subasocijacija sa žestiljem	Šuma hrasta lužnjaka i velike žutilovke s rast.šašem	Šuma hrasta lužnjaka i običnoga graba-tipična subasocijacija	Šuma hrasta lužnjaka s velikom žutilovkom-subasocijacija sa žestiljem
Drvenaste vrste	lužnjak, p.jasen, o.grab, klen, vez	lužnjak, p.jasen, o.grab, klen, vez	lužnjak, p.jasen, o.grab, klen	lužnjak, p.jasen, o.grab, klen, vez
Ukupan broj stabala N/ha	315	209	338	221
Podaci za hrast lužnjak				
Broj stabala [N/ha]	113	79	73	85
Srednji promjer d [cm]	46,2	53,7	61,3	56,4
Sr.sast.visina h [m]	31,7	36,6	34,7	32,9
Temeljnica [m ² /ha]	18,95	17,98	21,54	21,18
Drvena zaliha [m ³ /ha]	312	343	399	365
Podaci za poljski jasen				
Broj stabala [N/ha]	135	40	16	31
Srednji promjer d [cm]	26,1	34,6	25,5	24,6
Sr.sast.visina h [m]	25,5	29,8	25	24,6
Temeljnica [m ² /ha]	7,25	3,75	0,82	1,46
Drvena zaliha m ³ /ha	89	54	10	17
Podaci za obični grab				
Broj stabala [N/ha]	18	73	158	18
Srednji promjer d [cm]	15,4	17,8	19,4	18,2
Sr.sast.visina h [m]	16,2	19,3	20,3	20
Temeljnica [m ² /ha]	0,34	1,81	4,65	0,47
Drvena zaliha [m ³ /ha]	3	19	49	5
Podaci za klen				

PLOHA	PL2	PL3	PL6	PL7
Broj stabala [N/ha]	14	3	62	31
Srednji promjer d [cm]	14,1	17,4	19,4	19,3
Sr.sast.visina h [m]	15	19	20,3	20,3
Temeljnica [m ² /ha]	0,22	0,06	1,82	0,91
Drvna zaliha [m ³ /ha]	2	1	19	9
Podaci za vez				
Broj stabala [N/ha]	25	11	/	31
Srednji promjer d [cm]	15,4	19,1	/	13,2
Sr.sast.visina h [m]	16,2	20	/	17,3
Temeljnica [m ² /ha]	0,46	0,31	/	0,31
Drvna zaliha [m ³ /ha]	4	1	/	3
Podaci za obično voće				
Broj stabala [N/ha]	10	4	/	/
Srednji promjer d [cm]	18,5	16,0	/	/
Sr.sast.visina h [m]	18,6	18,1	/	/
Temeljnica [m ² /ha]	0,27	0,08	/	/
Drvna zaliha [m ³ /ha]	3	1	/	/

Ploha 2



Slika 5. Ploha 2

Prema podacima Hrvatskih šuma, zemljište je blago valovito i obraslo gustim slojem grmlja. Slabo razvijenu podstojnu etažu čine grab (*Carpinus betulus* L.), klen (*Acer campestre* L.), vez (*Ulmus laevis* Pall.), drugo voće i žestilj (*Acer tataricum* L.), a u sloju prizemnog rašća javlja se kupina (*Rubus* sp.) i šaš (*Carex* sp.). U jugozapadnom dijelu odsjeka uz prosjeku se nalazi manja enklava poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl) na nižem terenu. Mješovita, jednoetažna, prirodna sjemenjača hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) u razvojnem stadiju starije sastojine, stablimične strukture, osrednjeg izgleda, srednje kakvoće (zakrivljena stabla), narušenog zdravlja i nepotpunog do rijetkog sklopa. Pet stabala na kojima se provodilo mjerenje protoka ksilemskog soka nalazilo se na samom istočnom kraju odsjeka.

Tip tla je amfoglej mineralni nekarbonatni sa slojevitom građom, a vertikalna vodopropusnost je umjereno brza do brza (podaci istraživanja za projekt izgradnje višenamjenskog kanala Dunav-Sava). Tlo je porozno s pretežno osrednjim kapacitetom tla za vodu i osrednjim kapacitetom tla za zrak (Kušan, 2019).

Ploha 3



Slika 6. Ploha 3

Prema podacima Hrvatskih šuma, satojina je niza obrasla gustim slojem grmlja, a slabo izraženu podstojnu etažu čine žestilj (*Acer tataricum* L.), vez (*Ulmus laevis* Pall) i grab (*Carpinus betulus* L.). Uz jarak koji se proteže u smjeru SZ-JI javlja se podrast poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl), žestilja i graba u razvojnem stadiju koljika. Ovo je starija sastojina hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.), prirodna sjemenjača, mješovita, dvoetažna, stablimične strukture, dobrog izgleda, srednje kakvoće (zakrivljena stabla), narušenog zdravlja i nepotpunog sklopa. Pet stabala na kojima se provodilo mjerenje protoka ksilemskog soka nalazilo se na samom istočnom kraju odsjeka.

Tip tla je ritska crnica nekarbonatna s homogenom teksturom tla po cijeloj dubini koja je praškasto glinasto ilovasta. Vertikalna vodopropusnost je vrlo brza do umjerena. Tlo je porozno do malo porozno, pretežno s osrednjim kapacitetom tla za vodu i malim kapacitetom tla za zrak (Kušan, 2019).

Ploha 6



Slika 7. Ploha 6

Prema podacima Hrvatskih šuma područje je blago povišeno (blaža “greda”) na kojoj varira sloj grmlja. Na nekim dijelovima odsjeka postoji više graba (veća zasjena), te onih koji su više obrasli grmljem i gdje prevladavaju kalina (*Ligustrum vulgare* L.), glog (*Crataegus monogyna* Jacq.), svib (*Cornus sanguinea* L.), žestilj (*Acer tataricum* L.), te podrast graba (*Carpinus betulus* L.) i klena (*Acer campestre* L.). Sastojina je stara mješovita sjemenjača hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.), slabije izražene dvoetažnosti (učesće graba u omjeru smjese nije veliko), nepotpunog sklopa, normalnog obrasta, stablimične strukture, srednjeg izgleda i kakvoće, pri čemu su stabla često granata i zakrivljena. Broj lužnjakovih stabala po hektaru nije velik, ali su zato solidnog prostornog rasporeda. Pet stabala na kojima se provodilo mjerenje protoka ksilemskog soka nalazilo se na jugozapadnom dijelu odsjeka.

Tip tla je amfiglej mineralni nekarbonatni, a vertikalna vodopropusnost varira od vrlo brze u površinskom sloju do male u podpovršinskom sloju te je umjerena u dubljim slojevima. Tlo je porozno, s osrednjim kapacitetom tla za vodu i osrednjim kapacitetom

tla za zrak, osim u zoni od 12-80 cm gdje je malo porozno, s osrednjim kapacitetom tla za vodu i vrlo malim kapacitetom tla za zrak (Kušan, 2019).

Ploha 7



Slika 8. Ploha 7

Prema podacima Hrvatskih šuma odsjek je ravničasto povišeno zemljište obraslo vrlo razvijenim slojem grmlja u kojem dominiraju glog (*Crataegus monogyna* Jacq.), žestilj (*Acer tataricum* L.), svib (*Cornus sanguinea* L.), divlja ruža (*Rosa canina* L.), kalina (*Ligustrum vulgare* L.), bršljan (*Hedera helix* L.), a na nižim položajima amorfa (*Amorpha fruticosa* L.) i kupina (*Rubus* sp.). Osim grmlja izražen je podrast klena (*Acer campestre* L.) i poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl). Sastojina je starija čista sastojina hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.), jednoetažna, nepotpunog sklopa, obrasta na granici normale, stablimične strukture, srednjeg izgleda i kakvoće, pri čemu su stabla često granata i zakrivljena. Sastojina s obzirom na dob nema prevelik broj lužnjakovih stabala, ali su zato ujednačenog prostornog rasporeda. Pet stabala na kojima se provodilo mjerenje protoka ksilemskog soka nalazilo se na krajnjem sjeveroistoku odsjeka.

Tip tla je hipoglej mineralni nekarbonatni. Tekstura tla je praškasto glinasto ilovasta osim u zoni od 85-155 cm gdje je praškasto ilovasta. Vertikalna vodopropusnost varira od vrlo brze u površinskom sloju do brze i umjerene u podpovršinskom sloju i dublje. Tlo je

porozno, s velikim kapacitetom tla za vodu i vrlo malim kapacitetom tla za zrak u površinskom sloju, dok je dublje porozno s osrednjim kapacitetom tla za vodu i za zrak. Reakcija tla je kisela do 85 cm dubine, a dublje je alkalična. Stupanj zasićenosti tla bazama je visok. Humoznost je dobra u površinskom horizontu a dublje je slaba. S fiziološki aktivnim fosforom su ova tla vrlo slabo opskrbljena, a s kalijem dobro u površinskom a slabo u podpovršinskom sloju (Kušan, 2019).

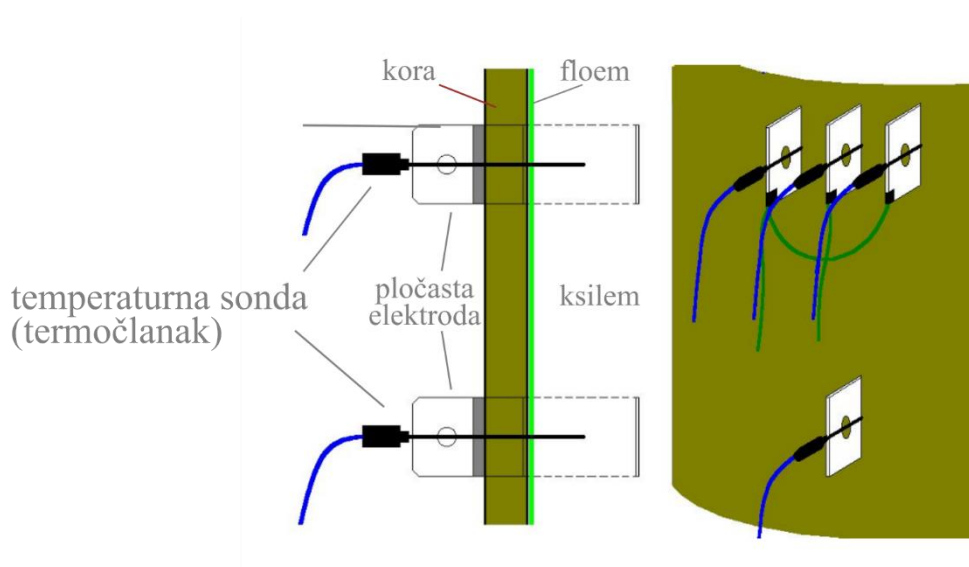
Ostale plohe, na kojima je mjereno samo opseg na pet stabala, no ne i protok ksilemskog soka, su se nalazile na odsjecima s fitocenozom šume hrasta lužnjaka i velike žutilovke sa žestiljem (plohe 1, 4, 8, 9 i 10) te tipičnim šumama hrasta lužnjaka i običnog graba (ploha 5). Amfoglej kao tip tla se javlja na plohama 1, 2, 5, 6 i 8 i obilježava ga vlaženje visokom podzemnom vodom koja najčešće dopire do oko 0,5 m dubine tla, a nerijetko i do same površine. Pored toga, prekomjerno vlaženje javlja se i uslijed stagniranja oborinskih voda koje u površinskom sloju stagniraju zbog slabe profilne dreniranosti. Nerijetko se na takvim terenima javlja „ležanje“ vode na tlu. Hipoglej kao tip tla zabilježen je na plohi 7 i obilježava ga vlaženje visokom podzemnom vodom koja može doprijeti i do same površine. U slučaju većih oborina, voda se slobodno procjeđuje kroz solum tla do podzemne vode. Ritska crnica vertična zabilježena je na plohama 3, 4, 9 i 10 i obilježava ju preko 50 cm duboki humusni akumulativni horizont te hipoglejni način vlaženja. Oborinska voda se na ovom tipu tla sporije procjeđuje kroz solum tla i moguće je kratkotrajno zadržavanje oborinske vode na tlu.

3.2.Mjerenje protoka ksilemskog soka metodom toplinskog uravnoteženja

Postavljanje uređaja za mjerenje protoka ksilemskog soka obavljeno je krajem rujna 2018. godine na 4 plohe – dvije (plohe 2 i 3) u zajednici hrasta lužnjaka bez graba (niži tereni, nize) te dvije (plohe 6 i 7) u zajednici lužnjaka s grabom (viši tereni, grede) (Slika 4). Mjerenje je izvedeno sustavom EMS 81 (EMS Brno, Slovačka) koji se sastoji od bilježnika podataka (dataloger) MicroSet 8X, uređaja za mjerenje protoka ksilemskog soka 'Sap FloWSF 81' i digitalnog dendrometra DR26E. Za napajanje sustava instalirani su akumulatori koji su se zatim mijenjali prilikom obilaska lokacija (otprilike jednom

mjesečno). Na svakoj od ploha (s oznakama 2, 3, 6 i 7) odabrano je 5 stabala hrasta lužnjaka na kojima su postavljeni sustavi za mjerenje protoka ksilemskog soka, ukupno 20 stabala.

Uređaj SF 81 radi na principu toplinskog uravnoteženja (eng. heat balance, HB), metode s unutarnjim zagrijavanjem elektroda, namijenjen za mjerenja na drveću promjera većeg od 12 cm. Tri pločaste elektrode s terminalima od nehrđajućeg čelika ugrađuju se u stablo i vode izmjeničnu struju do ksilema (Slika 9). Protokom električne struje, ksilem se zagrijava lokalno oko elektroda. Izolirani dio elektroda sprječava prolazak struje kroz visoko vodljivi floem. Dio toplinske energije se rasipa u okolinu toplinskom vodljivošću tkiva ksilema dok se ostatak odnosi protokom ksilemskog soka. Izračun protoka soka temelji se na količini topline koju odnosi protok soka, koji se izračunava iz snage potrebne za održavanje zadane razlike temperature između grijanog i negrijanog dijela stabljike.



Slika 9. Primjer senzora na stablu. Postavlja se serija od tri pločaste elektrode (plus jedna referenca ispod njih) od nehrđajućeg čelika u ksilem. U središnji dio svake elektrode postavlja se iglica koja dolazi do ksilema i koja je spojena na temperaturnu sondu (termočlanak). Donja elektroda zagrijava ksilemski sok koji putuje prema gore, a gornje elektrode mjere razliku u temperaturi na osnovu čega se računa količina protoka. Preuzeto i prilagođeno iz Kučera i Urban (2012).

Nakon što se na visini prsnog promjera (cca 130 cm) postavi senzor SF 81 (Slika 9), iznad njega se postavlja i digitalni dendrometar na kojem se nalazi nehrđajuća traka koja

obujmljuje deblo i čije se povećanje mjeri rotirajućim senzorom položaja (Slika 10). Na senzore SF 81 i dendrometar DR26E priključuje se jedinica MicroSet 8X (dataloger) (Slika 11). Na senzor SF 81 i MicroSet 8X stavlja se zaštitna aluminijsko termoizolacijska folija da bi štitila od direktnog sunčevog zračenja.



Slika 10. Digitalni dendrometar (“Sap flow system EMS 81. Installation guide.,” 2018)



Slika 11. Dataloger priključen na čelične pločice s elektrodama i zaštitna folija od vanjskih utjecaja

Mjerenje je namješteno za očitavanje vrijednosti svakih 10 min, protok soka mjerio se u kg/h po cm opsega kambija, a povećanje opsega mjerilo se u mm.

3.3.Mjerenje godišnjeg debljinskog prirasta hrasta lužnjaka i vlage tla

3.3.1. Godišnji debljinski prirast hrasta lužnjaka

Za mjerenje unutar-godišnjeg prirasta hrasta lužnjaka korišteni su manualni pojasni dendrometri (U.S. Patent #6009631) (Agricultural Electronics Corporation, Tucson, AZ, S.A.D.), koji su postavljeni na pet stabala hrasta lužnjaka na svakoj od ploha (ukupno 50 dendrometara na 10 ploha) na kojima se tijekom vegetacijske sezone očitava prirast opsega stabla na visini 1,3 m od tla uz točnost očitavanja od 0,1 mm, koji sam zatim preračunala u prsni promjer. Debljinski prirast stabla je porast prsnog promjera (u mm) za pojedini mjesec. U 2019. je u vegetacijskoj sezoni bilo redovnih mjesečnih očitavanja, dok u 2020. nije bilo očitavanja u lipnju i kolovozu (Tablica 4).

3.3.2. Vlažnost tla

Monitoring vlažnosti tla provoden je frekvencijskom reflektometrijom (eng. Frequency Domain Reflectometry – FDR) i uređajem AP-301 Moisture Probe (AquaPro-sensors, S.A.D.). Ovaj mjerni uređaj je trenutno jedini na svjetskom tržištu mjerne opreme dizajniran za izmjeru profila vlažnosti tla do dubine 2 m što je najveća uopće dostupna dubina. Većina drugih proizvođača ne proizvodi uređaje koji se koriste na dubinama većim od 1 m. Na svakoj je plohi (plohe 1-10, Slika 4) postavljeno po jedno mjerno mjesto (cijev) za mjerenje vlažnosti tla, a na dvije plohe (ploha 1 Lipovac i ploha 6 Cerna) postavljeno je i drugo dodatno mjerno mjesto udaljeno od prvoga pedesetak metara, s ciljem procjene prostorne varijabilnosti vlažnosti tla na lokacijama. Ukupno je postavljeno 12 sondi (8 ploha s po 1 sondom i 2 plohe s po 2 sonde), uz očitavanja relativne vlažnosti tla na 10 karakterističnih dubina (15, 23, 31, 46, 61, 76, 107, 137, 168 i 198 cm) i uz vremensku dinamiku uzorkovanja potpuno ujednačenu s onom kod unutar-godišnjeg prirasta (Tablica 4).

Tablica 4. Datumi očitavanja dendrometra i vlažnosti na svim plohama

	početno stanje	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2019	19.2.	4.4.	10.5.	6.6.	8.7.	20.8.	19.9.		5.11.	
2020	18.2.	2.4.	15.5		2.7.		16.9.			4.12.

3.4. Daljinsko motrenje područja spačvanske šume

3.4.1. Analiza fenologije spačvanske šume

Copernicus je program Europske unije čiji je zadatak promatranje Zemlje. Podaci ovog programa besplatni su i široko dostupni kroz 6 tematskih servisa- za praćenje atmosfere, mora, kopna, klimatskih promjena, upravljanje hitnim situacijama te za sigurnost.

Primjena usluga Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) na kopnu uključuje informacije o zemljišnom pokrovu i njegovim promjenama, korištenju zemljišta, stanju vegetacije, vodnom ciklusu i varijablama površinske energije s područjem primjene na kopnu. CLMS zajednički provode Europska agencija za okoliš i Europska komisija Glavna uprava Zajednički istraživački centar (eng. DG JRC Directorate general Joint Research Centre - JRC).

CLMS proizvodi i visoko rezolucijske slojeve (10×10 m) s podacima za fenologiju i produktivnost vegetacije (HR-VPP) izrađenih na temelju snimki misije Sentinel-2 (Sentinel-2A i Sentinel-2B). Produkti se rade za 39 zemalja (32 zemlje članice EU, Velika Britanija i 6 zemalja suradnica sa zapadnog Balkana).

Tri su grupe produkata unutar HR-VPP slojeva - vegetacijski indeksi, sezonske krivulje rasta i fenološki parametri (Jacobs i sur., 2021). Podloge s fenološkim parametrima koriste krivulje rasta vegetacijskog indeksa PPI (eng. Plant Phenology Index). Vegetacijska sezona je za ove podloge definirana kao vrijeme razvoja fotosintetski aktivnog lišća. Fenološki parametri opisuju različite faze razvoja unutar sezonalne krivulje rasta vegetacije, kao što su početak i kraj sezone, sezonski maksimum i trajanje sezone.

Pomoću indeksa površine lista (LAI) može se pratiti razvijanje listova odnosno biljne biomase i korištenje energije svjetlosti za proizvodnju organskih tvari u procesu fotosinteze. Produktivnost je pojam pomoću kojeg se opisuje razvojno stanje vegetacije. Ukupna fotosintetski prikupljena energija transferirana u kemijsku energiju odnosno biomasu (bruto primarna produktivnost - GPP) je rast zbog fotosinteze, a GPP umanjen za respiraciju vegetacije je neto primarna produktivnost. Udio apsorbiranog fotosintetski aktivnog zračenja (FAPAR) definira se kao udio fotosintetski aktivnog zračenja (PAR -

sunčevo zračenje u spektralnom području 0,4-0,7 μm) koje apsorbira vegetacija. Kod visokih vrijednosti LAI, dolazi do zasićenja u kanalima osjetljivim na FAPAR, pa je on manje koristan deskriptor od LAI na područjima s gustom vegetacijom (Smets i sur., 2023).

Fenološki indeks biljaka (PPI) se temelji na modificiranom Beerovom zakonu koji opisuje odnos između refleksije krošnje i LAI (Karkauskaite i sur., 2017). Ovaj indeks je linearno vezan s LAI i ima jaku pozitivnu korelaciju s GPP, a koristi kanale u crvenom i blisko-crvenom spektru (Smets i sur., 2023). U istraživanjima koja su prethodila razvijanju HR-VPP podloga pokazao se kao bolji indeks od NDVI, EVI, EVI2, pogotovo u borealnim šumama za procjenu početka sezone jer je uspješno eliminirao problem signala snježnog pokrivača i ograničene sezonalnosti signala zelenila u četinjačama (Cai i sur., 2023; Karkauskaite i sur., 2017).

3.4.2. Evapotranspiracija

Za podatke evapotranspiracije, koristila sam produkt temeljen na podacima instrumenta MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) na satelitima Terra i Aqua (NASA, SAD) koji snima cijelu Zemljinu površinu svakih 1 do 2 dana, prikupljajući podatke u 36 spektralnih kanala (dva kanala s rezolucijom 250 m, pet kanala s 500 m i 29 kanala s rezolucijom od 1 km). Podaci satelita postoje od 1999. U ovom radu koristila sam produkt s nazivom MOD16A2GF, verzija 6.1. (Running i sur., 2021) koji sadrži modeliranu evapotranspiraciju na osnovi latentnog toka topline odnosno mjerenja izmjene energije između Zemljine površine i atmosfere koja se događa kada voda isparava s površine ili se na njoj kondenzira. Ovo su podaci temeljeni na drugom MODIS-ovom produktu MOD15A2H koji sadrži 8-dnevne kompozite za LAI (Leaf Area Index, definiran za širokolisne šume kao jednostrana površina lišća po jedinici površine) i FPAR (frakcija incidentne fotosintetski aktivne radijacije između 400 i 700 nm koje apsorbira zeleni dio vegetacije).

Uz ove kompozite, korištenjem Penman-Monteith jednadžbe koja uključuje i dnevne meteorološke podatke te dodatne informacije MODIS senzora (albedo, zemljišni pokrov), dobiva se 8-dnevni zbroj modeliranih vrijednosti za evapotranspiraciju (ET) i

potencijalnu evapotranspiraciju (PET), te prosjek vrijednosti unutar istih 8 dana za LE (eng. Latent Heat Flux, protok latentne topline) i PLE (eng. Potential Latent Heat Flux, potencijalni protok latentne topline). Prostorna rezolucija ovih slojeva je 500 m. Dodatno uz produkt postoji i sloj QC (eng. quality control, kontrola kvalitete), no njega se, prema uputama za korisnike (Running i sur., 2019), može zanemariti jer je produkt MOD16A2GF već napravio korekciju linearnom interpolacijom za nedostatke u dohvaćanju LAI/FAPAR (npr. zbog naoblake), a od tuda je i sufiks produkta GF (eng. “Gap filled”).

3.4.3. Suncem inducirana fluorescencija

Da bi se dobili podaci za SIF, koristila sam produkt TROPOSIF (NOVELTIS i sur., 2021; Retscher i sur., 2021). Produkt je temeljen na podacima instrumenta TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) koji se nalazi na satelitu Sentinel-5 Precursor od 2017. na Copernicus misiji koju je financirala ESA (Europska svemirska agencija, EU). Podaci prikupljeni instrumentom TROPOMI namijenjeni su primarno za praćenje kvalitete zraka, ozona i UV radijacije, no zahvaljujući svojim radiometrijskim i spektralnim karakteristikama imaju potencijal za praćenje vegetacije. Tvrtka Noveltis proizvela je produkte na dvije odradbene razine: TROPOSIF L2 (niži stupanj obrade, uključeni svi podaci) i TROPOSIF L2B (podaci iz L2 koji su prošli prag kvalitete objedinjeni po danu) unutar projekta TROPOSIF koji je financirala ESA kroz program Sentinel-5p+ Innovation.

Glavni produkt TROPOSIF je SIF743 (u vrpci 743-748 nm) koji je izračunat inverzijom linearnih modela (za razliku od fizičkih modela koji su primijenjeni na npr. GOSAT i OCO-2) (Guanter i sur., 2021). Postoji i eksperimentalni produkt SIF735, no njega nisam koristila.

TROPOSIF prolazi svaki dan u 13:30 preko ekvatora i iako ima široki pojas do 60° koji rezultira kvazi-dnevnom revizitacijom Zemljine površine, ipak ponavlja nadir snimanje (točka na nebeskoj sferi točno ispod senzora) istog područja tek svakih 17 dana.

Slojevi korišteni u obradi prikazani su u Tablica 5.

Tablica 5. Slojevi TROPOSIF podataka. Podebljani su oni koje sam koristila u analizama.

Sloj	Pojašnjenje	Skraćeni naziv	Jedinica
sif_sza	Solarni zenitni kut	Solarni zenitni kut	Stupnjevi
sif_rel_az	Relativni kut azimuta	Relativni kut azimuta	Stupnjevi
sif_vza	Zenitni kut gledanja	Zenitni kut	Stupnjevi
sif743	Procjena trenutne SIF izvedene iz vrpce 743-758 nm	SIF743	mW/m ² /sr/nm
sif743_err	1-σ pogreški koje su parametrizirane za trenutne procjene SIF-a	SIF743 greška	mW/m ² /sr/nm
sif743_dc	Trenutna procjena SIF prilagođena dnevnim SIF podacima pomoću faktora skaliranja duljine dana	Korigirani SIF743	mW/m ² /sr/nm
ref_665:ref 781	Refleksija na vrhu atmosfere (TOA) unutar 665-785 nm, % naoblake < 20 %	Refleksija na 665-781 nm	/
toa_rad	Prosječni protok radijacije (radiance) na vrhu atmosfere (TOA) za 743-758 nm	TOA radijacija	mW/m ² /sr/nm

3.4.4. Vegetacijski indeksi

Vegetacijski indeksi imaju široku primjenu u daljinskim istraživanjima za procjenu fenoloških faza, biomase, sadržaja vode u krošnji, vitalnosti vegetacije, pokrovnosti krošnje itd. Neki indeksi (npr. NIRv indeks) primjenjuju se i kao neizravne mjere za SIF. Za izračun vegetacijskih indeksa odabrala sam podatke senzora Sentinel-2 jer imaju najbolju prostornu rezoluciju u odnosu na druge široko dostupne i besplatne izvore snimaka korištene u ovom radu.

Sentinel-2 je misija Copernicus programa (EU) koja se nalazi u tandemu dvaju optičkih satelita, 2A (u upotrebi od 2015.) i 2B (u upotrebi od 2017.). Instrumenti Sentinel-2 su opremljeni multispektralnim sensorima koji snimaju u 13 kanala (Tablica 6). Indeksi se računaju prema formulama koje koriste različite kombinacije kanala, a odabrani za ovaj rad prikazani su u tablici 7.

Tablica 6. Karakteristike Sentinel-2 kanala

Broj kanala	Primjena	Centralna valna duljina (nm)	Širina kanala (nm)	Prostorna rezolucija (m)
B1	Obalni aerosol	443	27	60
B2	Plavi spektar	490	98	10
B3	Zeleni spektar	560	45	10
B4	Crveni spektar	665	38	10
B5	Vegetacijski red-edge	705	19	20
B6	Vegetacijski red-edge	740	18	20
B7	Vegetacijski red-edge	783	28	20
B8	Blisko infracrveni (NIR)	842	145	10
B8A	Blisko infracrveni (NIR) uži kanal	865	33	20
B9	Vodena para	945	26	60
B10	Kratkovalni infracrveni (SWIR)-cirrus	1380	75	60
B11	Kratkovalni infracrveni (SWIR)	1610	143	20
B12	Kratkovalni infracrveni (SWIR)	2190	242	20

Tablica 7. Opis korištenih indeksa (R - refleksija pri valnoj duljini naznačenoj u nm, B- kanal spektralne vrpce prema specifikaciji multispektralnog instrumenta Sentinel-2)

Vegetacijski indeks	Općenita formula	Sentinel-2 formula	Opis
Vegetacijski indeks normalizirane razlike (NDVI)	$\frac{R842 - R665}{R842 + R665}$	$\frac{B8A - B4}{B8A + B4}$	Pokazatelj zelene vegetacije (Rouse i sur., 1974).
Vegetacijski NIR indeks kopnene vegetacije (NIRv)	$\frac{R842 - R665}{R842 + R665} * R842$	$\frac{B8A - B4}{B8A + B4} * B8A$	Udio refleksije piksela zbog vegetacije u pikselu snažno korelira sa SIF (Badgley i sur., 2017; Mengistu i sur., 2021; Zhang i sur., 2022).
Poboljšani vegetacijski indeks (EVI)	$\frac{2.5 * (R842 - R665)}{R842 + 6 * R665 - 7.5 * R490 + 1}$	$\frac{2.5 * (B8A - B4)}{B8A + 6 * B4 - 7.5 * B2} + 1$	Sličan NDVI, ali ispravlja atmosferske uvjete i osjetljiviji je na gustu vegetaciju (Huete i sur., 1994, 1997).
Sadržaj vlage (MSI)	$\frac{R1610}{R865}$	$\frac{B11}{B8A}$	Pokazatelj udjela vode u lišću (veće vrijednosti ukazuju na veliki stres (smanjeni udio

Vegetacijski indeks	Općenita formula	Sentinel-2 formula	Opis
			vode) i obrnuto) (Ceccato i sur., 2001; Hunt i Rock, 1989).
Sentinel-2 LAI indeks (SELI)	$\frac{R865 - R705}{R865 + R705}$	$\frac{B8A - B5}{B8A + B5}$	Sličan LAI, ali uravnotežuje utjecaj jake apsorpcije klorofila i minimalnog raspršenja pri umjereno visokim LAI vrijednostima (iznad 2). (Pasqualotto i sur., 2019).

3.5. Meteorološki podaci

Meteo-stanice postavljene su na četiri lokacije gdje je mjerena protok ksilemskog soka. Na stanicama je mjerena temperatura zraka, vlaga zraka, temperatura tla i volumni udio vode u tlu na 30, 60 i 90 cm dubine. Stanice su mjerile podatke svakih 30 minuta i bile spojene preko modema na bazu podatka eEMIS®. Stanice su također bile spojene na akumulator čiji se kapacitet pratio da bi se mogao na vrijeme zamjeniti. Podaci sa svih meteo-stanica preuzeti su preko web-sučelja eEMIS® s intervalima od 30 minuta. Izračunate su prosječne dnevne vrijednosti temperature zraka i prikazane na grafu za sve plohe. Podaci su uključivali i mjerenja od rujna 2018. (kad su meteo-stanice postavljene) da bi se dobio uvid u širi vremenski raspon podataka. Dodatno su podaci s meteo-stanica spojeni s podacima mjerenja protoka ksilemskog soka, također u intervalima od 30 minuta.

Podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda dostavljeni su za oborine, osunčanost (broj sati u danu kad nije bilo naoblake), smjer i jačinu vjetra te prosječni dnevni tlak zraka. Podaci za oborine zaprimljeni su za postaje Gradište, Cerna i Otok za 2019. i 2020. godinu. Ove postaje ne nalaze se unutar spačvanske šume, no relativno su blizu pa sam pretpostavila da dobro predstavljaju uvjete za oborine, osunčanost i vjetar (Slika 12). Podaci za oborinu za sve plohe izraženi su podacima s postaje Gradište. Da bi se usporedili s MODIS produktom za evapotranspiraciju, dnevne vrijednosti oborina zbrojene su u periodima od 8 dana tako da se preklapaju s periodima podataka MODIS produkta. Podaci za osunčanost te smjer i jačinu vjetra postojali su samo za mjernu postaju Gradište (glavna meteorološka postaja) pa su mjerenja iz 2019. i 2020. uzeti kao

podaci koji predstavljaju osunčanost i karakteristike vjetra na svim plohama. Podaci za smjer i jačinu vjetra postojali su za 7, 14 i 21 h. Podaci za tlak bile su prosječne dnevne vrijednosti za postaju Gradište.

Deficit zasićenosti zraka vodenom parom (eng. Vapour Pressure Deficit, VPD) je razlika između vlage u zraku i količine vlage koju zrak može imati u stanju zasićenosti. Veće vrijednosti deficita zasićenosti zraka znače da je veća razlika između tlaka pare u zraku i u listu, pri čemu je zrak više suh i biljke brže transpiriraju.

Općenita formula za deficit zasićenosti zraka vodenom parom je:

$$VPD = p_{zasićene\ pare\ u\ listu} - p_{zasićene\ pare\ zraka} * \varphi_{zraka} \quad [\text{hPa}] \quad [1]$$

, gdje je p oznaka za tlak, a φ oznaka za relativnu vlažnost.

Za računanje deficita zasićenosti zraka koristila sam formulu prema Tetens (1930).

$$p_{zasićene\ pare\ u\ listu} = 0,61078 * e^{\frac{17,27 * T}{T + 237,3}} \quad [\text{hPa}] \quad [2]$$

, gdje je temperaturu lista moguće zamijeniti s temperaturom zraka: T (°C). Nadalje:

$$p_{zasićene\ pare\ zraka} = p_{zasićene\ pare\ u\ listu} * \varphi_{zraka} \quad [3]$$

, pa je:

deficit zasićenosti = tlak zasićene pare u listu (1- relativna vlažnost zraka)

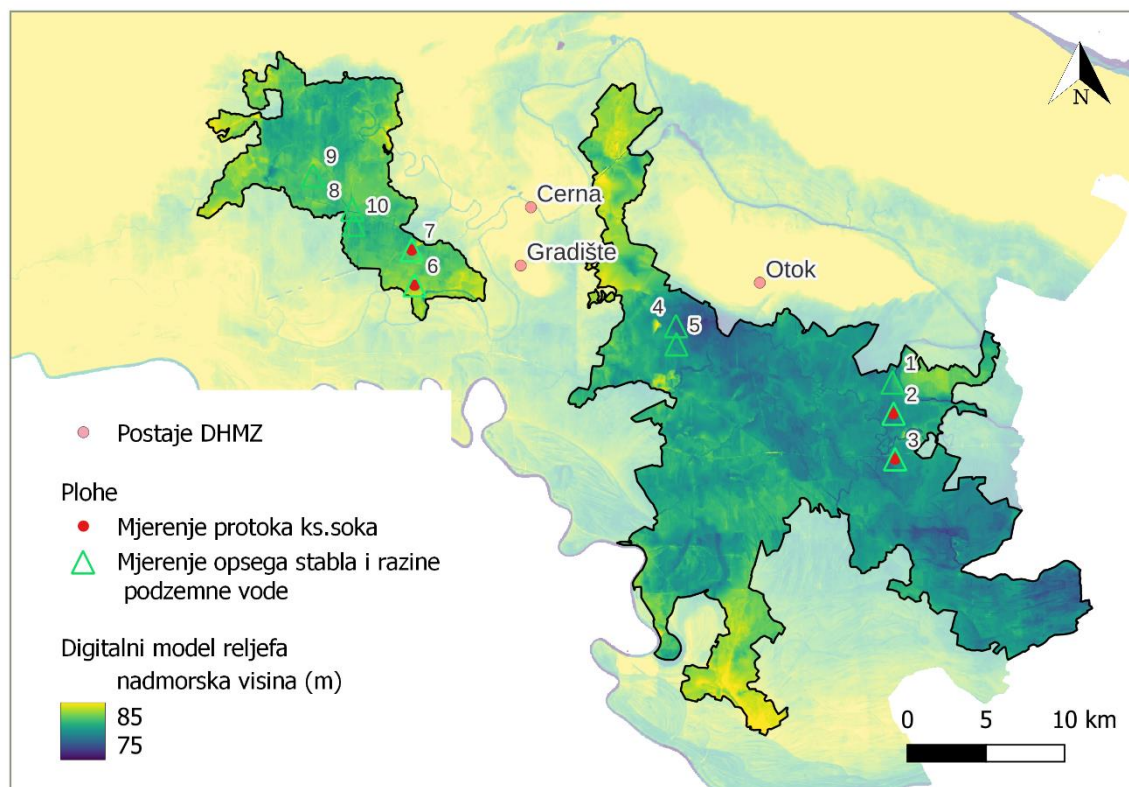
$$VPD = 0,610878 * e^{\frac{17,27 * T}{T + 237,3}} (1 - \varphi_{zraka}) \quad [4]$$

Svi prikupljeni podaci okolišnih čimbenika prikazani su u Tablica 8.

Tablica 8. Meteorološki podaci s jedinicama, intervalima i izvorom podataka za plohe 2, 3, 6 i 7

Podatak	Jedinica	Interval		Izvor
		30 min	24 h	
Volumni udio vode u tlu (vlažnost tla)- 30/60/90 cm dubine	%	+	prosjeck	Meteo-stanice na plohama 2,3, 6 i 7
Temperatura tla - 30/60/90 cm dubine	°C	+	prosjeck	
Temperatura zraka na 2 m visine od tla	°C	+	prosjeck	
Relativna vlažnost zraka	%	+	prosjeck	
Deficit zasićenosti zraka (VPD)	kPa	+	prosjeck	Izračunato preko temperature i relativne vlažnosti zraka

Podatak	Jedinica	Interval		Izvor
		30 min	24 h	
Oborina (postaje Gradište, Cerna, Otok)	mm		+	DHMZ
Broj osunčanih sati (insolacija) (Gradište)	h		+	
Smjer vjetra u 7/14/21 h (Gradište)	°		+	
Jačina vjetra u 7/14/21 h (Gradište)	Beaufort (0-12)		+	
Tlak zraka (Gradište)	hPa		+	



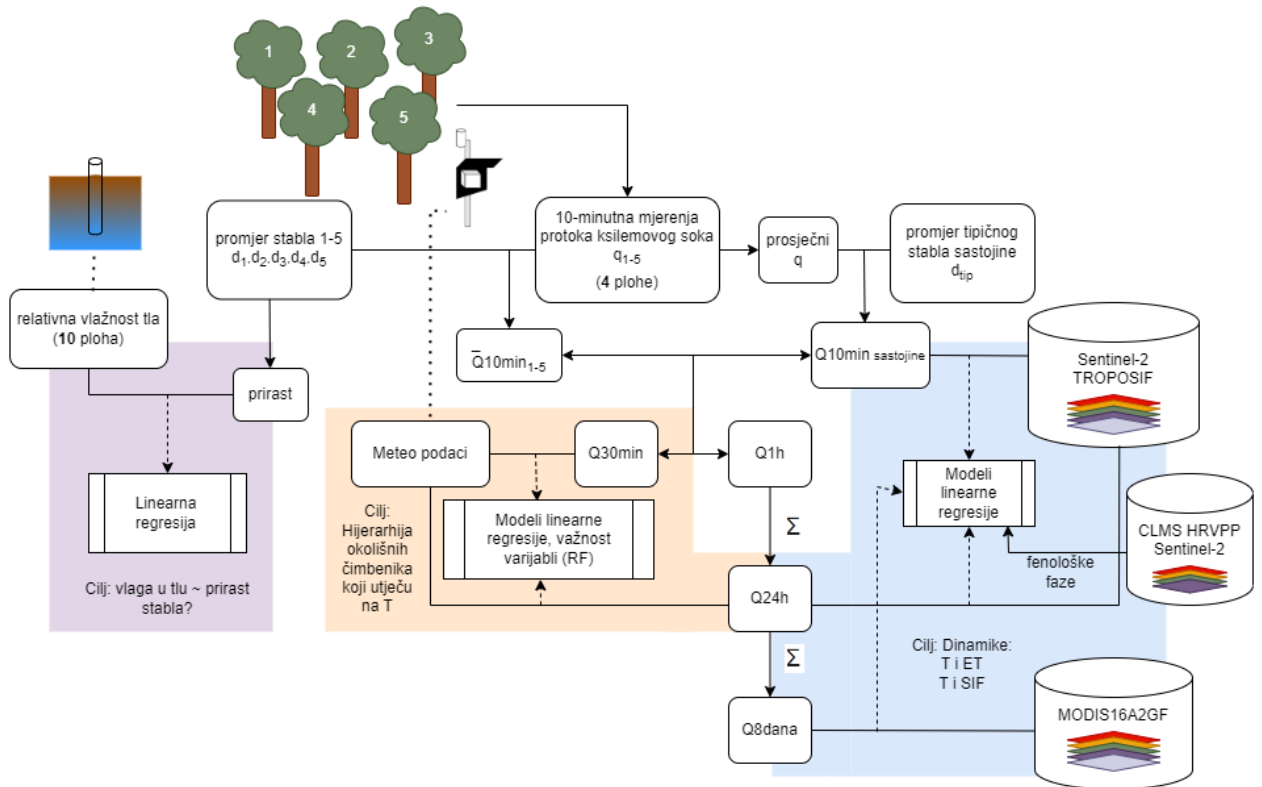
Slika 12. Digitalni model reljefa s nadmorskim visinama za područje spačvanske šume. Označene su i lokacije postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda na kojima se prikupljaju podaci za oborinu.

3.6. Obrada i analiza podataka

3.6.1. Obrada i analiza podataka s obzirom na ciljeve rada

- Za utvrđivanje povezanosti dinamike transpiracije i povezanih procesa u ekosustavu šume hrasta lužnjaka (poglavlje 3.6.4) koristila sam podatke terenskih mjerenja (poglavlje 3.6.2) i podatke daljinskog motrenja (poglavlje 3.6.3) na 4 plohe. Za uspješnu provedbu analize i ostvarenje ciljeva nužno je bilo uskladiti setove podataka kako bi bili prostorno i vremenski usporedivi.
- Za utvrđivanje hijerarhije čimbenika koji objašnjavaju dinamiku transpiracije koristila sam podatke terenski mjenog protoka ksilemskog soka i okolišnih čimbenika: temperatura zraka, temperatura tla, relativna vlažnost zraka, relativna vlažnost tla, jačina i smjer vjetra, oborine, osunčanost (poglavlje 3.6.53.6.5).
- Dodatno sam napravila analizu prirasta stabala na svim ploham (10 ploha) u odnosu na izmjerenu vlažnost tla da bih ispitala povezanost indirektnih posljedica fotosinteze i korištenja vode (poglavlje 3.6.2.2).

Prikaz dijagrama aktivnosti nalazi se na slici Slika 13.



Slika 13. Shematski prikaz dijagrama aktivnosti. Primjer za jednu plohu (5 stabala). q – protok ksilemskog soka [kg/h/cm opsega ksilema] po stablu, Q – protok ksilemskog soka [kg/h] po stablu, d_{tip} – promjer tipičnog stabla u sastojini prema podacima iz planova gospodarenja (Hrvatske šume), RF – Random Forest, T – transpiracija, ET – evapotranspiracija, SIF – Suncem inducirana fluorescencija

Za sve testove, statistička značajnost je određena pri graničnoj vrijednosti od $p \leq 0,05$. Tabelarni i grafički prikazi su izrađeni u programu R (R Core Team, 2024), Python (verzija 3.12) u Jupyter Notebook okruženju ili Microsoft Excel 2021. Sve plohe su geokodirane korištenjem GPS uređaja (Oregon 64s, Garmin, SAD) određivanjem koordinata u koordinatnom sustavu HTRS 96/TM, a grafički prikaz istraživanih lokaliteta prikazan je pomoću programa QGIS 3.22.16 (QGIS Development Team, 2024).

3.6.2. Obrada podataka terenskih mjerenja

3.6.2.1. Obrada podataka protoka ksilemskog soka na plohama

Podatke s datalogera na stablima hrasta učitala sam u Mini 32 Software (“Mini32 Software, EMS Brno,” 2022). Mjerenja su postojala od kraja rujna do početka studenog 2018., tj. tada su vršena pokusna mjerenja i postavljanje uređaja, dok su redovna mjerenja započela sredinom veljače 2019. do početka studenog 2019. Zatim je uslijedila stanka u mjerenju, da bi mjerenje ponovo započelo sredinom veljače 2020. i trajalo do početka studenog 2020. Nakon što sam podatke za pojedina stabla spojila za sve periode mjerenja te zatim i po plohama, prema uputama proizvođača napravila sam 'Baseline subtraction' jer bi inače uključivali dio koji predstavlja gubitak topline zbog vodljivosti ksilema. Cilj je bio postaviti donju liniju na grafu s podacima protoka tako da se blago penje u sezoni. Nakon toga, za svaku plohu sam spremila podatke u tabličnom formatu u osnovnom intervalu od 10 minuta te derivacijama od 30 minuta (prosjeak od tri mjerenja) i 60 minuta (prosjeak četiri do šest mjerenja).

1. Podaci u intervalima od 10 minuta korišteni su za usporedbu s podacima satelitskih snimki koje snimaju područje u određeno vrijeme dana.
2. Podaci u intervalima od 30 minuta korišteni su za usporedbu s podacima s meteo-stanica
3. Podaci u intervalima od 60 minuta korišteni su za izračun satnih, dnevnih i 8-dnevnih protoka ksilemskog soka za usporedbu s proizvodima nastalih od satelitskih snimki.

Podatke s različitim vremenskim intervalima koristila sam da bi se dobila najdetaljnija vremenska rezolucija s obzirom na vremensku rezoluciju nezavisnih varijabli.

Za računanje protoka ksilemskog soka za svako stablo (ukupno 20 stabala) korištena je jednažba prema (“Sap flow system EMS 81. Installation guide.,” 2018):

$$Q_{stablo} = q * (A - 6,28 * B) \quad [\text{kg/h}] \quad [5]$$

, gdje je q trenutni protok ksilemskog soka ($[\text{kg h}^{-1} \text{cm}^{-1}]$) mjereno u intervalima od 10 minuta, A opseg stabla na visini od 1,4 m od tla, a B debljina kore i floema. Promjena opsega stabla mjerila se digitalnim dendrometrom svakih 10 minuta i ta je vrijednost

zbrajana s početnim izmjerenim opsegom (Tablica 2). Opseg stabla se u šumarskoj praksi mjeri na visini od 1,3 m od tla, no na toj visini su postavljeni uređaji za mjerenje protoka ksilemovog soka, pa su zato digitalni dendrometri morali biti postavljeni iznad, tj. na visini 1,4 m od tla.

Za debljinu kore uzela sam podatke prema Čavlović i Bončina (2010) koji su mjerili debljinske razrede za vrste drveća (pa tako i za hrast lužnjak) i debljinu kore i floema. Iz tih podataka dobila sam model za izračun debljine kore i floema korištenjem promjera stabla, dobiven iz opsega A ($R^2=0,99$):

$$B = 0,21 * 2r + 4,2 \quad [\text{mm}] \quad [6]$$

, gdje je B debljina kore i floema [mm], a 2r je promjer stabla [cm].

Opseg stabla u visini prsa:

$$A = 2r * \pi \quad [\text{cm}] \quad [7]$$

Uvrštavanjem jednadžbi [6] i [7] u [5] dobiva se da je protok ksilemskog soka:

$$Q_{stablo} = q * (3,00812 * 2r - 2,64) \quad [\text{kg/h}] \quad [8]$$

Ovu jednadžbu koristila sam za podatke protoka ksilemskog soka u intervalima 10, 30 i 60 min. Nakon što sam izračunala Q za svako stablo po satu, napravila sam zbroj svih Q u danu da bi se dobio iznos dnevnog protoka ksilemskog soka po stablu:

$$Q_{24h \text{ stablo}} = \sum_i^{24} Q_i \text{ stablo} \quad [\text{kg}/24\text{h}] \quad [9]$$

Za izračun protoka po jedinici vremena i prostornoj jedinici (m^2), da bi se podaci mogli usporediti s podacima satelitskih snimki, koristila sam podatke Hrvatskih šuma. Iz njih sam za svaki odjel i odsjek na kojima se nalaze plohe koristila podatke za broj stabala po hektaru i srednji promjer stabla (Tablica 3). Za svaku plohu posebno sam izračunala prosjek vrijednosti (za pet stabala) trenutnog protoka ksilemskog soka po cm opsega ksilema (\bar{q}). Ovaj iznos uvrstio se u jednadžbu [8]:

$$Q_{10min} = \overline{q_{10min \ 1-5}} * (3,00812 * 2r - 2,64) \quad [\text{kg/h}] \quad [10]$$

Isto sam napravila i za satne protoke (Q_{60min}):

$$Q_{60min} = \overline{q_{60min\ 1-5}} * (3,00812 * 2r - 2,64) \text{ [kg/h]} \quad [11]$$

Zatim su zbrojene vrijednosti na razini 24 sata ili pak 8 dana (počevši od datuma početka izračuna 8-dnevnog perioda za vrijednosti produkta MODIS16A2GF):

$$Q_{24h} = \sum_i^{24} Q_i 60min \quad \text{[kg/24h]} \quad [12]$$

$$Q_{8dana} = \sum_i^8 Q_i 24h \quad \text{[kg/8 dana]} \quad [13]$$

Na kraju je rezultat pomnožen s faktorom (f) broja stabala hrasta lužnjaka po hektaru (10.000 m²):

$$f = \frac{N}{10000} \quad \text{[broj stabala/m}^2\text{]} \quad [14]$$

da bi se dobio protok kg/m²/jedinica vremena. U slučaju da su nedostajali podaci za bilo koji od dana u 8-dnevnom intervalu, ukupan zbroj je bio NA (jer bi nedostatak jednog dana mjerenja utjecao na ukupni zbroj).

Iako su Edwards i sur. (1997) predložili da se za protok ksilemskog soka koristi izraz L/vrijeme (također i za metode koje koriste metodu toplinskog uravnoteženja) jer se bolje mogu povezati s hidrološkim podacima i poboljšati usporedbu, u ovom radu koristila sam jedinicu: kg/vrijeme. Razlog tome je što je u uputama proizvođača uređaja za terensko mjerenje protoka ksilemskog soka (“Sap flow system EMS 81. Installation guide.,” 2018) dana takva jedinica za izračun protoka po stablu. Dodatno, MODIS ET i PET također imaju jedinicu kg/m²/8 dana, pa sam zbog lakše usporedbe rezultata odabrala ipak jedinicu mase ksilemskog soka po vremenu (i površini sastojine gdje je bilo potrebno).

3.6.2.2. Debljinski prirast hrasta lužnjaka i vlažnost tla (na 10 ploha)

Sva mjerenja za vlažnost (volumni udio vode u tlu) koja su imala očitavanja veća od 100 % su uklonjena jer vlažnost u tlu ne prelazi 100 %, a vjerojatno je došlo do pogreške uređaja ili očitavanja. U 2019. godini velik broj mjerenja imala su vrijednosti 0, što nije u skladu s uputama proizvođača sonde koji navodi minimalne vrijednosti za različite tipove tala i koji se kreću od 18 % za pjeskovita tla, do 53 % za glinasta tla. Zato mjerenja iz 2019.

nisu korištena za daljnje analize. Očitavanja sonde koja su pokazivala da na određenoj dubini postoji voda sam označila kao 100 % vlažnosti tla.

Izradila sam grafove očitavanja vlage na svim dubinama na svih 10 ploha (12 očitavanja) za 2020. godinu. Također sam napravila graf prosječnog godišnjeg debljinskog prirasta promjera na 10 ploha. Prosječni prirast promjera izračunala sam tako da sam zbrojila sve priraste promjera po mjesecima u kojima je bilo mjerenja za svako stablo na pojedinoj plohi za svaku godinu, a zatim sam napravila prosjek vrijednosti tih zbrojeva na razini plohe.

Izradila sam i grafove za sve plohe u kojima se promatra odnos vlage u tlu na svim dubinama i debljinskog prirasta. Za ovaj prikaz koristila sam očitavanja vlage i prirasta od travnja, jer su mjerenja u veljači bila za početno stanje (nije bilo podataka za prirast).

3.6.3. Obrada podataka daljinskog motrenja

3.6.3.1. Satelitske snimke Sentinel-2

Za preuzimanje podataka koristila sam paket 'ee' u Python programskom jeziku. Paket se povezuje s platformom Google Earth Engine (Gorelick i sur., 2017) te tako nije potrebno preuzeti cijelu snimku nekog područja, nego samo podatke u zadanim točkama. Snimke koje su imale više od 20 % naoblake nisam uzimala za daljnju obradu jer budući da se radi o optičkom senzoru, naoblaka uvelike utječe na rezultate. Broj snimki koje su korištene za prikaz dinamike podataka od rujna 2018. do listopada 2020. prikazan je u tablici (Tablica 9).

Snimke koje su korištene za plohe 2, 3, 6 i 7 imale su sljedeće informacije:

- Misija: S2A
- Razina produkta: L2A
- Osnovni broj obrade: N0511
- Broj relativne orbite: R036
- Identifikacijski broj snimke: T33TYL i T34TCQ

Tablica 9. Broj snimki po mjesecu korištenih za prikazivanje i analizu Sentinel-2 podataka

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ukupno	Ukupno vegetacijska sezona (IV – X)
2018									3	3	4		10	
2019		2	4	3	1	5	2	4	4	5		2	32	24
2020	3	5	4	6	3	4	4	6	5	3			43	31

Od tih podataka snimke iz vegetacijske sezone 2019. i 2020. koristila sam za analizu zajedno s podacima protoka ksilemskog soka. Preuzeti podaci bili su razine L2 na kojoj je primijenjena atmosferska korekcija i koja sadrži podatke o refleksiji površine (eng. surface reflectance). Kanale kojima je prostorna rezolucija manja od 10 m sam povećala na tu rezoluciju (metodom 'resample'). Sentinel-2 ima dobru prostornu rezoluciju (10 metara za dio kanala), pa su pojedina stabla na plohama pripala različitim pikselima (tri snimke na plohi 3 i četiri snimke na ostalim plohama). Zato sam preuzela podatke za zasebne kanale i indekse u točkama pojedinih stabala, a ne u centroidu plohe na kojima se nalaze, i izračunala njihove srednje vrijednosti za svaku plohu.

Zatim sam za svaku plohu posebno prikazala indekse u vegetacijskoj sezoni 2019. i 2020., te usporedbu trenutnog protoka ksilemskog soka (u vrijeme snimanja snimke). Trenutni protok (Q10min) sam odabrala u vrijeme snimanja snimke, koje je pisalo u nazivu svake snimke prema konvenciji imenovanja proizvođača. Vrijeme u nazivu Sentinel-2 snimke u vegetacijskom razdoblju 1.4.-31.10. (razdoblje ljetnog računanja vremena), sam pomaknula za 2 sata više kako bi se preklapilo s hrvatskim lokalnim vremenom.

3.6.3.2. Modelirani produkti evapotranspiracije iz MODIS-ovih vremenskih serija

Podatke za MOD16A2GF sam preuzela s repozitorija platforme Google Earth Engine (Gorelick i sur., 2017) za područja gdje se nalaze plohe 2, 3, 6 i 7 u periodima od 1.4. do 31.10. za godine 2019. i 2020. Snimke su imale indetifikator: h19v04. Podaci su bili u .hdf formatu (HDF-Hierachical Data Format) veličine piksela 500 x 500 m organizirani u slojeve koji obuhvaćaju 8-dnevne periode tijekom vremena istraživanja. Podaci za slojeve ET i PET pomnoženi su prema korisničkim uputama s faktorom 0,1 kako bi se dobila vrijednost evapotranspiracije (jedinice: $\text{kg/m}^2/8$ dana).

3.6.3.3. Produkti Suncem inducirane fluorescencije s TROPOSIF-a

Za preuzimanje snimki TROPOSIF-a razine L2B na sve dostupne datume od 1.4. do 31.10. za 2019. i 2020. korištena je Python skripta. Zatim je primijenjena druga skripta koja je generirala raster podatke iznad Spačvanske šume u rezoluciji 0,05 x 0,05 stupnjeva (otprilike 3,9 x 5,5 km²). Na pikselima u kojima su se nalazili centriodi ploha 2, 3, 6 i 7 (Tablica 10) preuzela sam podatke TROPOSIF slojeva navedene u Tablica 5.

Tablica 10. Broj dostupnih TROPOSIF snimki u periodu od 1.4.-31.10. za 2019. i 2020. na plohama na kojima su postojali terenski podaci za protok ksilemskog soka

	Ploha 2	Ploha 3	Ploha 6	Ploha 7
2019	98	101	90	95
2020	79	90	55	7

Napravila sam linijske grafove dinamike prosječnih vrijednosti SIF743 i korigirane SIF743 te također dinamiku prosječnih dnevnih vrijednosti protoka ksilemskog soka na razini sastojine za 2019. i 2020. godinu. Grafovi su imali označene standardne devijacije vrijednosti na svim plohama.

Na isti način prikazani su linijski grafovi s vrijednostima solarnog zenitnog kuta na svim plohama, te vrijednosti refleksija kanala različitih valnih duljina (665-781 nm).

3.6.3.4. Fenološki produkti CLMS-a

Podloge HR-VPP za faze razvoja vegetacije (početak i kraj sezone te maksimum sezone), trajanje sezone, te za produktivnost u glavnim fazama razvoja vegetacije preuzete su s portala WekEO (wekeo.eu) korištenjem Jupyter Lab okruženja. Skidane su snimke s oznakom jedne sezone 's1', jer šume nemaju dvije vegetacijske sezone u godini (kao npr. neke poljoprivredne površine). Dodatno, snimke su bile rezolucije 10 x 10 m, u projekciji EPSG 3035 (LAEA) i to su bile snimke s oznakom E49N24 i E50N24. Pokušala sam koristiti snimke s WGS 84/UTM projekcijom koja je prilagođenija za Hrvatsku, no Spačva se nalazi između dvije različite UTM zone (34 i 33), pa je naknadno spajanje snimki uzrokovalo nepreklapanje piksela te sam odlučila za prikaz područja koristiti projekciju EPSG 3035. Zatim sam snimke lokalno obradila koristeći Python u Jupyter Notebook okruženju. Snimke su izrezane na područje spačvanske šume, a prikazi karata

grupirani prema podlogama čije se vrijednosti izražavaju kao Dan u godini (DOY) ili ukupni broj dana (trajanje sezone), te podloge čije se vrijednosti izražavaju kao PPI. Originalni podaci podloga imaju jedinicu 'Dan u godini' ili ukupni broj dana su u formatu: YYDOY (YY- odnosi se na skraćeni oblik godine, npr. 2019 je 19, DOY – dan u godini), pa sam, da bi se dobile kvantitativne vrijednosti, uklonila prve dvije znamenke koje označavaju godinu. Za podatke fenološkog indeksa, prema uputama za ovaj proizvod (Smets i sur., 2023) vrijednosti su pomnožene s faktorom 0,0001, da bi raspon vrijednosti indeksa PPI bio 0-3. Konačno je izvučena tablica s podacima HR-VPP podloga na plohama 2,3,6 i 7. Na temelju njih je određena vegetacijska sezona i faze razvoja vegetacije za istraživane plohe.

3.6.4. Analiza povezanosti dinamike transpiracije i vezanih procesa

1. Povezanost transpiracije i evapotranspiracije

Na podacima za evapotranspiraciju (koja je zbroj transpiracije i evaporacije) iz produkta MOD16A2GF, da bih dobila informaciju jesu li podaci bili normalno distribuirani, primijenila sam Shapiro-Wilk test. Za opisivanje povezanih onih podataka koji nisu imali normalnu distribuciju, primijenila sam Spearmanov koeficijent korelacije (r_s) između evapotranspiracije i protoka ksilemskog soka u cilju dobivanja informacije o smjeru (pozitivna/negativna) i snazi korelacije (0-0,4]: slaba, (0,4-0,8]: umjerena, (0,8-1): jaka).

Koristila sam linearnu regresiju za izradu modela koji su objašnjavali transpiraciju. Podatke sam pročistila tako da su vrijednosti svih varijabli (zavisne i nezavisnih) za koje nije bilo podataka na određene 8-dnevne periode uklonjeni iz seta. Nezavisna varijabla bila je MODIS ET. Modele sam napravila korištenjem podataka iz obje godine (2019. i 2020.), te odvojeno za svaki period za svaku godinu. Periodi su određeni prema datumu sezonskog maksimuma dnevnog protoka ksilemskog soka, pa su u period I uključene vrijednosti 8-dnevnih razdoblja prije datuma maksimuma, a u period II vrijednosti nakon datuma maksimuma. Statistički značajni modeli, čija je p-vrijednost bila manja od 0,05, uvršteni su u tablicu za usporedbu koeficijenta determinacije (R^2) između godina.

2. Povezanost transpiracije i Suncem inducirane fluorescencije

Kako bih utvrdila povezanost SIF-a i protoka ksilemskog soka, TROPOSIF produkte usporedila sam s protokom ksilemskog soka (Q10min sastojina) za trenutak snimanja

(13:30 po lokalnom vremenu) i dnevnim protokom na razini sastojine (Q24h sastojina) kao zavisnim varijablama. Podatke sam pročistila tako da su vrijednosti svih varijabli (zavisnih i nezavisnih) za koje nije bilo podataka na određene datume uklonjeni iz seta. Koeficijente determinacije modela linearne regresije za podatke iz 2019. i posebno 2020. godine sam usporedila na grafu kako bih mogla vidjeti je li bolje koristiti trenutne ili dnevne vrijednosti i koji slojevi najbolje opisuju varijacije u protoku ksilemskog soka.

Statistički značajne modele (p -vrijednost $< 0,05$) unijela sam u tablicu za usporedbu uspješnosti modela između godina i perioda. Modele s najvišim koeficijentom determinacije na svakoj plohi prikazala sam na grafovima za 2019. i 2020. godinu. Zatim sam odabrala najbolje prediktore i zavisne varijable i podijelila podatke prema periodima. Periode sam odredila prema datumu sezonskog maksimuma dnevnog protoka ksilemskog soka, pa su u period I uključene vrijednosti 8-dnevnih razdoblja prije datuma maksimuma, a u period II vrijednosti nakon datuma maksimuma.

Zatim sam testirala imaju li podaci normalnu distribuciju korištenjem Shapiro-Wilk testa. Za opisivanje povezanih onih podataka koji nisu imali normalnu distribuciju, primijenila sam Spearmanov koeficijent korelacije (r_s) između TROPOSIF odabrane varijable i protoka ksilemskog soka u cilju dobivanja informacije o smjeru (pozitivna/negativna) i snazi korelacije ($(0-0,4]$: slaba, $(0,4-0,8]$: umjerena, $(0,8-1)$: jaka).

3. Povezanost transpiracije i vegetacijskih indeksa

Za vrijednosti kanala (B1-B12) napravila sam analizu glavnih komponenti da mogu analizirati jesu li i koliko bitne, te kako objašnjavaju varijacije u podacima. Kanal B10 nije uzet u obzir jer se na temelju njega izdvajaju snimke s naoblakom (odaziv u SWIR). Za analizu glavnih komponenti koristila sam funkciju 'princomp' iz osnovnog 'stats' paketa u R-u (R Core Team, 2024).

Vegetacijske indekse SELI, NDVI, NIRv, MSI, EVI testirala sam kao neizravne mjere za transpiraciju tako da sam napravila linearne regresije s njima kao nezavisnim varijablama, a trenutni (Q10min) i dnevni (Q24 h) protok ksilemskog soka na razini 5 mjerenih stabala i na razini sastojine kao zavisnim varijablama za svaku plohu, posebno za 2019. i 2020. godinu. Cilj mi je bio utvrditi koju zavisnu varijablu najbolje opisuje koji indeks. Nisam dijelila podatke na periode jer nije bilo puno podataka za svaki period, pogotovo u početku vegetacije, jer je tada bilo većih naoblaka, pa bi u periodu I (prije sezonskog

maksimuma dnevnog protoka ksilemskog soka) bilo manje od 5 snimki. Iz usporedbi koeficijenta determinacije svih modela odabrala sam najbolji indeks za svaku godinu i zatim posebno prikazala na grafovima.

Modele linearne regresije s najvišim koeficijentom determinacije na svakoj plohi prikazala sam na grafovima za 2019. i 2020. godinu

3.6.5. Hijerarhijska analiza ekoloških čimbenika transpiracije

Podaci na razini 30 minuta prvo su pročišćeni tako da su ostali samo potpuni podaci za sve zavisne i nezavisne varijable. Zatim sam napravila analizu vrijednosti modela s pomacima ksilemskog soka tako da sam primijenila funkciju 'lag' iz paketa 'dplyr' u R-u (Wickham i sur., 2023). Napravila sam ukupno 48 pomaka svake vrijednosti, tako da je svaka vrijednost protoka ksilemskog soka bila pomaknuta za 24 h. Ovo sam napravila da provjerim poboljšavaju li se modeli ako zavisna varijabla ima odgođeni odgovor. Svaki pomak i koeficijent determinacije tog modela prikazani su na grafu.

Kao i za podatke na razini 30 minuta, podaci za dnevne vrijednosti pročišćeni su tako da su uklonjeni nedostajući podaci za bilo koju od zavisnih ili nezavisnih varijabli. Za okolišne čimbenike mjerene svakih 30 minuta napravila sam prosjek na razini 24 h.

Za dnevne protoke sam primijenila Shapiro-Wilk test da provjerim jesu li podaci bili normalno distribuirani. Za opisivanje povezanih onih podataka koji nisu imali normalnu distribuciju, primijenila sam Spearmanov koeficijent korelacije (r_s). Izradila sam matricu grafova korelacija između dnevnog protoka ksilemskog soka i odabranih okolišnih čimbenika, na podacima za vegetacijsku sezonu 2019. i 2020. korištenjem 'ggpairs' funkciju u paketu 'Ggally' (Schloerke i sur., 2024) u R programu (R Core Team, 2024).

Zatim sam izračunala višestruke linearne regresije na podacima za 2019. i 2020. godinu zajedno i odvojeno po periodima. Zavisna varijabla bila je 30-minutni ili dnevni protok ksilemskog soka na tipičnom stablu u sastojini, a nezavisne varijable bile su okolišni čimbenici (temperatura zraka i tla, relativna vlažnost zraka i tla, osunčanost, smjer i jačina vjetera, deficit zasićenosti zraka, oborine). Periodi su određeni prema datumu maksimuma protoka ksilemskog soka (za 2019. to je bio 14.6.2019. te 5.7. za 2020.), pa su u period I uključene vrijednosti 8-dnevnih razdoblja prije datuma maksimuma, a u period II vrijednosti nakon datuma maksimuma.

Koeficijente determinacije prikazala sam tabelarno, a parametre nezavisnih varijabli modela grafovima (za 30-minutna i dnevna mjerenja). Da bih testirala multikolinearnost nezavisnih varijabli u modelu, koristila sam varijabilni faktor inflacije pomoću funkcije 'vif' u paketu 'car' u R-u (Weisberg, 2019). Vrijednost VIF od 1 znači da nema nikakve korelacije između pojedine nezavisne varijable i bilo koje druge nezavisne varijable u modelu. Vrijednosti 1-5 označavaju umjereno jaku korelaciju, no ne utječu značajno na model, dok vrijednosti veće od 5 označavaju jaku korelaciju među varijablama i uvelike smanjuju pouzdanost modela.

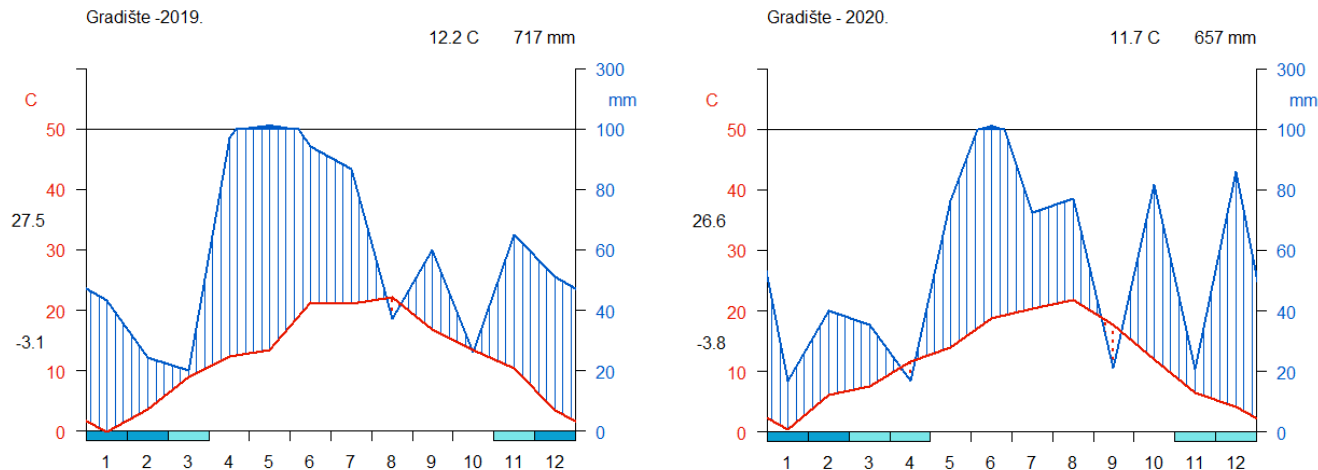
Zatim sam na svakom modelu primijenila metodu Random Forest i funkciju za izdvajanje važnosti varijable podacima za objedinjenje godine i odvojeno po periodima za svaku godinu. Koristila sam paket 'randomForest' u R-u, s funkcijom 'varImpPlot' (Liaw i Wiener, 2002). Broj ponavljanja bio je 40. Cilj ove metode je da se dobije važnost varijabli da bih mogla utvrditi hijerarhiju čimbenika koji utječu na transpiraciju.

4. REZULTATI

4.1. Rezultati terenskih mjerenja

4.1.1. Okolišni čimbenici

Minimumi temperature na meteo stanicama na plohama za obje godine (2019. i 2020.) izmjereni su u siječnju, a maksimumi u kolovozu (Tablica 11, Slika 14). Lipanj 2019. i srpanj 2020. bili su mjeseci u kojima je zabilježen maksimalni sezonski dnevni protok ksilemskog soka (poglavlje 4.1.2). Lipanj 2019. je bio topao s prosjekom od 21 ± 4 °C, te minimumom od 13,2 °C, a maksimumom od 29,8 °C. Srpanj je 2020. bio u prosjeku nešto hladniji, s prosjekom od $20,2 \pm 4,5$ °C i minimumom od 6,7 °C i maksimumom od 30,9 °C. Kumulativne oborine u 2019. iznosile su 717 mm, a u 2020. godini 657 mm (Slika 14). Maksimum mjesečnog zbroja oborina za postaju Gradište, za 2019. godinu bio je u svibnju (113 mm), dok je za 2020. maksimum bio u lipnju (također 113 mm).

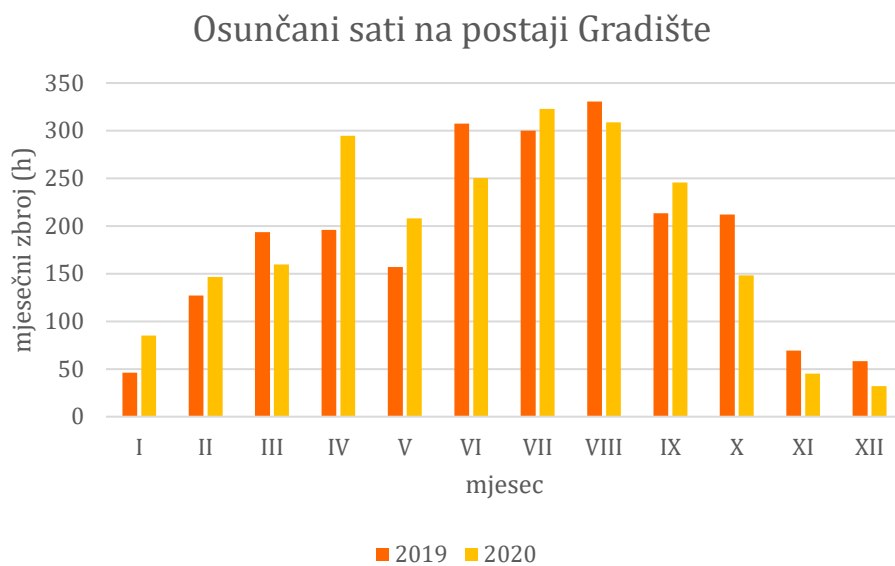


Slika 14. Temperatura zraka (na primarnoj y-osi) i oborine (mjesečni zbroj vrijednosti na sekundarnoj y-osi) za 2019. i 2020. - Walter i Lieth dijagram. Podaci za oborine zaprimljeni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda, a podaci za temperaturu (prosječni dnevni maksimum i minimum te apsolutni mjesečni minimum) izmjereni su na meteo-stanici na plohi 3.

Tablica 11. Deskriptivna statistika mjesečnih prosjeka temperatura zraka izmjerena na plohama 2, 3, 6, i 7 tijekom 2019. i 2020.

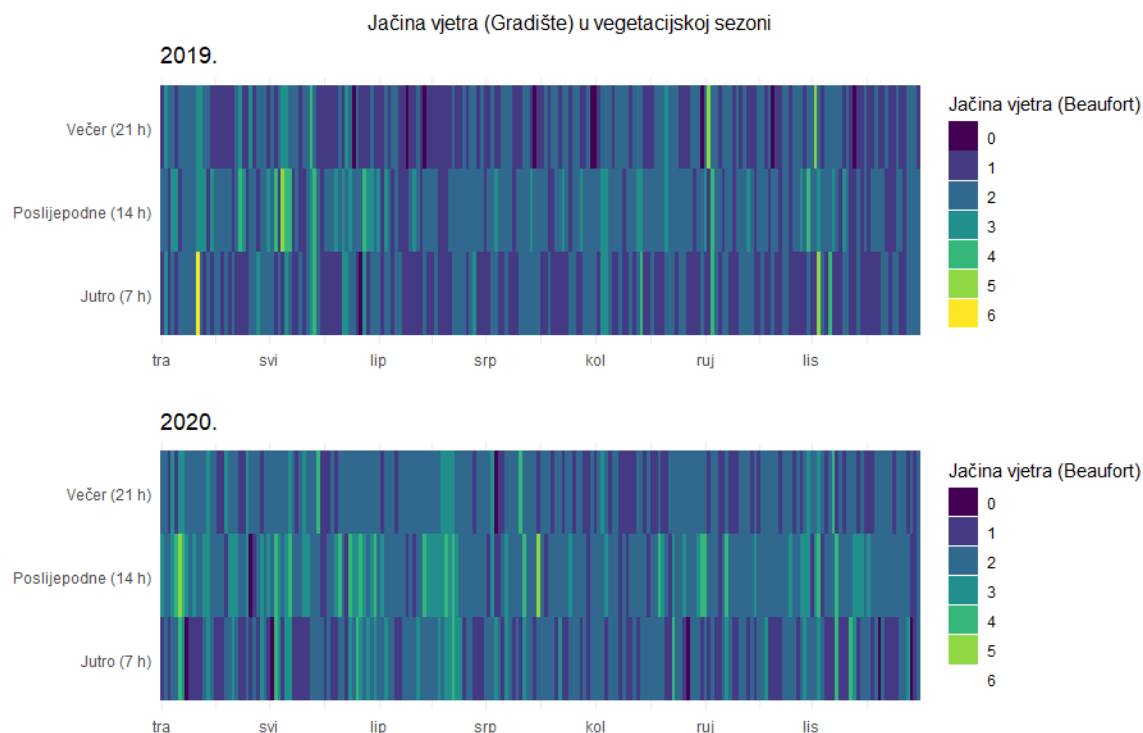
Mjesec	Prosjek ± standardna devijacija	Minimum	Maksimum	Broj mjerenja
2019.				
siječanj	-0,2 ± 2,8	-10,1	13,5	1488
veljača	3,2 ± 5,1	-8,9	20,6	1344
ožujak	8,5 ± 6,3	-3,9	25,1	1488
travanj	11,9 ± 5,7	0,6	28,2	1440
svibanj	13,2 ± 4,4	1,6	23,7	1488
lipanj	21,0 ± 4,0	13,2	29,8	1440
srpanj	20,7 ± 4,2	10,5	30,1	1488
kolovoz	21,6 ± 4,3	11,2	32,1	1488
rujan	16,2 ± 4,5	3,1	30,1	1440
listopad	12,3 ± 4,8	3,3	24,7	1488
studeni	9,7 ± 4,2	-1,8	24,1	1440
prosinac	3,1 ± 3,9	-8,0	15,9	1488
2020.				
siječanj	-0,3 ± 3,8	-8,5	16,4	1488
veljača	5,1 ± 5,1	-5,3	19,1	1392
ožujak	7,1 ± 6,0	-3,6	24,6	1469
travanj	11,4 ± 7,2	-4,5	27,1	1440
svibanj	13,9 ± 3,9	4,7	25,0	1488
lipanj	18,50 ± 4	5,9	29,8	1440
srpanj	20,2 ± 4,5	6,7	30,9	1457
kolovoz	21,4 ± 3,6	11,7	32,1	1488
rujan	17,3 ± 4,4	1,7	28,0	1440
listopad	11,6 ± 4,3	1,1	27,5	1488
studeni	6,3 ± 4,2	-2,9	19,8	1440
prosinac	3,9 ± 3,2	-6,4	14,9	1455

Maksimum mjesečnog zbroja sunčanih sati za 2019. bio je u kolovozu (330,7 h), a za 2020. godinu u srpnju (322,8 h) (Slika 15). U travnju i svibnju 2019. bilo je 33 % odnosno 24 % manje osunčanih sati nego u istim mjesecima 2020. U lipnju 2019. bilo je za 23 % više osunčanih sati nego u lipnju 2020.



Slika 15. Mjesečni zbroj osunčanih sati za 2019. i 2020. godinu na mjernoj postaji Gradište. Podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda.

Podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda pokazuju da je u razdoblju od travnja do listopada u 2019. i 2020. vjetar na postaji Gradište bio slab većinu dana, te ponekad umjeren ili umjereno jak poslijepodne (Slika 16). Jak vjetar zabilježen je samo jednom u 2019. godini i to na datum 11.4.2019. Vjetar u poslijepodnevrim satima bio je češće jači u istom danu od jutarnjih i večernjih vrijednosti u obje godine.

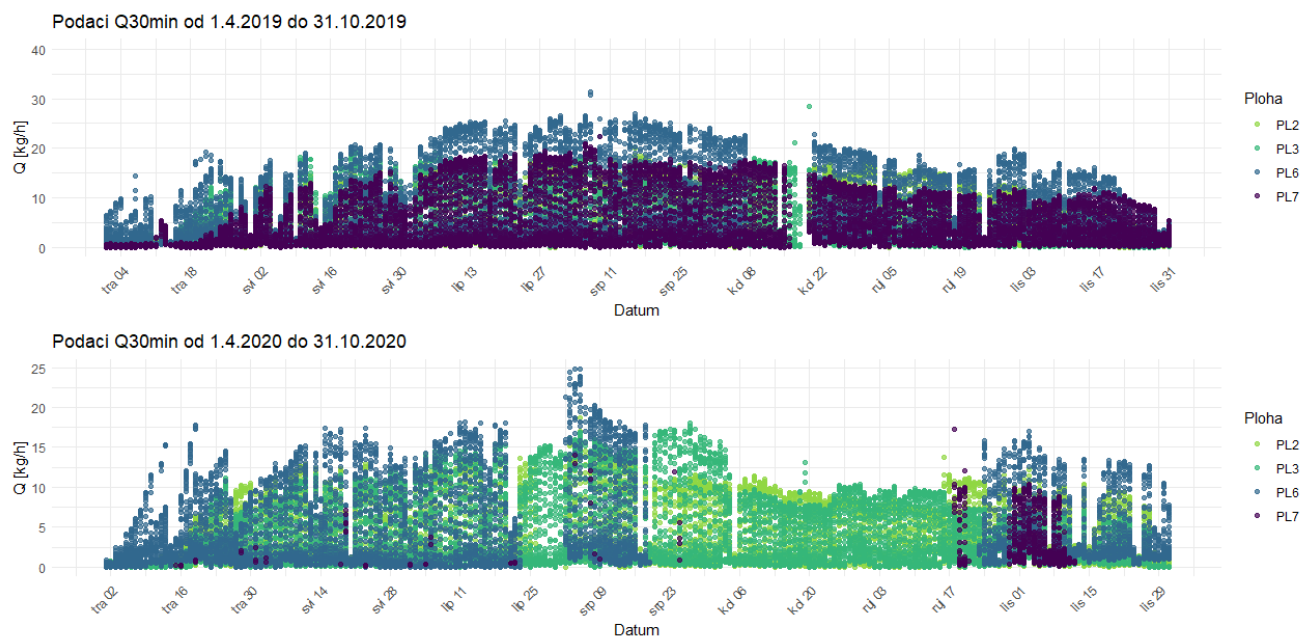


Slika 16. Jačina vjetra (dnevne vrijednosti) na postaji Gradište u vegetacijskoj sezoni (travanj-studen) za 2019. i 2020. izmjereno u 7 h, 14 h i 21 h. Beaufort skala (0-12); 0 (tišina) <math><9,3\text{ m/s}</math>, 1 (lahor): 0,3-1,5 m/s, 2 (povjetarac): 1,6-3,3 m/s, 3 (slab vjetar): 3,4-5,5 m/s, 4 (umjeren vjetar): 5,5-7,9 m/s, 5 (umjeren jak vjetar): 8-10,7 m/s, 6 (jak vjetar): 10,8-13,8 m/s. Podaci zaprimljeni i prilagođeni od Državnog hidrometeorološkog zavoda.

4.1.2. Rezultati protoka ksilemskog soka

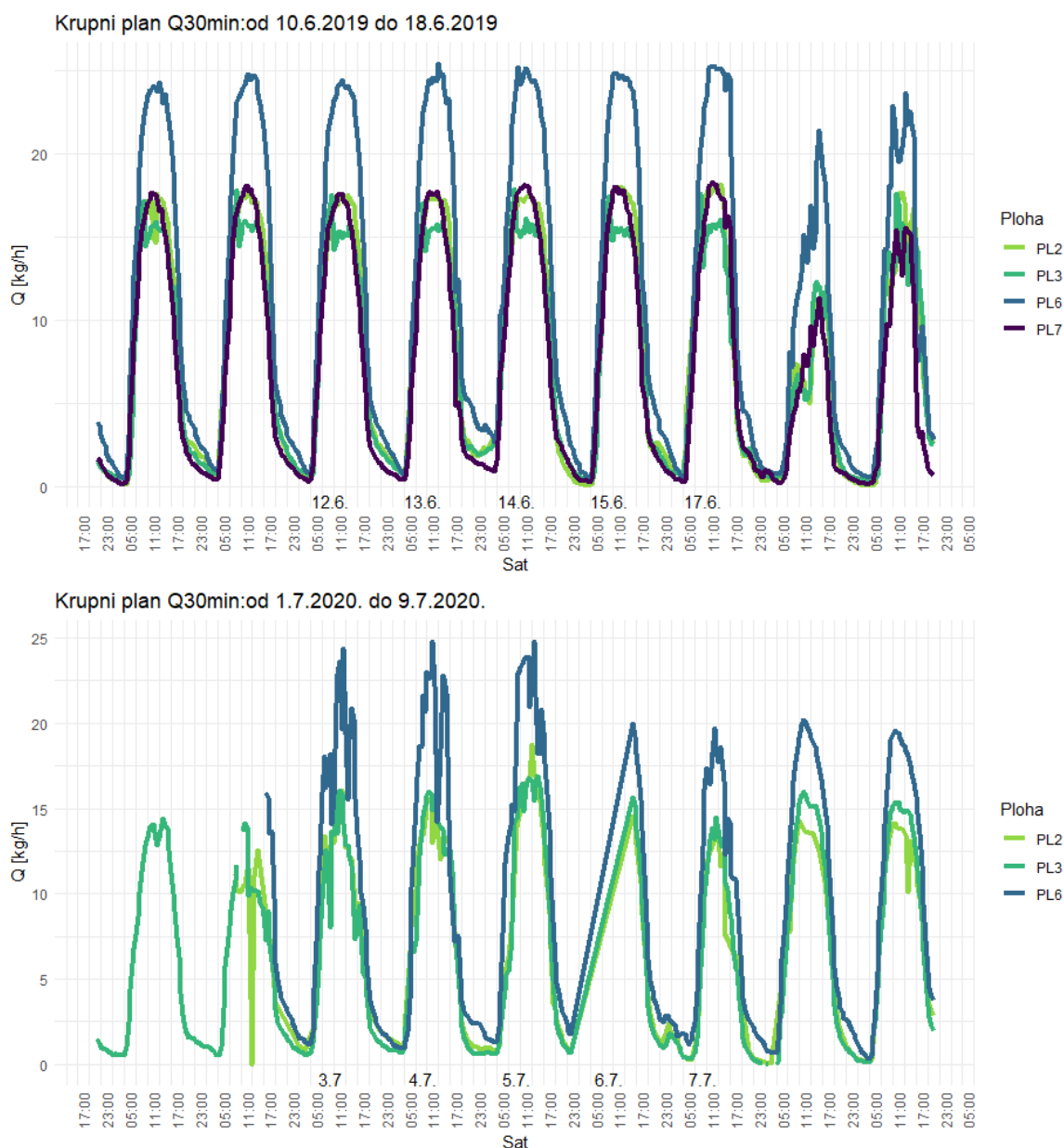
4.1.2.1. Mjerenja protoka ksilemskog soka svakih 30 minuta

Vrijednosti protoka ksilemskog soka svakih 30 minuta kroz vegetacijsku sezonu bile su veće 2019. godine nego 2020. (Slika 17). Dinamike protoka na svim plohama bile su slične, s većim kolebanjima na početku sezone (do polovice svibnja), zatim su rasle do vegetacijskog maksimuma te zatim blago padale prema kraju sezone. Na plohi 6 u obje godine protok ksilemskog soka bio je veći u usporedbi s ostalim plohama. Podaci u 2020. za plohu 7 većinom su nedostajali, ali i za plohu 6 u duljem periodu, od 20.7.2020. do 25.9.2020., nije bilo podataka.



Slika 17. Prosječni protoci ksilemskog soka svakih 30 minuta u razdoblju od 1.4.-31.10. u 2019. i 2020. godini na svim plohama.

Sezonski dnevni maksimum prosječnog protoka ksilemskog soka (zbroj svih satnih vrijednosti protoka u danu) nastupio je 14.6. u 2019. i 5.7. u 2020. godini. Protok je bio manji ujutro i u večernjim satima, a vegetacijski maksimum zabilježen je u obje godine od 11 do 17 h (Slika 18.). Na plohi 6 bio je najveći protok u obje godine, dok su plohe 2, 3 i 7 imale slične dinamike. U 2020. godini na datume oko vegetacijskog maksimuma zabilježena su veća kolebanja u 30-minutnim vrijednostima.



Slika 18. Isječak dnevnih dinamika protoka ksilemskog soka u originalnoj 30-minutnoj vremenskoj rezoluciji na datume sezonskog maksimuma (u 2019. i 2020.) \pm 4 dana.

4.1.2.2. Dnevna mjerenja protoka ksilemskog soka

Najveće prosječne dnevne vrijednosti protoka ksilemskog soka po stablu na plohama u 2019. godini bile su u travnju na plohi 6 (67 kg/dan po stablu), a za isti mjesec najmanje na plohi 7 (20 kg/dan po stablu) (Tablica 12). Ploha 3 imala je najveći prosjek protoka sa 162 kg/dan po stablu u svibnju, a zatim od lipnja do listopada najveći prosjek protoka bio je opet na plohi 6. Najveći protok na svim plohama zabilježen je u lipnju 2019. i to 14.

lipnja. Na plohama 2 i 7 dodatno je na datum 28.6. zabilježen još jedan maksimum (297 odnosno 383 kg/dan po stablu). Najveća standardna devijacija bila je u lipnju.

Tablica 12. Statistika dnevnih prosjeka protoka ksilemskog soka na plohama 2, 3, 6 i 7 za 2019. godinu.

		2019						
Ploha	Statistika prosjeka protoka ksilemskog soka svih stabala	travanj	svibanj	lipanj	srpanj	kolovoz	rujan	listopad
PL2	n	30	31	30	30	25	29	31
	prosjek [kg/24 h]	52,3	130,0	215,7	211,7	204,7	154,5	89,2
	minimum [kg/24 h]	2,3	15,2	19,3	57,4	101,9	20,6	16,4
	maksimum [kg/24 h]	176,0	208,5	297,0	290,2	262,0	287,4	188,6
	standardna devijacija [kg/24 h]	52,7	53,6	66,6	57,3	34,8	57,5	43,6
PL3	n	30	31	30	31	30	30	31
	prosjek [kg/24 h]	57,7	161,5	201,5	179,2	174,9	106,0	65,3
	minimum [kg/24 h]	3,3	16,2	17,7	81,1	36,9	21,2	16,1
	maksimum [kg/24 h]	200,6	262,1	291,8	286,3	270,2	182,7	144,6
	standardna devijacija [kg/24 h]	61,0	70,5	61,6	44,1	54,2	35,1	29,6
PL6	n	30	31	30	30	19	30	31
	prosjek [kg/24 h]	67,0	150,0	258,3	282,1	259,7	167,5	130,8
	minimum [kg/24 h]	11,4	19,4	62,5	165,1	6,4	28,7	30,5
	maksimum [kg/24 h]	201,3	256,5	382,5	361,7	316,6	266,5	272,5
	standardna devijacija [kg/24 h]	49,9	66,4	88,1	65,2	68,0	60,3	50,9
PL7	n	30	31	30	31	28	30	31
	prosjek [kg/24 h]	20,2	85,9	163,5	171,9	156,3	106,6	84,2
	minimum [kg/24 h]	1,6	12,3	37,2	96,3	19,6	26,5	29,5
	maksimum [kg/24 h]	113,8	158,5	233,0	224,5	210,4	167,8	153,0
	standardna devijacija [kg/24 h]	27,3	38,7	59,2	37,4	48,8	37,5	25,5

n – broj dana u kojima su postojali podaci

Najveći prosjek dnevnih vrijednosti protoka ksilemskog soka po stablu na plohama u 2020. godini u travnju zabilježen je na plohi 6 (54 kg/dan po stablu), no i ploha 2 imala je visok protok (51 kg/dan po stablu) (Tablica 13). Za isti mjesec najmanji protok po stablu bio je na plohi 7 (14 kg/dan po stablu). Minimalni prosječni protok na plohi 2 u lipnju 2020. je bio manji nego na ostalim plohama (0,05 kg/dan) jer su na dan 25.lipnja postojali podaci samo za jedno stablo (stablo '25') koje je i inače imalo manji dnevni protok 2020. u odnosu na druga stabla s iste plohe. Na plohi 7 nije izmjeren protok

ksilemskog soka niti na jednom stablu u kolovozu 2020. godine. Najveći prosječni protok ksilemskog soka po stablu bio je na plohi 6 u kolovozu (232 kg/dan po stablu), dok je za druge plohe najveći prosječni protok bio u srpnju (132 kg/dan za plohu 2, 187 za plohu 3 i 111 kg/dan za plohu 7). Maksimum prosječnog protoka zabilježen je u srpnju (5. srpnja) na plohi 2 (354 kg/dan po stablu), a slijedila je ploha 6 s maksimumom 1. kolovoza (347 kg/dan). Na datum 5. srpnja 2020. sve plohe imale su prvi maksimum srednjih vrijednosti, a zatim su plohe 3 i 6 imale dodatni maksimum krajem srpnja. Najveća standardna devijacija bila je u srpnju, osim na plohi 3 gdje je bila malo veća u lipnju.

Tablica 13. Statistika dnevnih prosjeka protoka ksilemskog soka (Q) svih stabala na plohama 2, 3, 6 i 7 za 2020. godinu.

		2020						
Ploha	Statistika prosjeka protoka ksilemskog soka svih stabala	travanj	svibanj	lipanj	srpanj	kolovoz	rujan	listopad
PL2	n	30	31	25	30	31	30	31
	prosjek [kg/24 h]	50,7	119,3	114,5	132,4	75,2	78,5	61,2
	minimum [kg/24 h]	2,1	18,1	0,0	17,3	7,3	37,1	7,2
	maksimum [kg/24 h]	140,8	172,4	185,4	353,8	136,9	164,4	147,1
	standardna devijacija [kg/24 h]	50,5	37,0	57,5	79,9	33,7	35,3	37,5
PL3	n	30	31	30	31	31	30	31
	prosjek [kg/24 h]	30,6	105,8	144,9	187,4	96,1	88,1	42,3
	minimum [kg/24 h]	1,0	13,3	14,2	19,4	15,3	27,9	0,2
	maksimum [kg/24 h]	98,0	152,3	221,2	241,8	208,2	122,6	103,1
	standardna devijacija [kg/24 h]	34,9	38,1	55,7	54,3	46,3	28,5	25,7
PL6	n	30	31	23	30	31	29	31
	prosjek [kg/24 h]	54,1	121,7	102,4	202,4	232,1	178,8	99,5
	minimum [kg/24 h]	2,8	5,6	10,6	12,3	67,3	20,7	12,6
	maksimum [kg/24 h]	118,9	183,6	169,6	315,9	347,0	232,6	230,6
	standardna devijacija [kg/24 h]	35,0	43,7	47,6	75,8	61,2	52,0	55,7
PL7	n	30	31	23	25	0	13	12
	prosjek [kg/24 h]	13,9	81,2	97,7	111,0	/	99,0	76,9
	minimum [kg/24 h]	0,5	5,7	7,0	0,0	/	63,8	7,9
	maksimum [kg/24 h]	62,9	115,4	163,6	189,6	/	133,0	151,1
	standardna devijacija [kg/24 h]	19,1	25,3	38,9	60,1	/	21,0	50,0

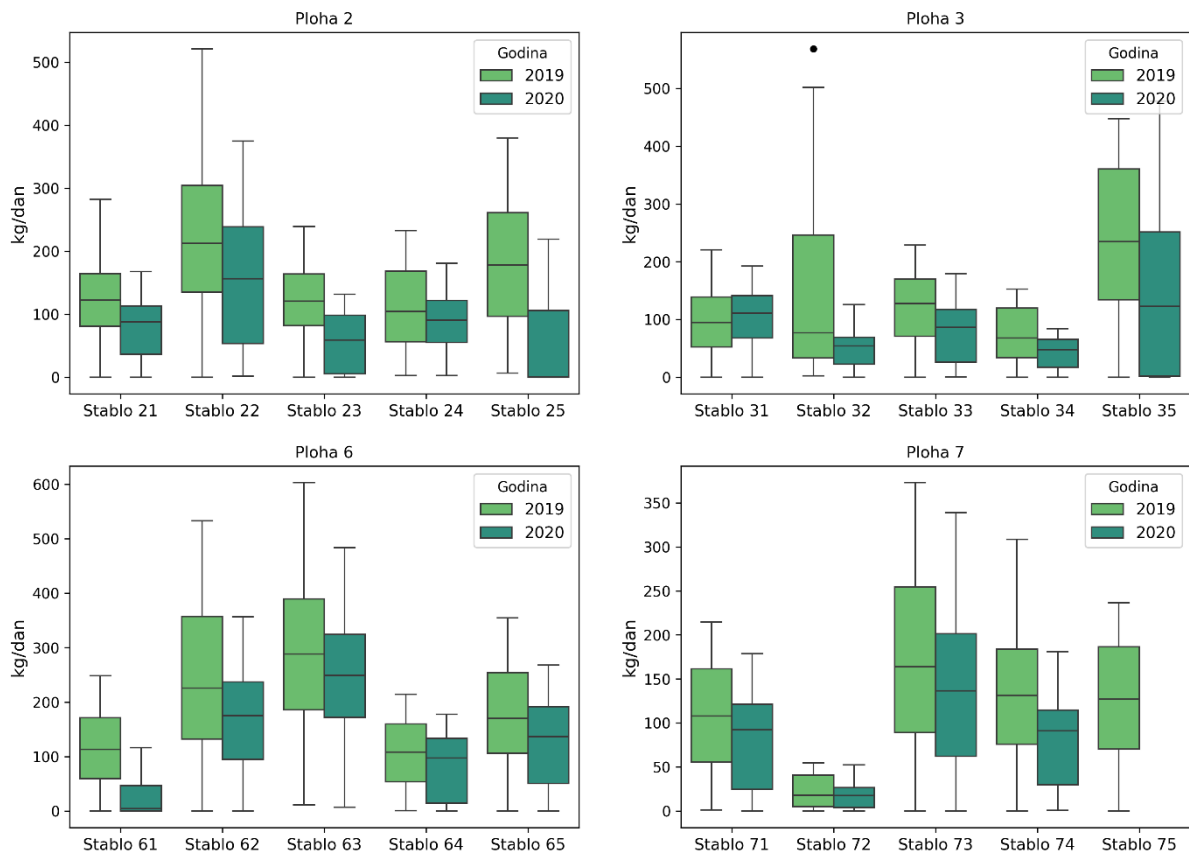
n – broj dana u kojima su postojali podaci

Ako se gledaju pojedinačna stabla (a ne prosjek vrijednosti svih stabala), maksimumi za plohe 6 i 7 preklapali su se s datumom 14. lipnja u 2019. (603 kg/dan za stablo '63', odnosno 373 kg/dan za stablo '73') (Slika 19). Ploha 2 imala je 21. kolovoza maksimum od 522 kg/dan (stablo '22') dok se na plohi 3 maksimum odgodio 25. travnja za stablo '32' i iznosio je 569 kg/dan. Druga stabla na ovim plohama na navedene datume imala su manji protok, pa je zato prosjek vrijednosti za plohu dosegao svoju najveću vrijednost na različiti datum nego maksimum pojedinačnih stabala. Dodatno, na stablu '32' na plohi 3 se krajem lipnja odlomila grana promjera oko 35 cm koja je činila četvrtinu krošnje.

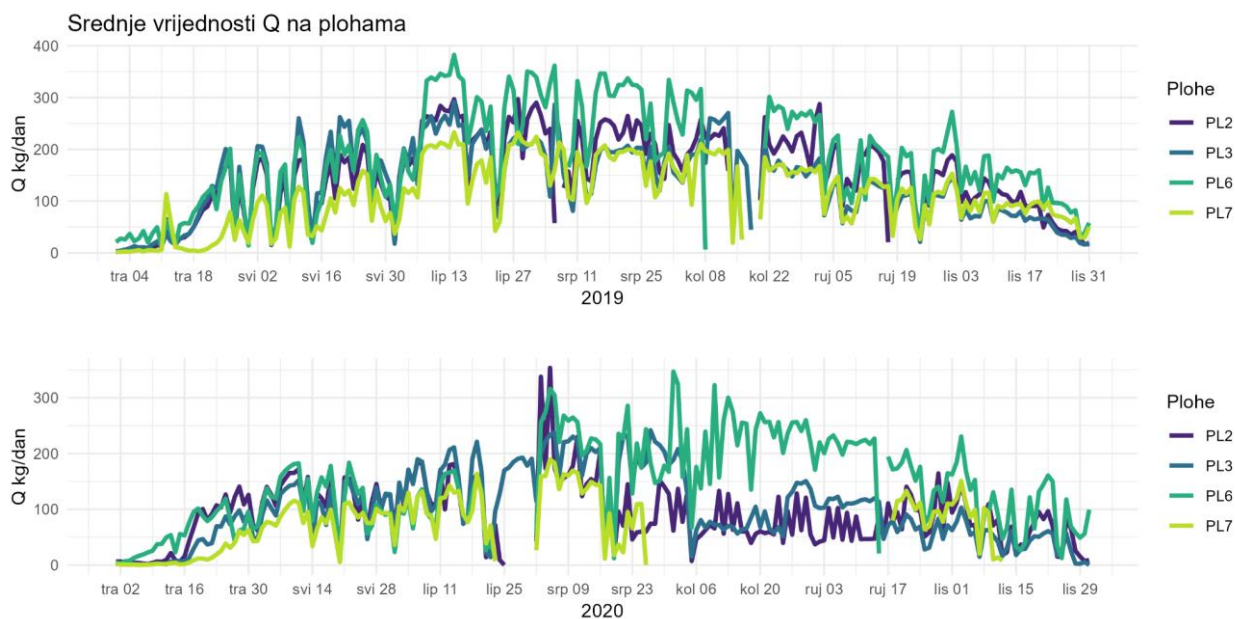
Što se tiče maksimuma protoka ksilemskog soka za 2020. (Slika 21), ploha 2 imala je 10. srpnja maksimum od 375 kg/dan (stablo '22'). Na plohi 3 maksimum zabilježen je 27. srpnja za stablo '35' i iznosio je 478 kg/dan. Na plohama 6 i 7 maksimum je zabilježen na isti dan, 5. srpnja (484 kg/dan za stablo '63' odnosno 339 kg/dan za stablo '73').

Gotovo sva stabla, osim stabla '31' na plohi 3 imala su veće dnevne protoke ksilemskog soka 2019. godine u odnosu na 2020. (Slika 19). Uspoređujući sve plohe, ploha 6 imala je najveće dnevne protoke ksilemskog soka, a ploha 7 najmanje. Stablo '63' na plohi 6 imalo je najveći prosjek dnevnog protoka u odnosu na sva stabla koji je iznosio 288 kg/dan. Na stablu '75' na plohi 7 nisu postojala mjerenja u 2020. godini zbog kvara uređaja.

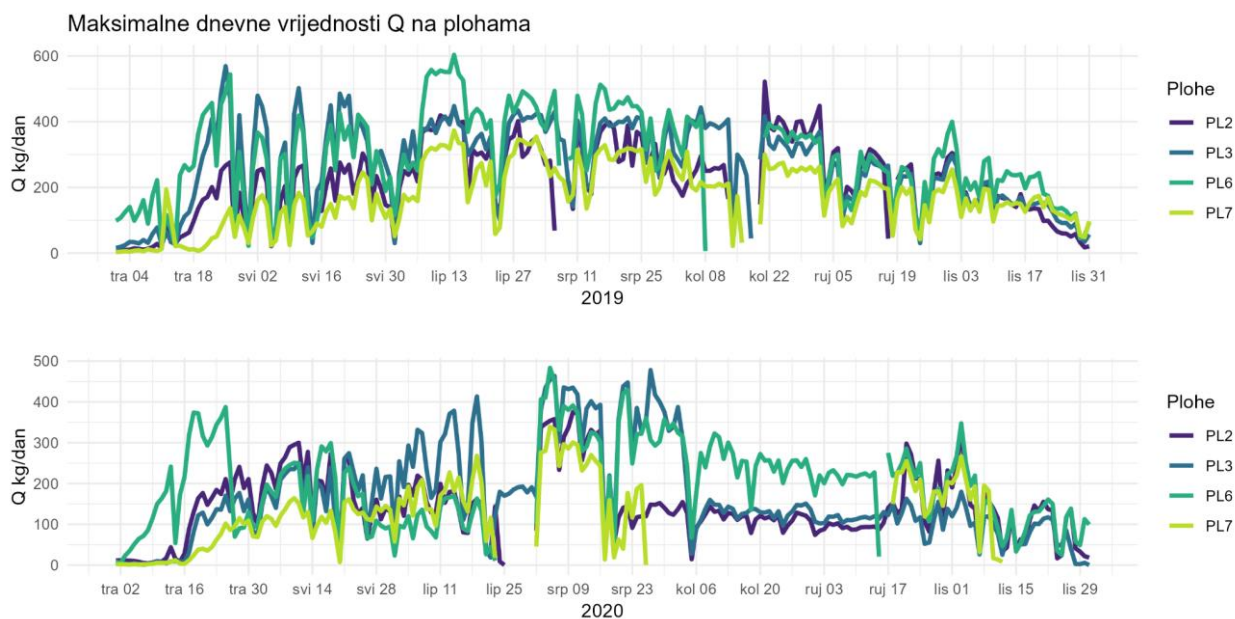
Dnevni protoci ksilemovog soka po stablu



Slika 19. Dnevni protoci ksilemskog soka po stablu na svakoj plohi za vegetacijski period 2019. i 2020. godine.



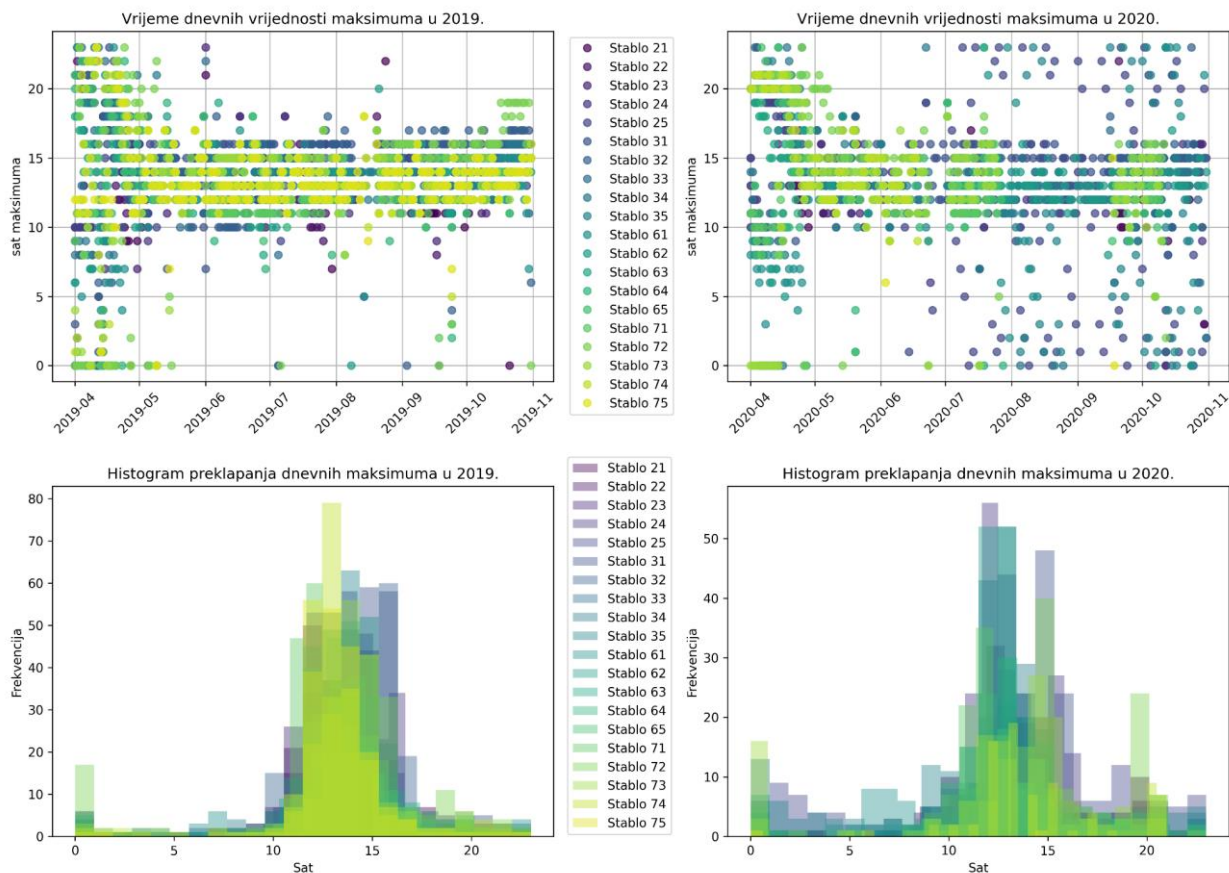
Slika 20. Srednje vrijednosti terenski mjenog dnevnog protoka ksilemskog soka (Q) svih stabala na plohama 2, 3, 6 i 7 za vegetacijski period (1.4.-31.10.) u 2019. i 2020.godini



Slika 21. Maksimalne dnevne vrijednosti terenski mjenog protoka ksilemskog soka na plohama 2, 3, 6 i 7 za vegetacijski period (1.4.-31.10.) u 2019. i 2020.godini

Dnevni maksimumi stabala na svim plohama u 2019. i 2020. godini u travnju su se događali tijekom cijelog dana, a često i nakon ponoći, da bi od svibnja većina maksimuma

bila zabilježena između 11 i 16 sati (Slika 22). U 2020. godini stabla na plohama 2 i 3 imala su dnevne maksimume i u kasnijim satima (nakon zalaska sunca) tj. češće nego što se to događalo 2019.



Slika 22. Vrijeme dnevnih maksimuma terenski mjerelog protoka ksilemskog soka za svako stablo na svim plohama (plohe 2, 3, 6 i 7) te histogram vrijednosti preklapanja dnevnih maksimuma za vegetacijski period (1.4.-31.10.) u 2019. i 2020.godini.

Na slici (Slika 23) vidljivo je da se dinamika protoka na svim plohama postupno povećava uz povremene padove do sredine lipnja u 2019. (maksimum 14.6.2019., $\bar{Q} = 245 \text{ kg}/24 \text{ h}$) i do početka srpnja u 2020. (maksimum 5.7.2020. $\bar{Q} = 200 \text{ kg}/24 \text{ h}$) te se zatim kreće smanjivati prema kraju vegetacijske sezone. Datumi u 2019. na kojima su zabilježeni padovi prosječnog dnevnog protoka za više od 75 % u odnosu na prethodni dan su 27.4., 5.5., 9.5., 14.8., a u 2020. godini bili su 20.5., 21.6., 17.17., 19.17., 5.8., 7.10. i 24.10.

Preko ljeta došlo je i do najvećih odstupanja vrijednosti na plohama (interval pouzdanosti, Slika 23). Najveća odstupanja od dnevnog prosjeka bila su 6.7.2019. (± 101 kg/24 h) i 10.8.2020. (± 99 kg/24 h).

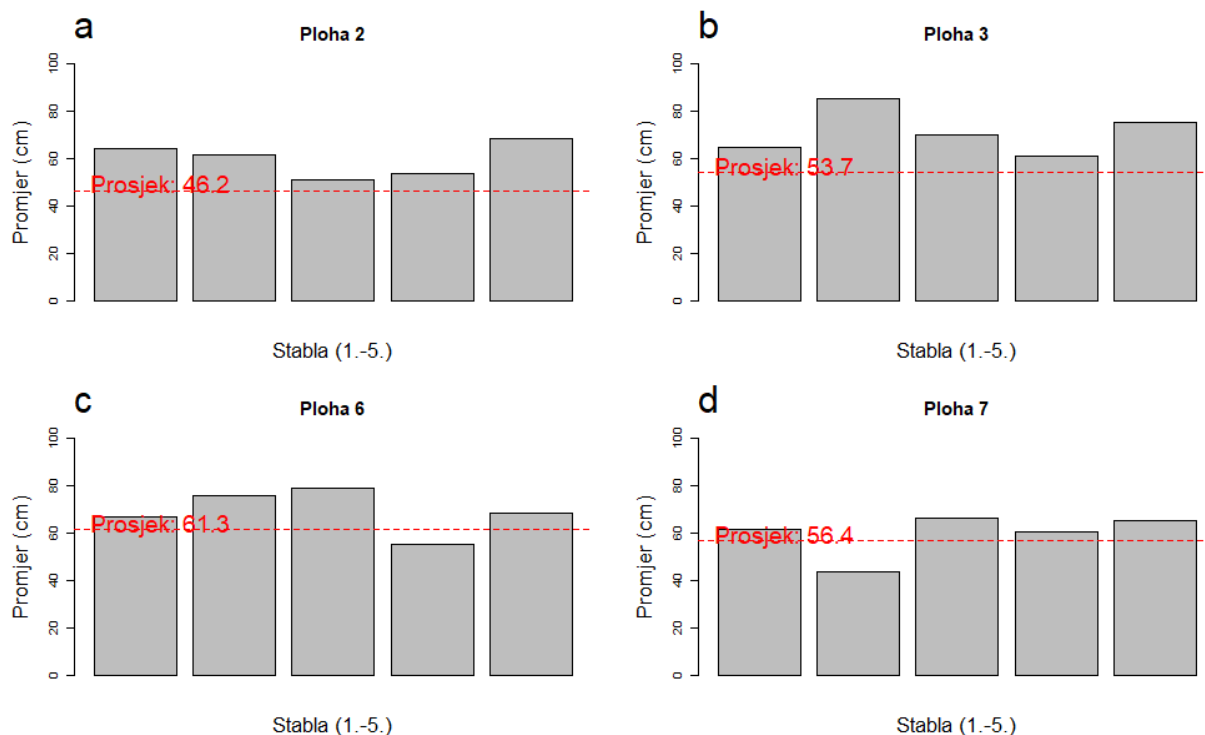
Prosječni dnevni protok ksilemskog soka (Q) na svim plohama



Slika 23. Prosječni dnevni protok terenski mjenog ksilemskog soka (Q) na svim plohama u 2019. i 2020. godini.

4.1.3. Prsni promjeri stabala hrasta lužnjaka na plohama

Usporedila sam podatke za prsne promjere pet stabala na kojima se mjerio protok ksilemskog soka na plohama 2, 3, 6 i 7 s podacima srednjeg prsnog promjera stabla hrasta lužnjaka u sastojinama (prema podacima Hrvatskih šuma) u kojima su se plohe nalazile (Slika 24). Ploha 2 imala je najmanji prosjek promjera stabala na razini sastojine od 46,2 cm (Slika 24 a). Prosjek prsnog promjera stabla bio je najveći u sastojini u kojoj se nalazila ploha 6, sa srednjim prsnim promjerom stabla lužnjaka od 61,3 cm (Slika 24 c.). Sva stabla na kojima je mjen protok ksilemskog soka imala su nešto veći prsni promjer od prosjeka odgovarajuće plohe, osim jednog stabla na plohi 6 (stablo '64') i jednog na plohi 7 (stablo '72').

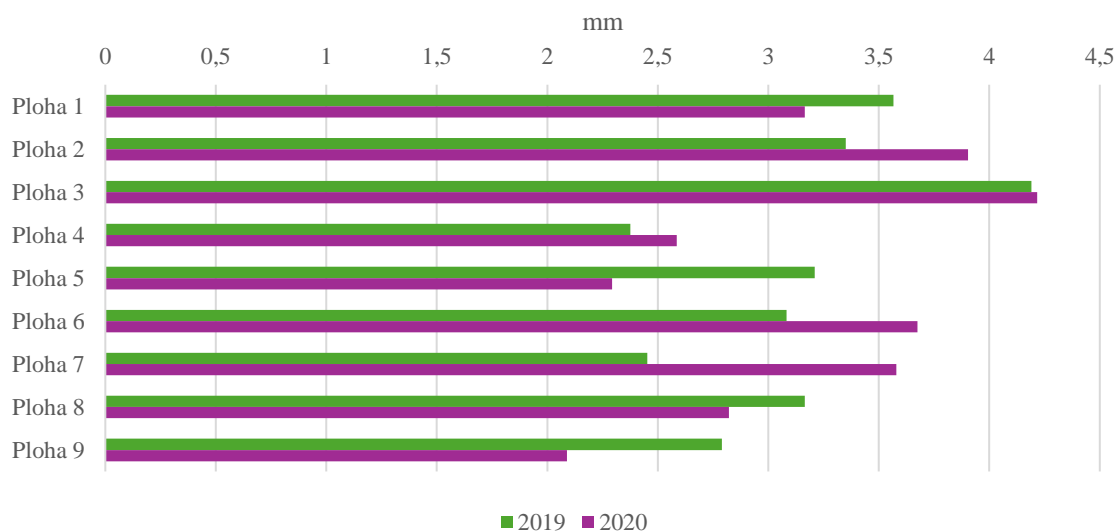


Slika 24. Prsni promjeri stabla na kojima se mjerio protok ksilemskog soka na svakoj plohi i usporedba s prosjekom prsnih promjera na razini sastojine (podaci zaprimljeni od Hrvatskih šuma d.d.).

4.1.4. Debljinski prirast hrasta lužnjaka

Najveći debljinski prirast promjera stabala bio je na plohi 3 u obje godine (oko 4,3 mm godišnje) (Slika 25). Plohe 2, 6, i 7 također su imale veće debljinske priraste u 2020. godini u odnosu na druge plohe. Ploha 7 imala je i najveću razliku debljinskog prirasta između 2020. i 2019. godine (za 1,1 mm veći debljinski prirast u 2020. nego u 2019.). Prosjeck svih ploha za obje godine bio je 3,14 mm (3,17 mm u 2019. i 3,11 mm u 2020.)

Prosječni kumulativni debljinski prirast hrasta lužnjaka

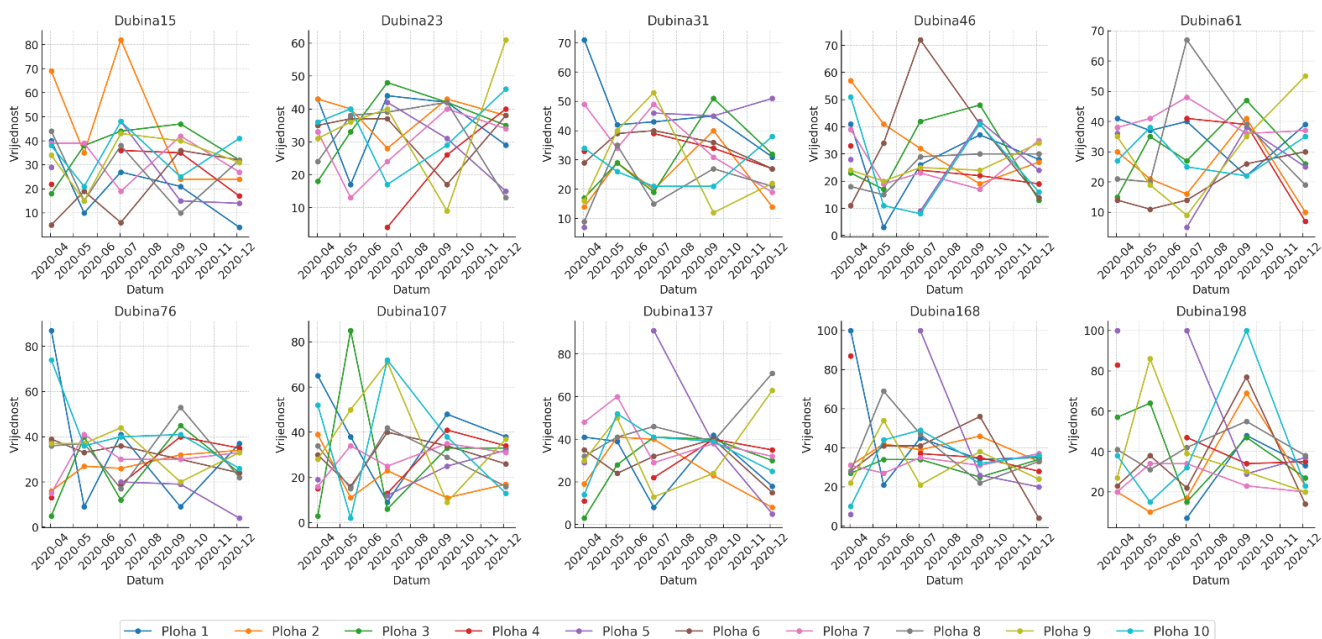


Slika 25. Prosječni kumulativni debljinski prirast hrasta lužnjaka na plohama za 2019. i 2020. Prosjek je napravljen na kumulativnom debljinskom prirastu pet stabala na svakoj plohi.

4.1.5. Vlaga tla

Veće vrijednosti vlažnosti tla u odnosu na ostatak mjerenja u godini izmjerene su na svim plohama 2.7.2020. na dubinama 15-61 cm (Slika 26). U dubljim slojevima tla (na 76 i 198 cm) 18.9.2020. zabilježene su veće vrijednosti vlage u tlu nego na ostale datume na istim dubinama. Na plohi 5 je 2.7.2020. na dubinama 137-198 bila voda (razina podzemne vode došla je do cijevi za mjerenje vlage u tlu). Ploha 2 imala je veće vrijednosti vlage u plitkim slojevima (15-23 cm) nego ostale plohe, a u slojevima od 76 do 168 cm vlaga je tijekom godine većinom bila ispod 40 %.

Vlaga tla (%) na različitim dubinama na plohama u 2020.



Slika 26. Vlaga tla na različitim dubinama na svih 10 plohama na datume 2.4.2020., 15.5.2020., 2.7.2020., 18.9.2020. i 4.12.2020.

4.2. Rezultati daljinskog motrenja

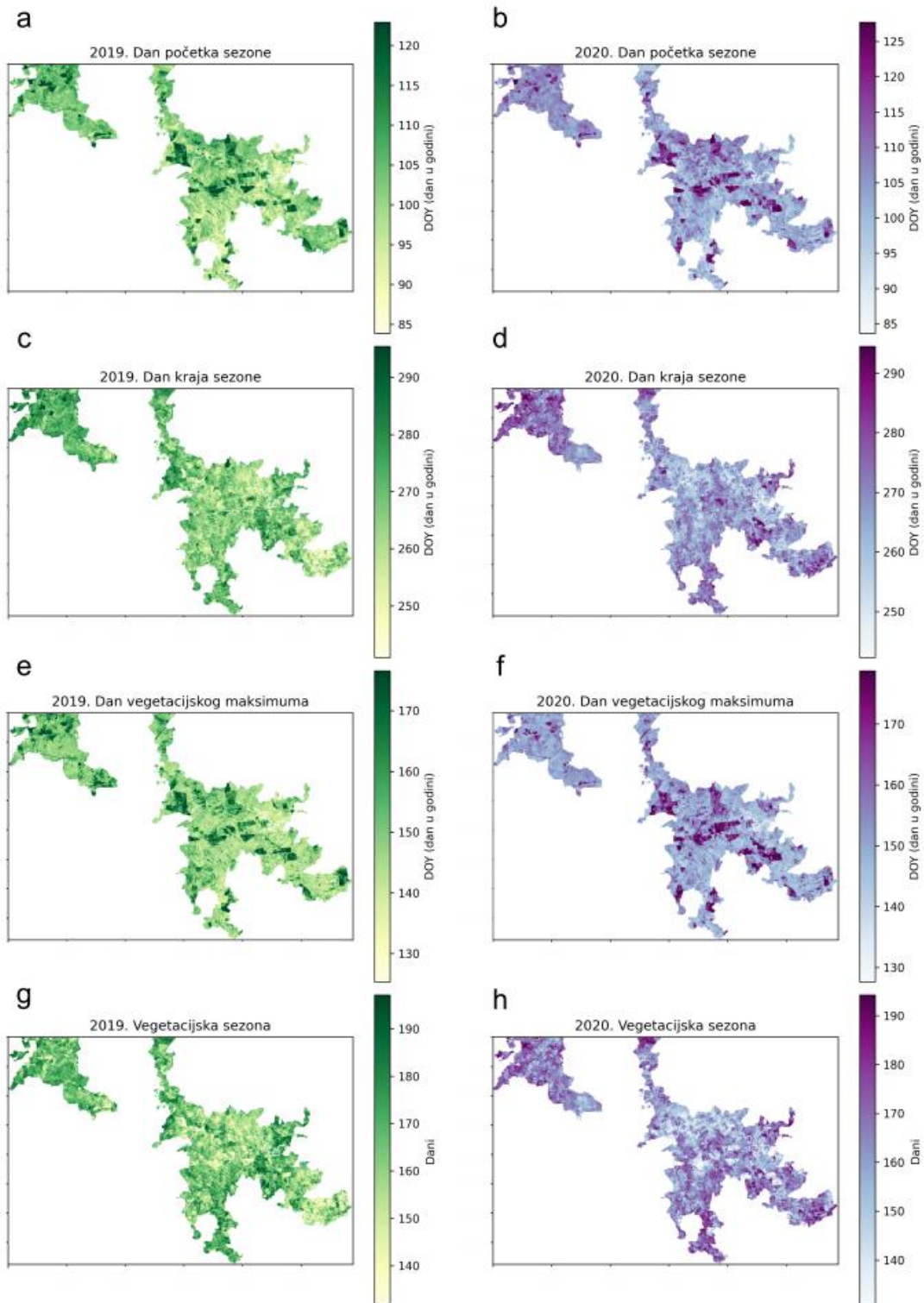
4.2.1. Fenološke faze vegetacije

Prema podacima Copernicus Land Monitoring Service produkta HR-VPP, dan početka vegetacijske sezone i 2019. i 2020. je za sve plohe bio u prvoj polovici travnja odnosno između 90. i 105. dana u godini. Sve plohe, osim plohe 7, imale su 2020. godine nešto kasniji početak vegetacijske sezone (maksimalno + 8 dana na plohi 6) u odnosu na 2019. (Tablica 14).

Na kartama (Slika 27 a i b) su tamnijom bojom istaknuti odjeli i odsjeci u kojima je početak vegetacijske sezone nastupio kasnije u odnosu na ostale dijelove spačvanske šume. Dan kraja vegetacijske sezone pak nije bio toliko izražen kao početak u cijeloj spačvanskoj šumi, tj. kraj sezone zabilježen je u slično vrijeme na svim dijelovima (Slika 27 c i d). Na plohama je dan kraja vegetacijske sezone nastupio većinom u rujnu (za plohu 6 početkom listopada). Na svim plohama, osim plohe 7, godine 2020. nastupio je raniji

kraj sezone u odnosu na 2019. (maksimalno -15 dana na plohi 6). Kraj vegetacijske sezone došao je kasnije na sjeverozapadnom dijelu spačvanske šume u obje godine (Slika 27 c i d). Vegetacijski maksimum zabilježen je za sve plohe u drugoj polovici svibnja (Slika 27 e i f, Tablica 14), a ukupno trajanje vegetacijske sezone bilo je dulje 2019. nego 2020., osim za plohu 7 (Slika 27 g i h, Tablica 14). Fenološki indeks u početku i na kraju sezone te njegov maksimum bio je veći na svim plohama u 2020., osim plohe 7. koja je 2020. imala manje vrijednosti (Tablica 15). Maksimalnu vrijednost fenološkog indeksa (na datum 19.5.2020.) imala je ploha 3 (Tablica 15).

Datumi pojave fenoloških faza vegetacije



Slika 27. Dani u godini u kojima su nastupili početak vegetacijske sezone, kraj sezone, njen maksimum i ukupno trajanje (u danima) sezone za područje spačvanske šume u 2019. i 2020. godini.

Tablica 14. Datumi početka, kraja i maksimuma vegetacijske zone, te duljina njenog trajanja za plohe 2, 3, 6 i 7 u 2019. i 2020. godini. Podaci prema Copernicus Land Monitoring Service produktu HR-VPP.

Ploha	Dan početka sezone		Dan kraja sezone		Dan vegetacijskog maksimuma		Duljina trajanja vegetacijske sezone (ukupno dana)	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
PL2	11.4.	15.4.	12.9.	6.9.	21.5.	29.5.	154	143
PL3	5.4.	10.4.	28.9.	16.9.	20.5.	19.5.	175	158
PL6	4.4.	12.4.	4.10.	19.9.	27.5.	25.5.	183	159
PL7	14.4.	9.4.	23.9.	28.9.	27.5.	28.5.	161	171

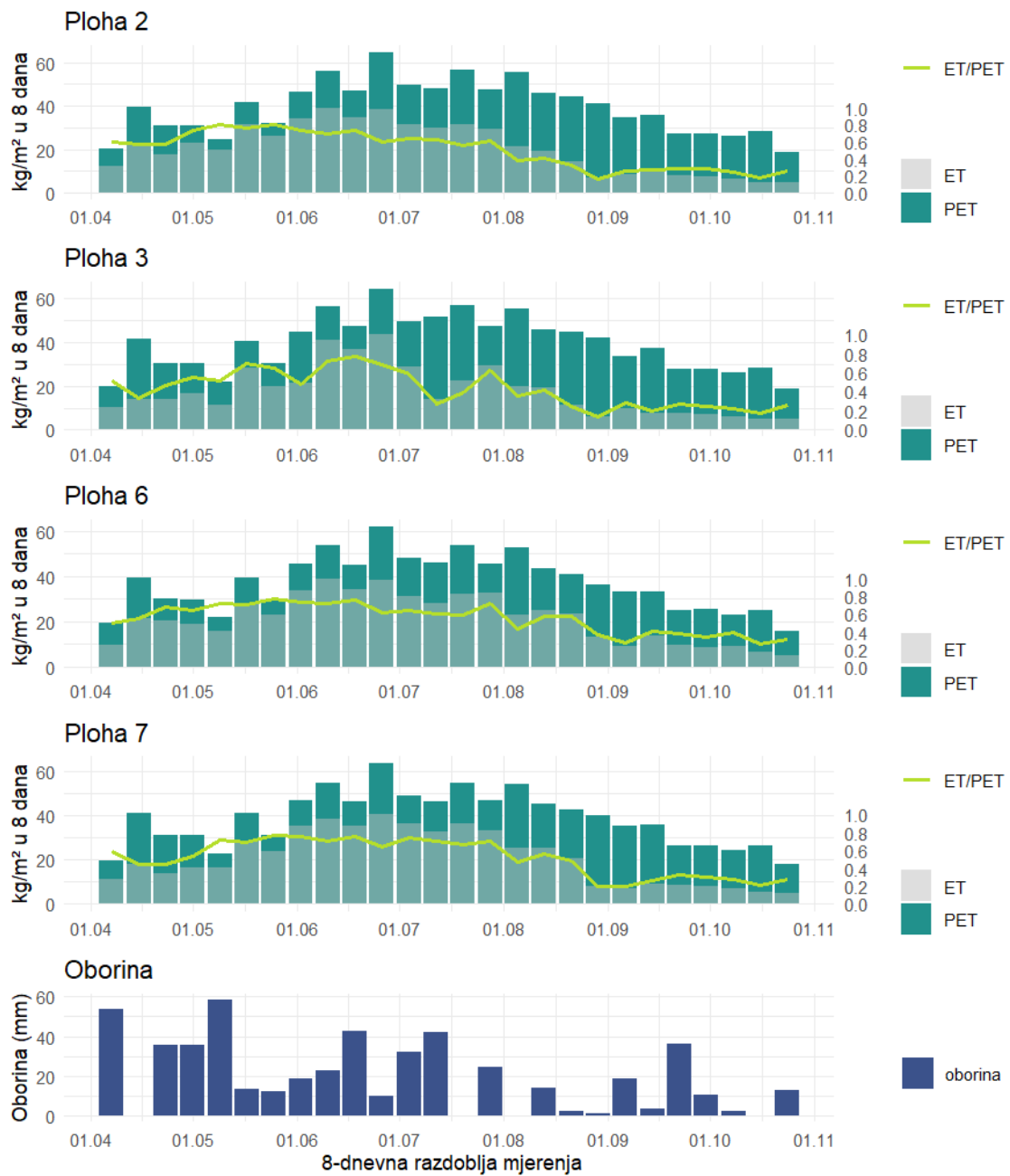
Tablica 15. Vrijednosti fenološkog indeksa (PPI) na početku i kraju sezone, prosjek minimuma i maksimalna vrijednost za plohe 2, 3, 6 i 7 u 2019. i 2020. godini. Podaci prema Copernicus Land Monitoring Service produktu HR-VPP.

Ploha	Početak sezone		Kraj sezone		Prosjek minimuma na početku i kraju sezone		Maksimalna vrijednost	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
PL2	0,31	0,41	0,19	0,24	0	0	1,24	1,63
PL3	0,31	0,59	0,19	0,36	0	0	1,21	2,35
PL6	0,28	0,50	0,18	0,31	0,03	0,03	1,02	1,94
PL7	0,55	0,52	0,37	0,35	0,09	0,09	1,93	1,79

4.2.2. Sezonska dinamika evapotranspiracije

Vrijednosti evapotranspiracije (ET) i potencijalne evapotranspiracije (PET) na svim plohama u 2019. rasle su do kraja lipnja te zatim blago padale prema kraju sezone (Slika 28). Maksimum ET je na plohama 3 i 7 zabilježen u tjednu 26.6.-3.7.2019. te je tada ukupna tjedna ET iznosila oko 42 kg/m^2 , dok je na plohama 2 i 6 maksimum ET bio u tjednu 10.6.-17.6.2019., s ukupnom tjednom ET oko 39 kg/m^2 . Na svim plohama maksimum PET bio je u tjednu 26.6.-3.7.2019. i iznosio je oko 64 kg/m^2 . Omjer ET/PET na plohama 2, 6 i 7 bio je najveći u tjednu 25.5.-1.6.2019., a na plohi 3 u tjednu 18.6.-25.6.2019. Najmanji omjer ET/PET za plohe 2, 3 i 7 bio je u tjednu 29.8.-5.9.2019., a za plohu 6 u tjednu 16.10.-23.10. Period u kojem je bilo najviše oborina bio je u tjednu od 9.5.2019. Kumulativno je u travnju bilo 90 mm oborina, u svibnju 120 mm, lipnju 94 mm, srpnju 100 mm, kolovozu 18 mm, rujnu 69 i studenom 16 mm.

2019. MODIS ET i PET, oborina



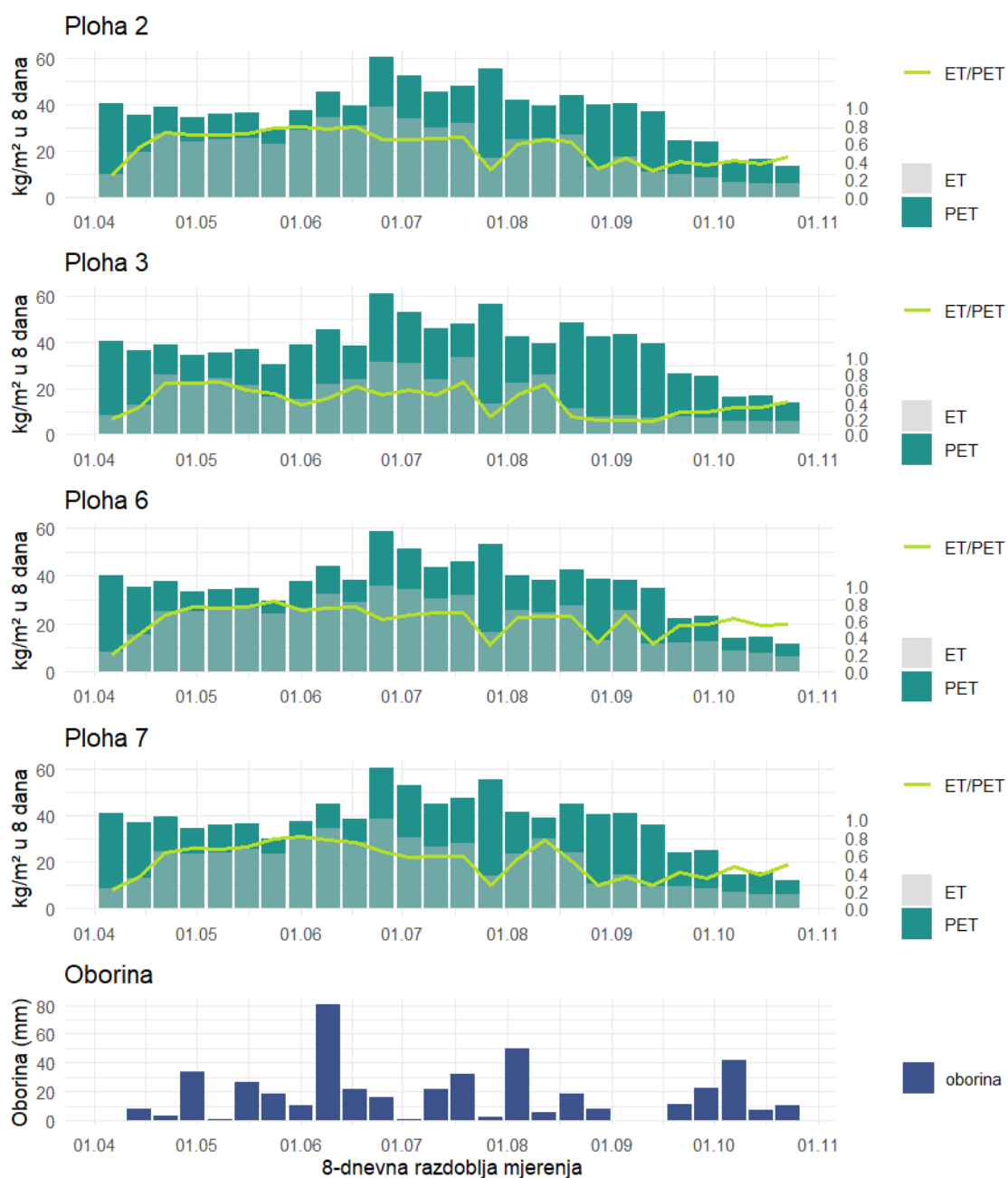
Slika 28. MODIS evapotranspiracija (ET) i potencijalna evapotranspiracija (PET), njihov omjer (ET/PET, vrijednosti na sekundarnoj y-osi) na ploham 2, 3, 6 i 7 te oborine na mjernoj postaji Gradište za vegetacijsku sezonu 2019.

U 2020. godini vrijednosti ET i PET na svim plohama bile su sličnih dinamika (Slika 29). Osmodnevnii maksimum ET bio je za plohe 2, 6 i 7 u tjednu 25.6.- 2.7.2020. te je iznosio oko 38 kg/m², a za plohu 3 u tjednu 19.7.-26.7.2020. je iznosio 33 kg/m². Maksimumi PET na svim plohama zabilježeni su u tjednu 25.6.- 2.7.2020. s prosjekom oko 60 kg/m². Maksimumi omjera ET/PET varirali su po plohama, pa je na plohi 2 maksimum bio od 17.6.2020., na plohi 3 od 19.7.2020., na plohi 6 od 24.5.2020. i na plohi 7 od 1.6.2020. Minimumi omjera ET/PET detektirani su 6.4.-13.4.2020. na plohama 2, 6 i 7, a za plohu 3 u tjednu 13.9.-20.9.2020. Veći pad vrijednosti omjera ET/PET zabilježen je u tjednu 27.7.-3.8.2020.

Najveća oborina u 8-dnevnom periodu bila je 9.6.-16.6.2020. i iznosila je 80 mm. Kumulativno u travnju je bilo 46 mm oborina, svibnju također 46 mm, lipnju 130 mm, srpnju 58 mm, kolovozu 83 mm, rujnu 34 mm i listopadu 60,5 mm. Općenito je u vegetacijskoj sezoni bilo više oborina u 2019. nego u 2020., kumulativno 506 mm u 2019., odnosno 460 mm u 2020.

U travnju, svibnju, srpnju i rujnu 2020. bilo je barem 50 % manje oborina nego u istim mjesecima 2019. S druge strane, lipanj, kolovoz i listopad u 2020. imali su značajno više oborina nego u istim mjesecima 2019.

2020. MODIS ET i PET, oborina

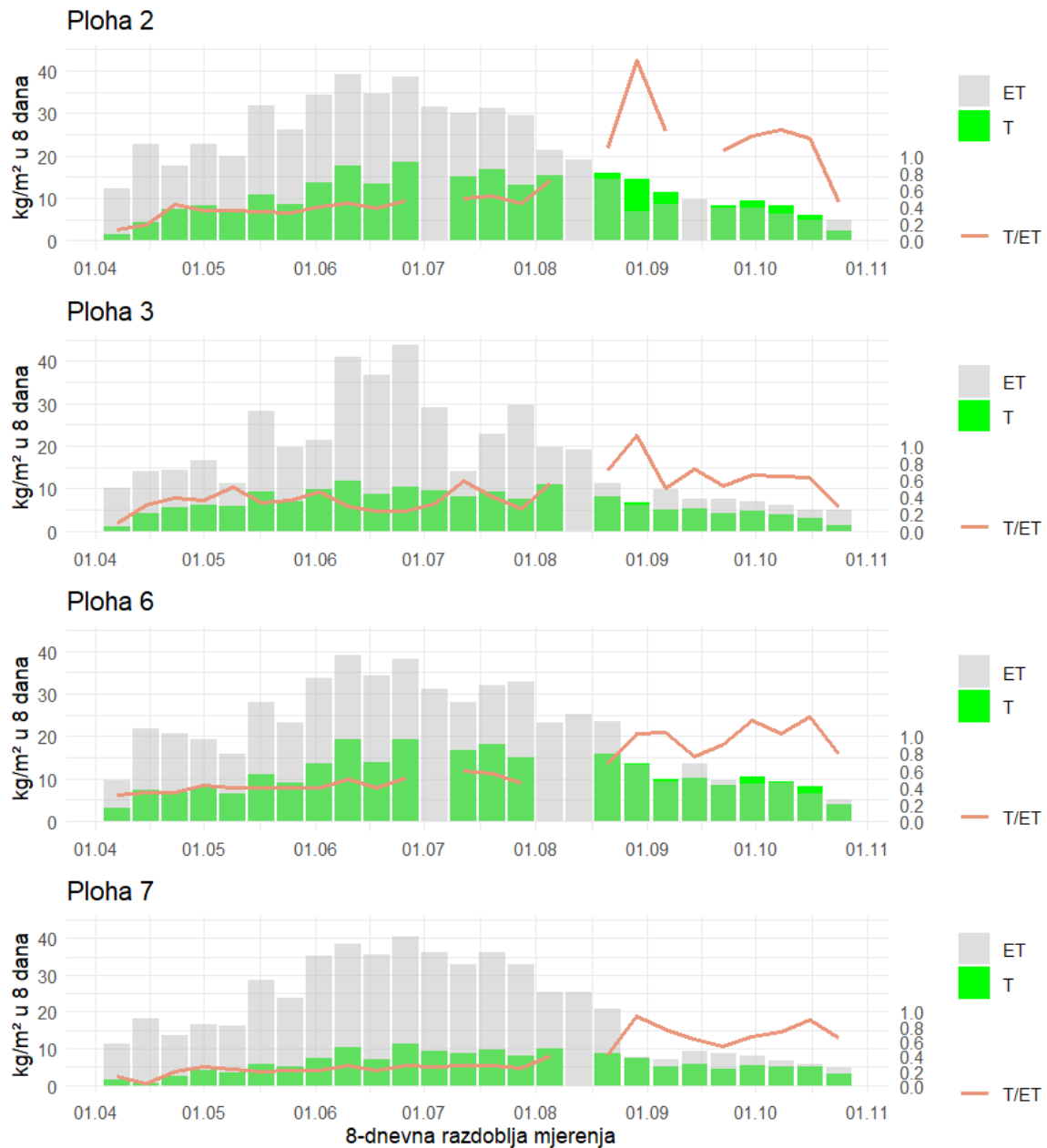


Slika 29. MODIS evapotranspiracija (ET) i potencijalna evapotranspiracija (PET), njihov omjer (ET/PET, vrijednosti na sekundarnoj y-osi) na plohama 2, 3, 6 i 7 te oborine na mjernoj postaji Gradište za vegetacijsku sezonu 2020.

U 2019. godini 8-dnevni zbrojevi vrijednosti terenski mjenog protoka ksilemskog soka (T) kretali su se uzlazno do maksimuma u tjednu od 10.6.2019. za plohu 3 i od 26.6.2019. za plohe 2, 6 i 7 (Slika 30). Maksimum T bio je na plohi 6 ($19 \text{ kg/m}^2/8$ dana), zatim na plohi 2 ($18 \text{ kg/m}^2/8$ dana), plohi 3 ($12 \text{ kg/m}^2/8$ dana) i plohi 7 ($11 \text{ kg/m}^2/8$ dana). Maksimumi MODIS ET zabilježeni su oko dva tjedna ranije za plohe 2 i 6, dok je na plohi 3 maksimum ET bio dva tjedna kasnije od maksimuma T. Na plohi 7 maksimum T i ET su se preklopili u istom periodu u tjednu od 26.6.2019.

Najčešći omjer T/ET na plohama 2 i 6 bio je 0,5, na plohi 3 iznosio je 0,4 i na plohi 7 najmanji od 0,3. Krajem kolovoza pa sve do kraja listopada, omjer T/ET prelazio je 1 na plohama 3 i 6, a na plohi 3 samo u tjednu od 29.8.2019. (8 dana kasnije spustio se na vrijednosti ispod 1). Na plohi 7 omjer T/ET je također bio najviši u tjednu od 29.8.2019., no nije prelazio 0,94.

2019. MODIS ET i T



Slika 30. Usporedni prikaz dinamike MODIS evapotranspiracije (ET) (8-dnevni zbroj) i protoka ksilemskog soka (T) izmjereno na terenu (na razini sastojine, 8-dnevni zbroj) za travanj-listopad 2019. Na dane kad terenski mjereno podaci za transpiraciju nisu bili cjeloviti (npr. nedostajali su potpuni podaci za cijeli dan), cijeli 8-dnevni period nije imao procjenu transpiracije. Vrijednosti omjera T/ET prikazane su na sekundarnoj y-osi.

U 2020. godini 8-dnevni zbrojevi vrijednosti T imali su maksimalne vrijednosti u tjednu od 3.7.2020. na plohama 2, 3 i 7 (15, 10 i 9 kg/m²/8 dana), dok je na plohi 6 bio u tjednu od 27.7.2020. (17 kg/m²/8 dana) (Slika 31). Maksimumi ET nisu se preklapali s maksimumima T, primjerice na plohama 2, 6 i 7 maksimum ET je bio tjedan dana ranije, a na plohi 3 dva tjedna ranije.

Najniži omjeri T/ET bili su u početku sezone i polako rasli do tjedna 27.7.2020. kad je nastupio prvi veći skok vrijednosti na plohama 2, 3 i 6, ali 8 dana kasnije vratili su se na prethodne vrijednosti. Na plohama 2 i 7 omjer T/ET bio je najveći 29.9.2020. i iznosio 1 (ploha 2) i 0,65 (ploha 7), na plohi 3 bio je najveći u tjednu od 28.8. (0.84), na plohi 6 je maksimum iznosio 1,1 u tjednu od 27.7.2020. Najčešći omjer T/ET na plohama 2 i 3 bio je 0,3, na plohi 6 iznosio je 0,5, dok je na plohi 7 bio najmanji s vrijednosti 0,2.

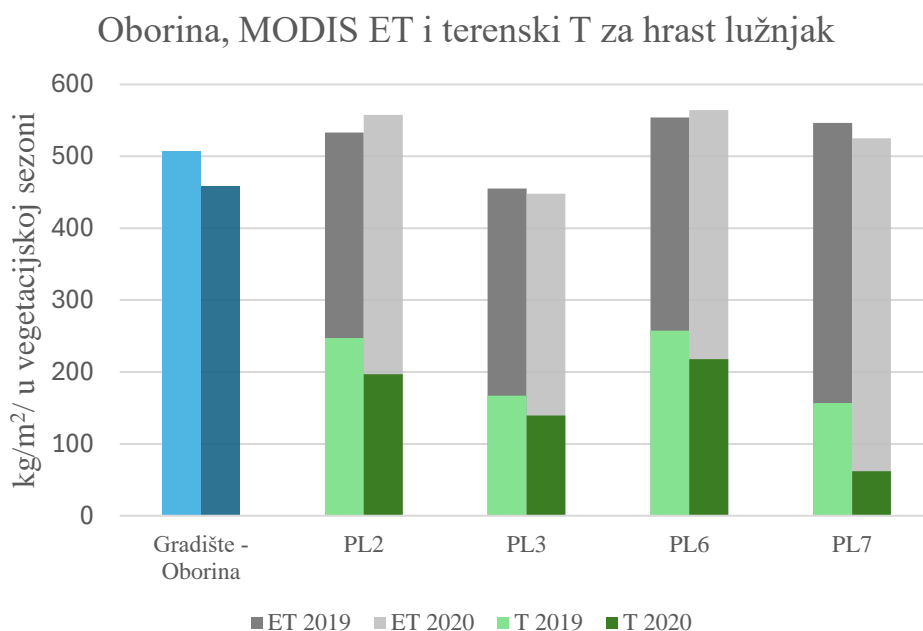
Shapiro-Wilk test normalnosti razlike vrijednosti ET u 2019. s 2020. na svim plohama bio je veći od 0,05, što znači da nema značajnog odstupanja razlika od normalne distribucije. Isto sam napravila i za podatke T i također su razlike pokazale normalnu distribuciju. Zatim sam pristupila t-testu za povezane uzorke koji je za sve plohe pokazao da nema značajne međusobne razlike između vrijednosti ET u 2019. i 2020. No što se tiče T, razlika između svih ploha, osim plohe 7, bila je manja od 0,05 što znači da postoji značajna razlika između vrijednosti T u 2019. i 2020. na tim plohama. Dodatnim jednostranim t-testom utvrdila sam da je prosječna osmodnevna T u 2019. bila značajno veća od osmodnevne T u 2020.

2020. MODIS ET i T



Slika 31. Usporedni prikaz dinamike MODIS evapotranspiracije (ET) (8-dnevni zbroj) i protoka ksilemskog soka (T) izmjenjenog na terenu (na razini sastojine, 8-dnevni zbroj) za travanj-listopad 2020. Na dane kad terenski mjereni podaci za transpiraciju nisu bili cjeloviti (npr. nedostajali su potpuni podaci za cijeli dan), cijeli 8-dnevni period nije imao procjenu transpiracije. Vrijednosti omjera T/ET prikazane su na sekundarnoj y-osi.

Gledajući ukupnu oborinu u vegetacijskoj sezoni 2019. i 2020., u 2019. godini iznosila je 506 mm, a u 2020. bila je 458,5 mm. Količina od 1 mm iznosi 1 L vode/m², a zbog specifične gustoće vode to je 1 kg/m² odnosno ista jedinica kao za ET. Prema grafu (Slika 32), u obje godine na svim plohamama, osim plohe 3, ukupna sezonska ET bila je nešto veća od ukupne oborine. Najmanje odstupanje ET od ukupne oborine bilo je na plohi 7 u obje godine (do 10 % oborine), najveće na plohi 6 (oko +23 % ukupne oborine). Na plohi 3 ukupna ET razlikovala se za -20 % od oborine. Terenski izmjerena prosječna T za hrast lužnjak u cijeloj vegetacijskoj sezoni iznosila je 207 ± 45 kg/m² što je oko 30-50 % ukupne ET u 2019. i 154 ± 60 kg/m² tj. 10-40 % ukupne ET u 2020., najmanje na plohi 7, a najviše na plohamama 2 i 6.



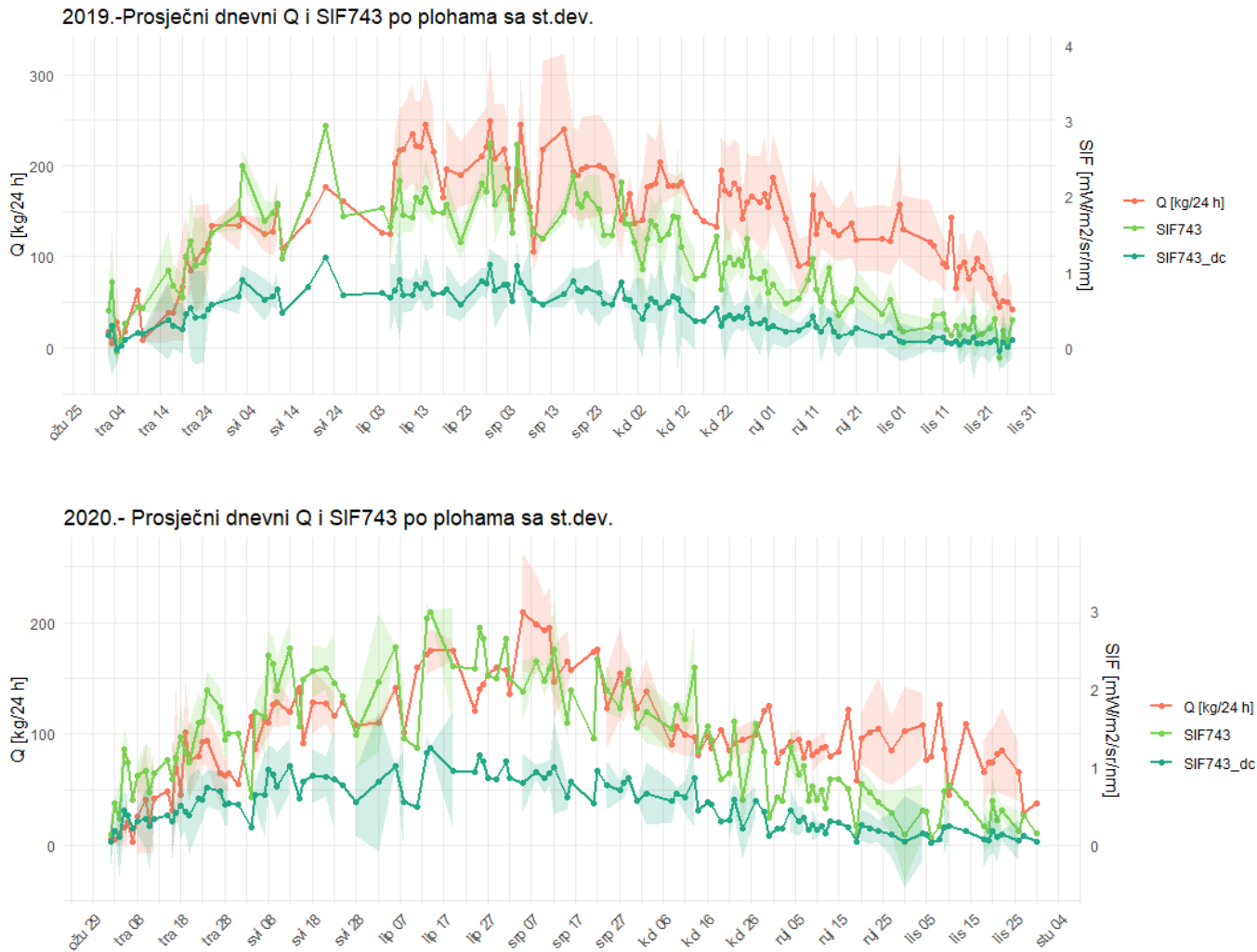
Slika 32. Ukupna oborina na postaji Gradište (svijetlo plava boja – 2019. i tamno plava boja – 2020.), MODIS ET i terenski izmjerena T za hrast lužnjak na plohamama 2, 3, 6 i 7 za vegetacijsku sezonu 2019. i 2020. godinu (1.4.-31.10.).

4.2.3. Sezonska dinamika Suncem inducirane fluorescencije

Vrijednosti podataka TROPOSIF produkta i protoka ksilemskog soka prikazani su za SIF743 i korigirani SIF743 (Slika 33), solarni zenitni kut (Slika 34) i refleksije (Slika 35).

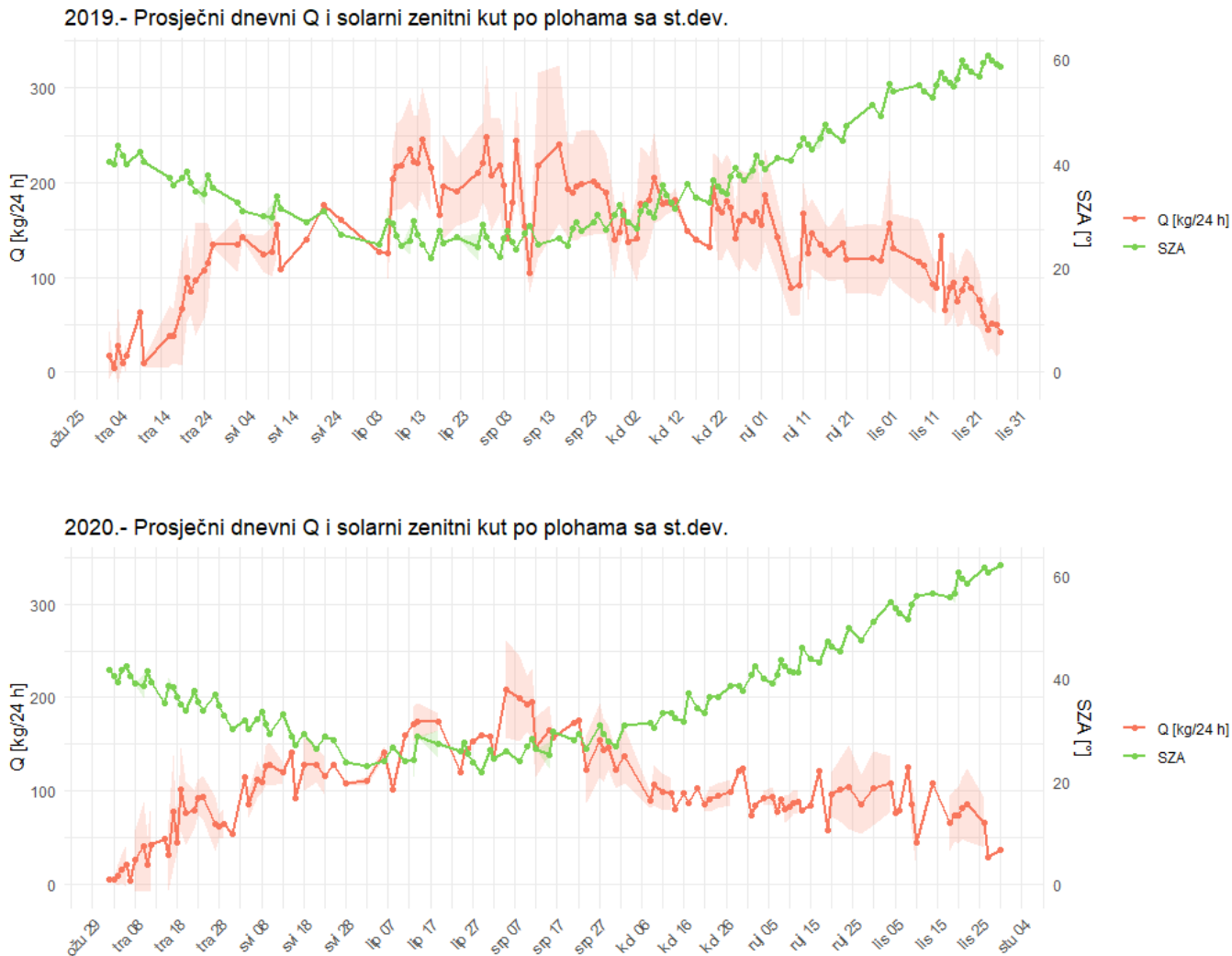
U 2019.godini, najveća prosječna vrijednost za SIF743 i korigirani SIF743 zabilježena je 22.5.2019. (9 odnosno $1,2 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$) i to na plohi 3 (na drugim plohama nije bilo dostupnih TROPOSIF mjerenja zbog naoblake). S druge strane, prosječni maksimum za Q zabilježen je 29.6.2019. godine ($249 \pm 97,5 \text{ kg/24 h}$) (Slika 33). Najveća odstupanja od prosječne vrijednosti za SIF743 i korigirani SIF743 zabilježeni su 11.8.2019. i 18.5.2019. ($\pm 0,9 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$).

Najveća prosječna vrijednost svih ploha SIF743 zabilježena je 14.6.2020., a isti maksimum prosječne vrijednosti zabilježen je na isti datum za korigirani SIF743 ($3 \pm 0,03$ odnosno $1,25 \pm 0,03 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$) (Slika 33). Ovi maksimumi nastupili su oko tri tjedna ranije od maksimuma prosječne vrijednosti protoka ksilemskog soka koji je zabilježen 5.7.2020. i iznosio je oko $209 \pm 52 \text{ kg/24 h}$.



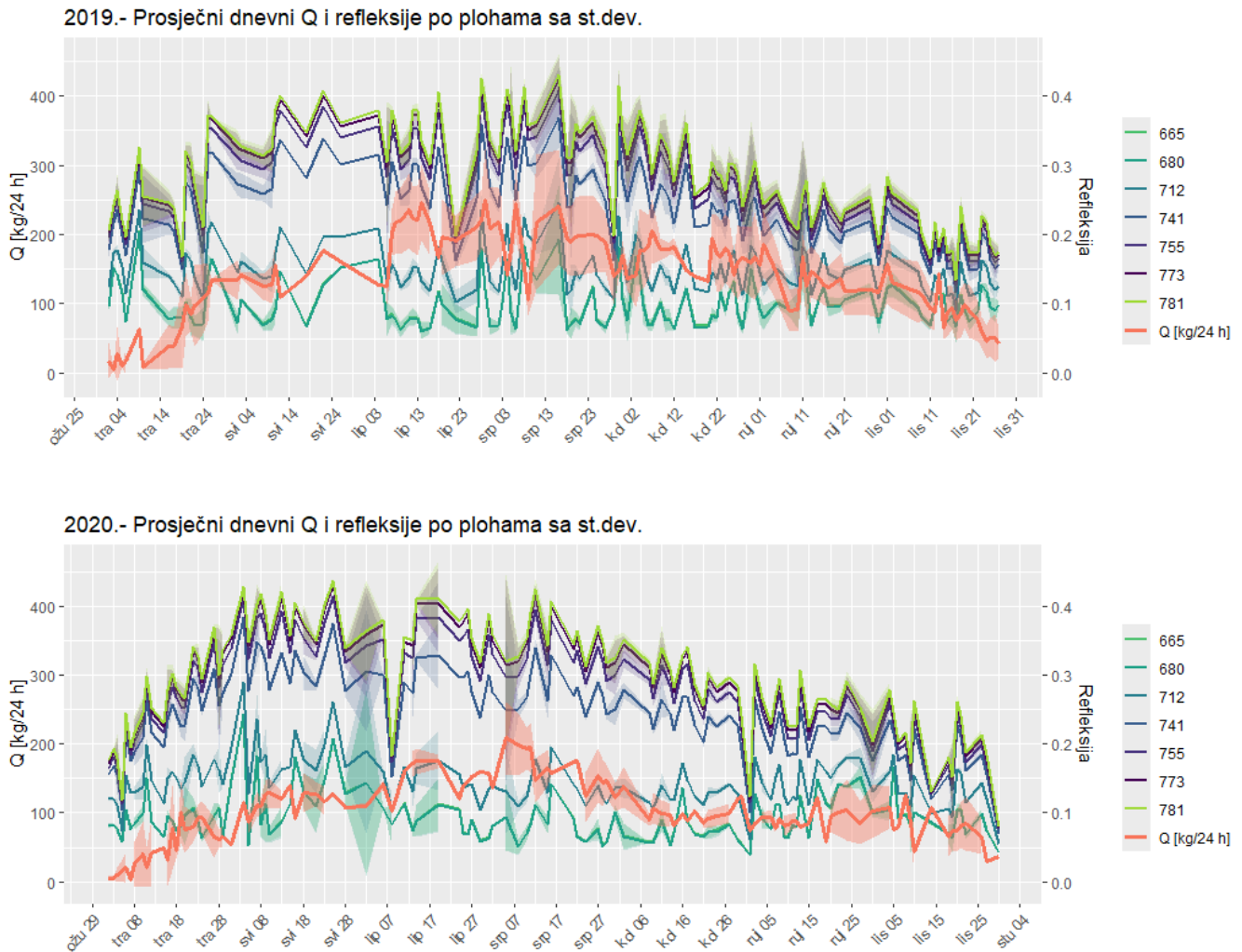
Slika 33. Prosjek i standardna devijacija dnevnog protoka ksilemskog soka na primarnoj y-osi te vrijednosti za Suncem induciranu fluorescenciju u spektralnom kanalu na valnoj duljini 743-758 nm SIF743 (podaci TROPOSIF) i korigirane SIF743 (SIF743_dc) na sekundarnoj y-osi, u 2019. i 2020. godini.

Solarni zenitni kut imao je svoj maksimum na svim plohama 24.10.2019. ($60,9^\circ$) i 30.10.2020. ($62,3^\circ$) (Slika 34).



Slika 34. Prosjek i standardna devijacija dnevnog protoka ksilemskog soka na primarnoj y-osi i dnevni solarni zenitni kut (TROPOSIF produkt) na sekundarnoj y-osi na svim ploham i u 2019. i 2020. godini.

Za refleksiju u svim kanalima maksimum je zabilježen 16.7.2019. Dodatno za kanal 665 nm i 680 nm prethodni maksimum je bio i na datum 9.4.2019. U 2020. godini svi kanali, osim 755 i 773, imali su maksimum na 4.5.2020., a dodatno su još kanali 755 nm i 773 nm imali maksimum na 25.5. 2020. (Slika 35).

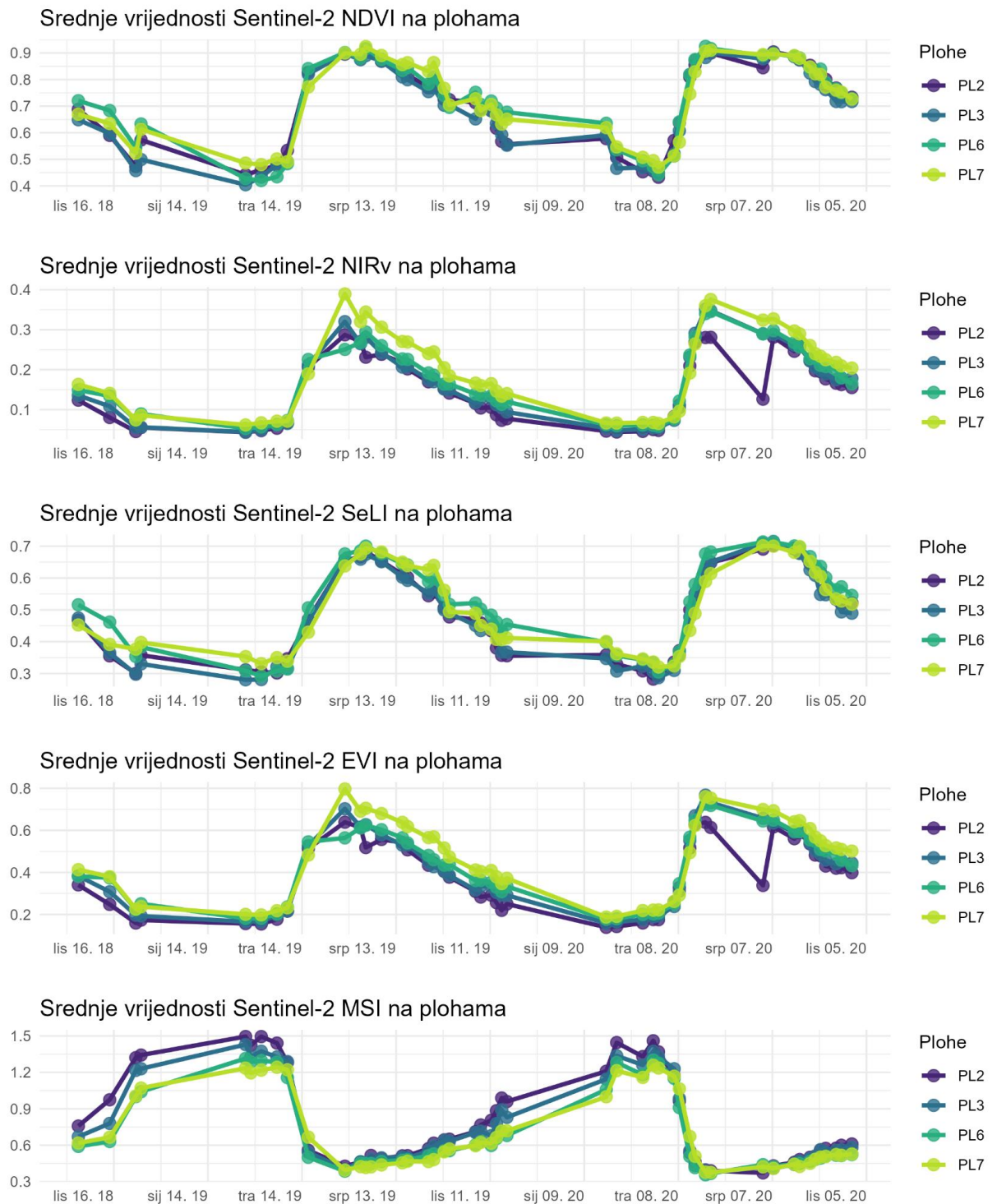


Slika 35. Prosjek i standardna devijacija dnevnog protoka ksilemskog soka na primarnoj y-osi i vrijednosti TROPOSIF kanala različitih valnih duljina (665-781 nm) na sekundarnoj y-osi na svim ploham u 2019. i 2020. godini.

4.2.4. Sezonska dinamika vegetacijskih indeksa izvedenih iz satelitskih snimaka Sentinel-2

Dinamike vrijednosti indeksa NDVI, NIR_v, SELI, EVI i MSI za period od sredine rujna 2018. do početka listopada 2020. godine – ukupno dvije cijele godine podataka prikazane su na Slici 37. (Slika 36). Svi indeksi osim MSI imaju slične dinamike s najnižim indeksima sredinom veljače, zatim rast od travnja preko vrhunca u srpnju te opet blagog opadanja u jesenskim i zimskim mjesecima. Indeks MSI slijedi obrnutu dinamiku, s najvećim vrijednostima u travnju te zatim smanjivanje vrijednosti do srpnja, te zatim

blagog rasta. U zimskim mjesecima, od studenog do veljače nije bilo snimki na kojima je naoblaka prekrivala manje od 20 % snimke. Isto je zabilježeno od kraja travnja do kraja svibnja u 2019. i od prve polovice svibnja do kraja lipnja 2020. kad su postojali dulji periodi u vegetacijskoj sezoni kada Sentinel-2 snimke nisu zadovoljavale kriterije naoblake manje od 20 %.



Slika 36. Srednje vrijednosti Sentinel-2 indeksa NDVI, NIRv, SeLI, EVI i MSI od rujna 2018. do listopada 2020. na plohama 2, 3, 6 i 7.

Gledano pojedinačno po plohama i za obje vegetacijske sezone 2019. i 2020., podaci za indekse izvedene od Sentinel-2 kanala u periodu od 1.4. do 31.10. za godine 2019. i 2020.

prikazani su u nastavku (Slika 37). Za vegetacijsku sezonu 2019. na plohi 2 postojalo je 20, a 2020. godine 19 snimki, na plohi 3 bilo je 19 odnosno 18 snimki, na plohi 6 bilo je 16 odnosno 20 snimki i na plohi 7 bilo je 17 odnosno 10 snimki koje su zadovoljile uvjete naoblake manje od 20 % i da su imale dostupna mjerenja protoka ksilemskog soka.

Na svim plohama indeksi NDVI i SELI u 2019. su imali zabilježeni maksimum vrijednosti 14.6.2019., koji se preklopio s maksimumom dnevnog protoka ksilemskog soka. U 2020. godini, maksimum protoka ksilemskog soka zabilježen je 5.7., no na taj datum nije bilo dostupnih Sentinel-2 snimki. Međutim, 8.7.2020. indeks SELI pratio je zabilježeni dnevni maksimum protoka ksilemskog soka.

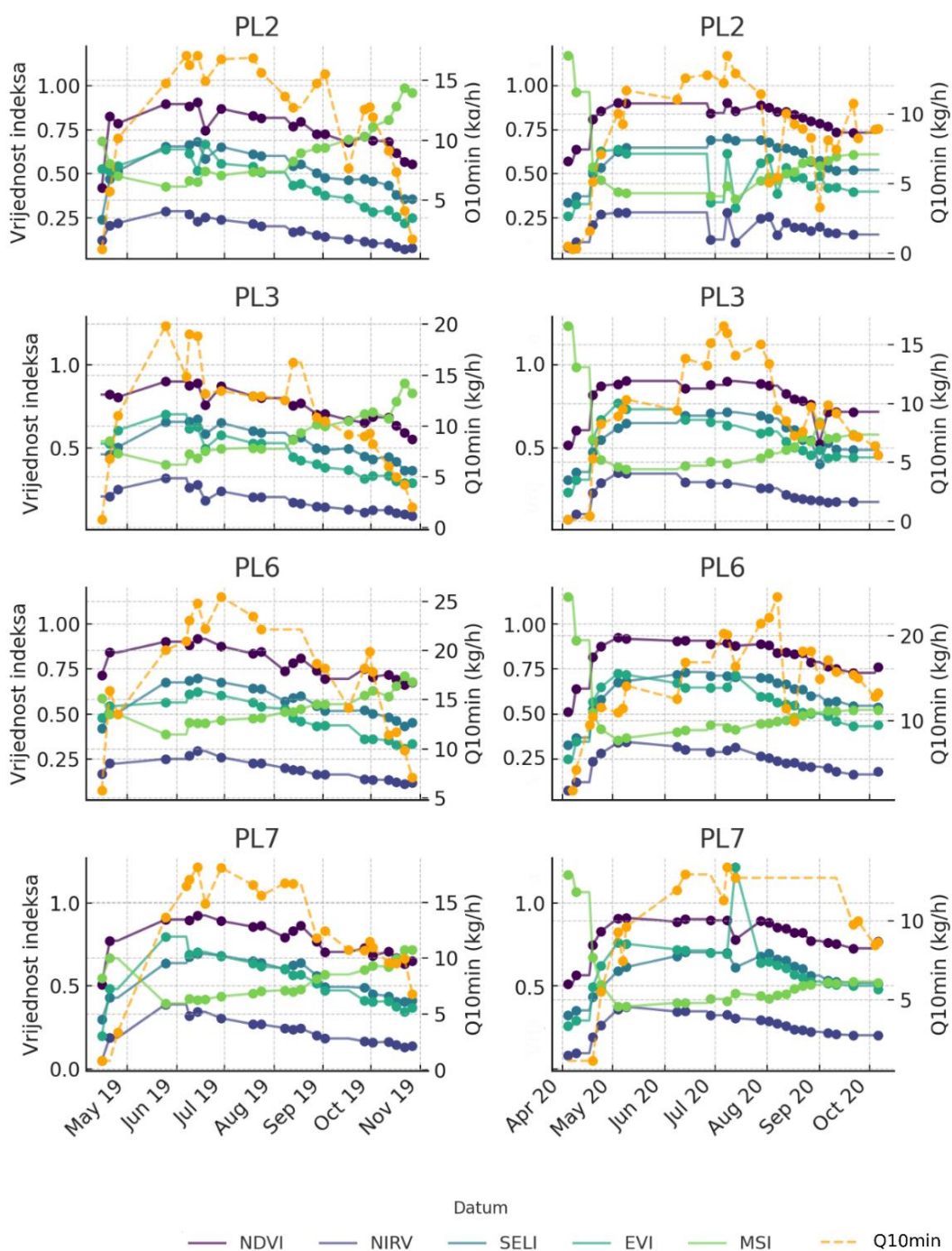
Na plohama 2 i 3 vrijednosti indeksa NDVI i SELI pratile su pad trenutnog protoka ksilemskog soka 19.6.2019., dok je EVI zabilježio porast na isti datum.

Indeks NIRv u 2019. je imao zabilježen maksimum na plohama 2 i 6 na 14.6.2019., a na plohama 3 i 7 na datum 25.5.2019. U 2020. godini isti indeks je na svim plohama bilježio najveće vrijednosti u početku svibnja na datume 4.5. i 9.5.

Na plohi 6 nije bilo većih promjena u vrijednostima indeksa tijekom 2019. i 2020. godine, ali je u kolovozu 2020. zabilježen pad trenutnog protoka ksilemskog soka s 25 kg/h na 11 kg/h između 7. i 12.8., dok su indeksi ostali stabilni, osim što su svi, osim MSI, zabilježili maksimum 14.6.2019.

Na plohi 7 indeksi NIRv i EVI postigli su maksimume, a EVI minimum, nešto ranije - 25.5.2019. Na istoj plohi na datum 13.7.2020. za vrijednosti NDVI i SELI zabilježen je pad vrijednosti, dok je za vrijednosti EVI i MSI zabilježen porast.

Dinamika Sentinel-2 indeksa u vegetacijskoj sezoni 2019. i 2020.



Slika 37. Dinamika Sentinel-2 indeksa (EVI, MSI, NDVI, NIRv, SELI) i trenutni protok ksilemskog soka Q10min (u vrijeme nastanka snimke) za vegetacijsku sezonu u 2019. i 2020. Prikazane su vrijednosti dostupnih snimki s 20 % ili manje naoblake. Trenutni protok ksilemskog soka (Q10min) prikazan je na sekundarnoj y-osi.

4.3. Analiza povezanosti dinamike transpiracije i vezanih procesa

4.3.1. Evapotranspiracija

Podaci MODIS ET nisu bili normalno distribuirani (Shapiro-Wilk test), pa sam upotrijebila Spearmanov koeficijent korelacije (r_s). Korelacije između T i ET za obje godine zajedno bile su pozitivne i umjereno jake (Tablica 16). Dodatno sam izračunala korelacije između T i ET za svaku godinu posebno i bile su također pozitivno korelirane i umjerene jačine, no nisam ih prikazala u tablici. Međutim, podijeljeno na periode dostupnih podataka do datuma kad je nastupio sezonski maksimum dnevnog protoka (14.6.2019. i 5.7.2020.), koeficijenti korelacije bili su veći, pogotovo u 2019. kada su sve korelacije na plohama bile pozitivne i jake ($r_s > 0,8$).

Tablica 16. Spearmanov koeficijent korelacije (r_s) između 8-dnevnog protoka ksilemskog soka (T) i MODIS 8-dnevne evapotranspiracije (ET) za vegetacijske sezone 2019. i 2020. zajedno, te podijeljeno po periodima (period I: 7.4.2019.-17.6.2019 i 6.4.2020-10.7.2020. i period II: 18.6.2019.-31.10.2019 i 11.7.-30.10.2020). p-vrijednosti: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

	Ploha 2	Ploha 3	Ploha 6	Ploha 7
2019. i 2020.	0,54***	0,73***	0,61***	0,56***
2019 period I	0,93***	0,93**	0,95***	0,83***
2019 period II	0,83***	0,91***	0,86***	0,82***
2020 period I	0,84***	0,52**	0,79***	0,85***
2020 period II	0,45*	0,72	0,66*	-0,4

Dodatno sam napravila linearne regresije za 8-dnevni protok ksilemskog soka (T) kao funkcije MODIS 8-dnevne ET za vegetacijske sezone 2019. i 2020. zajedno, te podijeljeno po periodima (Tablica 17). Modeli s većim koeficijentom determinacije bili su oni s podacima podijeljenima na periode, pogotovo u periodu I 2019. Najbolji model bio je na plohi 6 u periodu I 2019. ($R^2 = 0,95$, $p = 1,1 \times 10^{-5}$), a u istom periodu 2020. godine bio je najmanje uspješan od svih ploha ($R^2 = 0,54$, $p = 0,0153$). Modeli u periodu II 2019. godine za plohu 2 i 3 opisivali su između 55 i 57 % varijacije 8-dnevnog protoka, dok su na plohama 6 i 7 bili uspješniji s $R^2 > 0,7$. Modeli u periodu II 2020. godine bili su najmanje uspješni od svih modela po periodima i po godinama ($0,29 < R^2 < 0,42$).

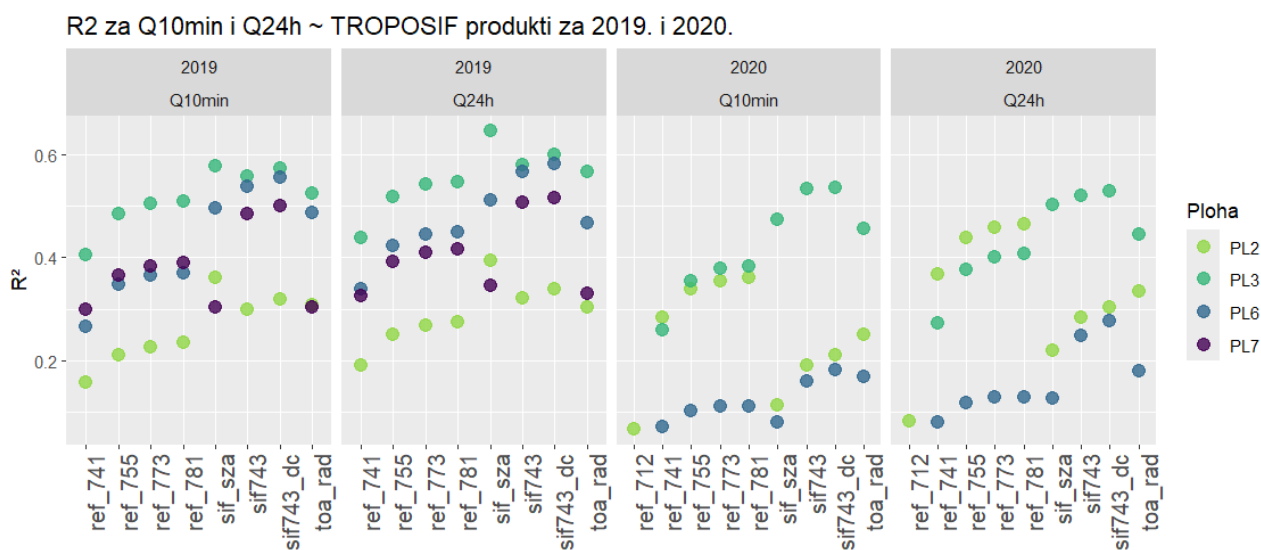
Tablica 17. Uspješnost modela linearne regresije za 8-dnevni protok ksilemskog soka (T) kao funkcije MODIS 8-dnevne ET za vegetacijske sezone 2019. i 2020. zajedno, te podijeljeno po periodima (period I: 7.4.2019.-10.6.2019 i 6.4.2020-3.7.2020. i period II: 18.6.2019.-31.10.2019 i 11.7.-30.10.2020). Uspješnost modela iskazana je vrijednostima koeficijenta determinacije (R^2). p-vrijednosti: *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

	Ploha 2	Ploha 3	Ploha 6	Ploha 7
2019. i 2020.	0,31***	0,47***	0,4***	0,36***
2019 period I	0,87***	0,75**	0,95***	0,83***
2019 period II	0,55**	0,57***	0,79***	0,73***
2020 period I	0,81***	0,64**	0,54***	0,76***
2020 period II	0,32*	0,29	0,42*	0,10

4.3.2. Suncem inducirana fluorescencija

Usporedba rezultata linearne regresije za cijelu vegetacijsku sezonu 2019. godine (Slika 38) pokazuje da su produkti TROPOSIF nešto malo bolje objašnjavali varijabilnost protoka ksilemskog soka na dnevnoj razini Q (zbroy satnih protoka prosječnog stabla u sastojini unutar 24 sata) nego u odnosu na trenutni protok (protok tipičnog stabla u sastojini u vrijeme snimanja -13:30 h) (Slika 38). U vegetacijskoj sezoni 2020. su svi modeli imali niže koeficijente determinacije, uspoređujući s prethodnom godinom. Model s najvećim koeficijentom determinacije u 2019. bio je sa solarnim zenitnim kutom na plohi 3 ($R^2 = 0,65$). U istoj godini, na plohama 6 i 7 korigirana SIF743 bila je najbolji prediktor Q24h ($R^2 = 0,58$ odnosno $R^2 = 0,52$), a solarni zenitni kut na plohi 2 ($R^2 = 0,39$). Varijable u modelima koje nisu dobro opisivale varijaciju Q bile su refleksije u 665, 680 i 712 nm ($R^2 < 0,1$). Produkt toa_rad na plohama 2 i 3 imao je R^2 oko 0,5 za trenutni Q10min i R^2 do 0,6 za dnevni Q24h. U 2020. godini najbolji model bio je na plohi 3 s

korigiranim SIF743 ($R^2 = 0,54$). Ploha 7 je imala malo mjerenja Q u 2020. godini, a linearne regresije s nezavisnim varijablama nisu bile statistički značajne ($p > 0,05$).

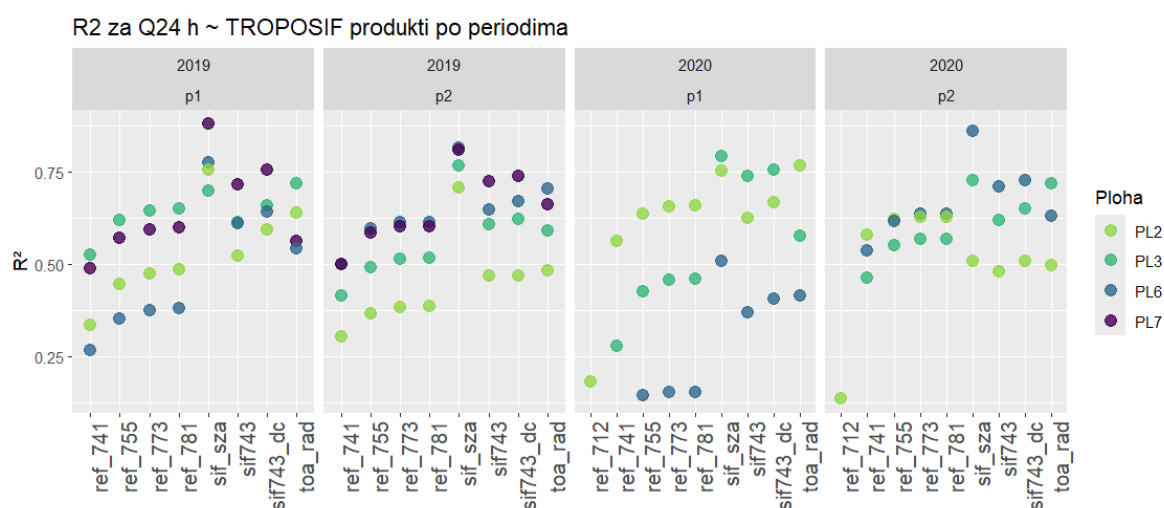


Slika 38. Uspješnost modela linearnih regresija s trenutnim (Q10min) i dnevnim (Q24h) protokom ksilemskog soka kao funkcijama produkata TROPOSIF na svakoj plohi za cijelu vegetacijsku sezonu 2019. i 2020. godine. Uspješnost modela iskazana je vrijednostima koeficijenta determinacije (R^2). ref_665:ref_781 – refleksije u kanalima od 665-781 nm; sif_sza – solarni zenitni kut; sif743 – Suncem inducirana fluorescencija u 743 nm; sif743_dc – Suncem inducirana fluorescencija korigirana prema duljini dana; toa_rad - prosječni protok radijacije (radiance) na vrhu atmosfere (TOA) za 743-758 nm. Ploha 7 nije u 2020. imala statistički značajne modele linearne regresije (p vrijednost $> 0,05$) i oni nisu prikazani.

Kad se podaci podijele po periodima do i od prosječnog maksimuma protoka ksilemskog soka za svaki period i plohu (period I: od 1.4.-14.6. 2019. i 1.4.-5.7.2020., period II: 15.6.-31.10.2019. i 6.7.-31.10.2020.), u obje godine varijabla solarni zenitni kut dala je modele s najvišim koeficijentom determinacije (Slika 39). Najbolji model s ovim prediktorom bio je 2019. u periodu 1 za plohu 7 ($R^2 = 0,88$). Na svim plohama u oba perioda 2019., varijabla solarni zenitni kut opisivala je najmanje 70 % varijabilnosti dnevnog Q24h (Tablica 18). Najbolji model u 2020. sa solarnim zenitnim kutom bio je na plohi 6 ($R^2 = 0,86$) u periodu 2.

Korigirani SIF743 je u modelu za plohu 7 u periodu 1 2019. imao najveći koeficijent determinacije ($R^2 = 0,76$), no sličan koeficijent za istu varijablu bio je i u periodu 2. Na

plohama 3 i 6 koeficijenti su u oba perioda 2019. godine bili veći od $R^2 > 0,6$. U 2020. godini, najviši koeficijent bio je na plohi 3 u periodu 1 ($R^2 = 0,76$), pa zatim na plohi 6 u periodu 2 ($R^2 = 0,73$). Modeli s refleksijama na 665, 680 i 712 nm, nisu dobro opisivali Q u obje godine ($R^2 < 0,25$), ali su refleksije u 741, 755, 773 i 781 nm po redu davale uspješnije modele, od $R^2 \sim 0,25$ do $R^2 \sim 0,6$.



Slika 39. Uspješnost modela linearnih regresija s dnevnim protokom ksilemskog soka (Q24h) kao funkcijom produkata TROPOSIF na svakoj plohi za periode I (p1) i period II (p2) vegetacijskih sezona 2019. i 2020. godine (period I: od 1.4.-14.6.2019. / 1.4.-5.7.2020.; period II: 15.6.-31.10.2019. / 6.7.-31.10.2020.). Uspješnost modela prikazana je vrijednostima koeficijenta determinacije (R^2). ref_665:ref_781 – refleksije u spektralnim kanalima od 665-781 nm; sif_sza – solarni zenitni kut; sif743 – Suncem inducirana fluorescencija na 743 nm; sif743_dc – Suncem inducirana fluorescencija korigirana prema duljini dana; toa_rad - prosječni protok radijacije (radiance) na vrhu atmosfere (TOA) za 743-758 nm. Ploha 7 nije u 2020. imala statistički značajne modele linearne regresije (p vrijednost $> 0,05$) i oni nisu prikazani.

Tablica 18. Koeficijenti determinacije (R^2) linearne regresije za dnevni protok ksilemskog soka (Q24 h) kao funkcije solarnog zenitnog kuta ili korigirane SIF743. p-vrijednosti: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Koeficijenti determinacije (R^2): Q24 h ~ Solarni zenitni kut				
	PL2	PL3	PL6	PL7
2019	0,39***	0,65***	0,51***	0,35***
period I	0,75***	0,7***	0,77***	0,88***
period II	0,71***	0,77***	0,81***	0,81***
2020	0,22***	0,5***	0,13**	0,38
period I	0,75***	0,79***	0,51***	0,50***
period II	0,51***	0,73***	0,86***	0,38
Koeficijenti determinacije (R^2): Q24 h ~ Korigirana SIF743				
	PL2	PL3	PL6	PL7
2019	0,34***	0,6**	0,58***	0,52***
period I	0,59***	0,66***	0,64***	0,77***
period II	0,47***	0,62***	0,67***	0,74***
2020	0,3***	0,53***	0,28***	0,20
period I	0,67***	0,76***	0,41***	0,48***
period II	0,51***	0,63***	0,73***	0,20

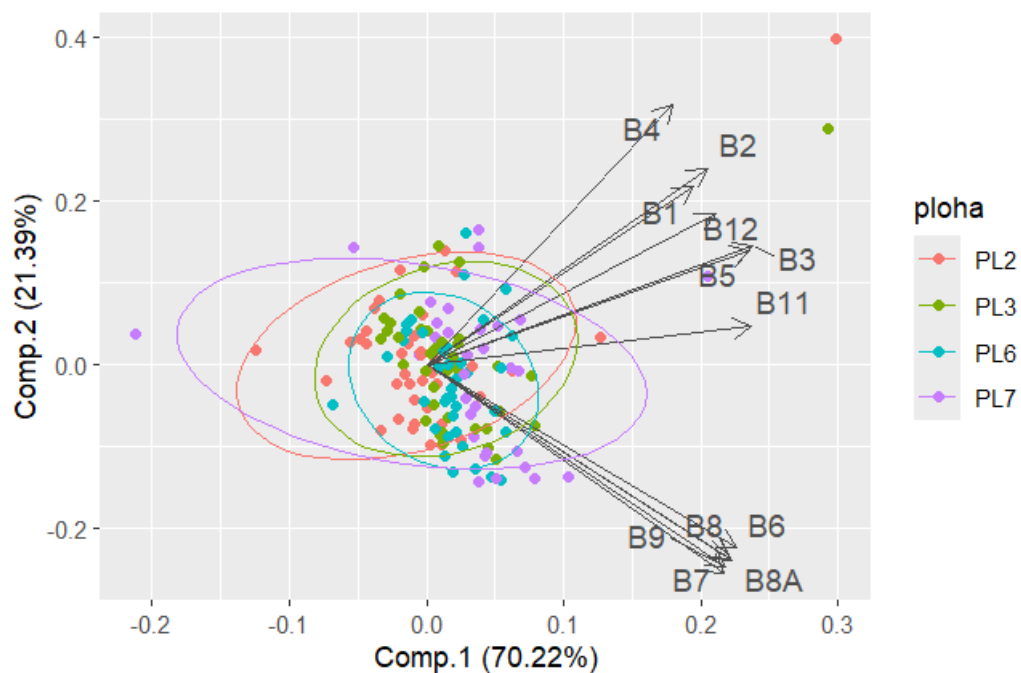
Podaci TROPOSIF produkata nisu bili normalno distribuirani (Shapiro-Wilk test), pa sam upotrijebila Spearmanov koeficijent korelacije (r_s) i primijenila ga na korigirani SIF743 i dnevni protok ksilemskog soka (Q24h) (Tablica 19). Na plohi 7 u 2019. u oba perioda korelacija je bila pozitivna i jaka ($r_s > 0,8$), dok je na ostalim plohama bila pozitivna s umjerenom jačinom u istoj godini. U 2020. godini sve korelacije na plohama su bile pozitivne i umjerene jačine.

Tablica 19. Spearmanov koeficijent korelacije (r_s) između korigirane SIF743 i dnevnog protoka ksilemskog soka (Q24h) za vegetacijske sezone 2019. i 2020., te podijeljeno po periodima (period I: 7.4.2019.-17.6.2019 i 6.4.2020-10.7.2020. i period II: 18.6.2019.-31.10.2019 i 11.7.-30.10.2020). p-vrijednosti: *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

Troposif	Ploha 2	Ploha 3	Ploha 6	Ploha 7
Korigirani SIF743 i Q24h				
2019	0,568***	0,751***	0,702***	0,761***
period I	0,716***	0,690***	0,790***	0,817***
period II	0,660***	0,747***	0,734***	0,830***
2020	0,568***	0,751***	0,702***	0,761***
period I	0,676***	0,635***	0,596***	/
period II	0,560***	0,689***	0,553**	0,383

4.3.3. Vegetacijski indeksi

Analiza glavnih komponenti svih 12 Sentinel-2 kanala pokazala je da prva komponenta objašnjavala oko 70 % varijance, a druga komponenta oko 21 %, dakle prve dvije komponente opisivale su preko 90 % varijance u podacima (Slika 40). Na istom grafu su se izdvojile dvije grupe kanala; grupa s B6, B7, B8, B8A i B9 te grupa s B1, B2, B3, B4, B5, B11 i B12. Kanali unutar grupe bili su pozitivno korelirani, ali nije bilo korelacije između dvije grupe. Faktorski koeficijenti za prve dvije najbitnije komponente nisu prelazili vrijednost od 0,4 (osim B4 u komponenti 2) pa se niti jedan kanal nije posebno isticao kao varijabla koja bi bolje opisivala varijaciju vrijednosti (Tablica 20). Kanal B4 je značajan u komponenti 2, no ona opisuje tek oko 21 % varijacije podataka.



Slika 40. Analiza glavnih komponenti kanala Sentinel-2 snimki. Prikazane su prve dvije komponente.

Tablica 20. Faktorski koeficijenti analize glavnih komponenti kanala Sentinel-2 snimki

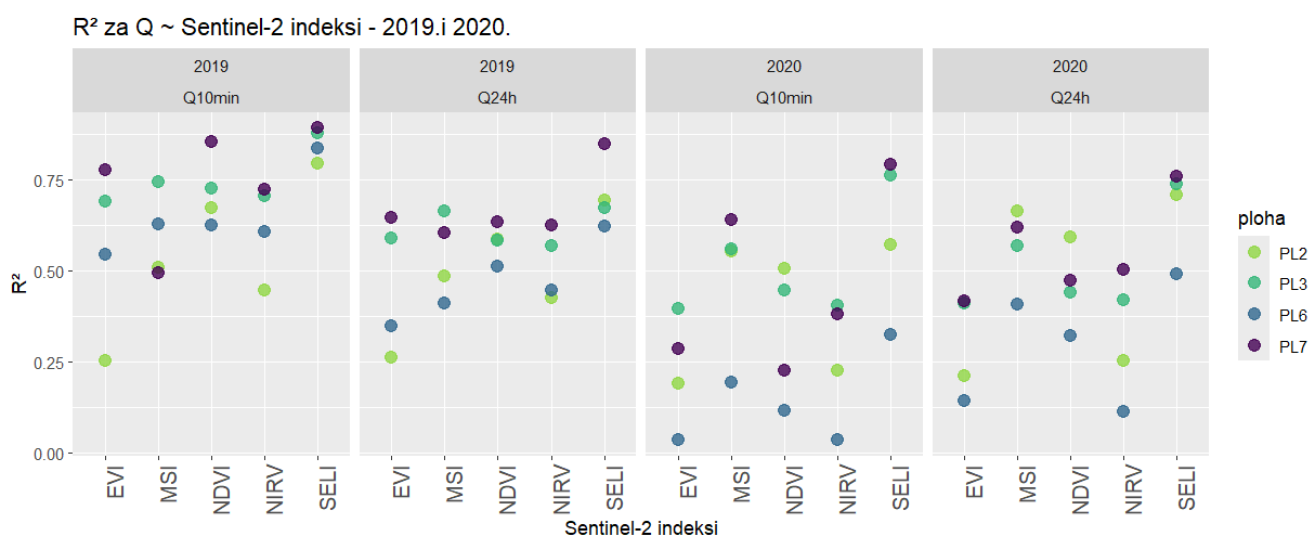
	Komponenta 1	Komponenta 2	Komponenta 3
B1	0,258	0,287	0,568
B2	0,271	0,317	0,388
B3	0,315	0,191	0,134
B4	0,238	0,421	-0,127
B5	0,312	0,185	-0,182
B6	0,3	-0,297	0,068
B7	0,288	-0,337	0,08
B8	0,294	-0,313	0,05
B8A	0,296	-0,315	0,022
B9	0,289	-0,328	0,029
B11	0,314	0,062	-0,461
B12	0,279	0,243	-0,482

Prikazala sam uspješnost modela linearne regresije između dnevnog i trenutnog protoka ksilemskog soka kao funkcije Sentinel-2 indeksa (Slika 41). Modeli u kojima sam koristila trenutni protok ksilemskog soka, tj. u vrijeme nastanka snimke Sentinel-2 satelita

koje je bilo oko podneva, imali su nešto više koeficijente determinacije u odnosu na one koji su koristili dnevni protok ksilemskog soka (zbroy satnih protoka unutar 24 h) u 2019. godini na svim plohama. Najbolji model u 2019. bio je na plohi 7 s dnevnim protokom ksilemskog soka i indeksom SELI ($R^2 = 0,89$), ali s istim indeksom slijedile su i ostale plohe ($R^2 \geq 0,8$).

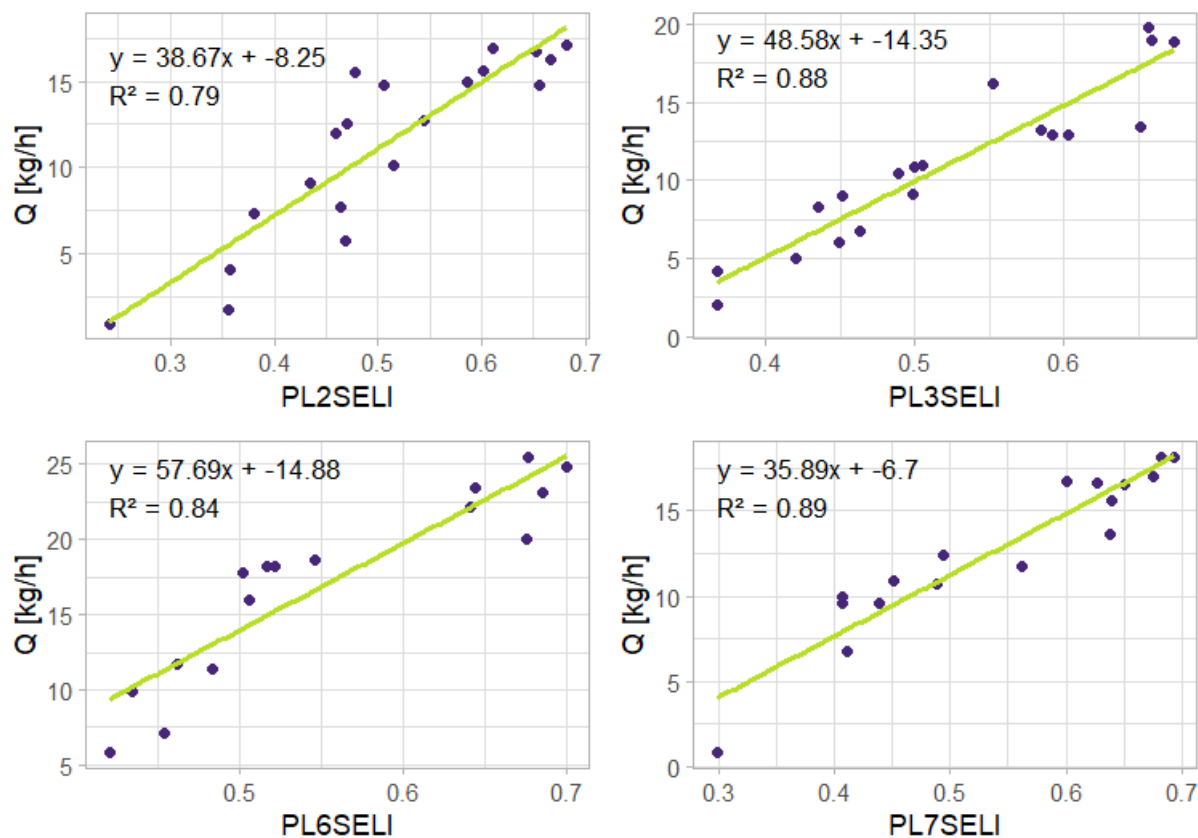
Modeli s indeksima EVI, NDVI i NIRv i trenutnim protocima ksilemskog soka imali su najveće koeficijente determinacije na plohi 7 ($R^2 = 0,78$ odnosno $R^2 = 0,85$ i $R^2 = 0,72$), a modeli s indeksom MSI najbolji su bili na plohi 3 ($R^2 = 0,74$).

U 2020. modeli su bili generalno manje uspješni, s najvećim koeficijentom determinacije za trenutni protok i indeksom SELI na plohi 7 ($R^2 = 0,79$), a slijedila je ploha 3 s istim indeksom ($R^2 = 0,76$) (Slika 41). Najslabiji modeli za indeks SELI bili su na plohi 6 za trenutni protok ($R^2 = 0,33$). Modeli s indeksima EVI i NIRv i dnevnim protocima imali su najveće koeficijente determinacije na plohi 7, a MSI i NDVI s dnevnim protocima ksilemskog soka na plohi 2 ($R^2 = 0,66$ odnosno $R^2 = 0,59$).



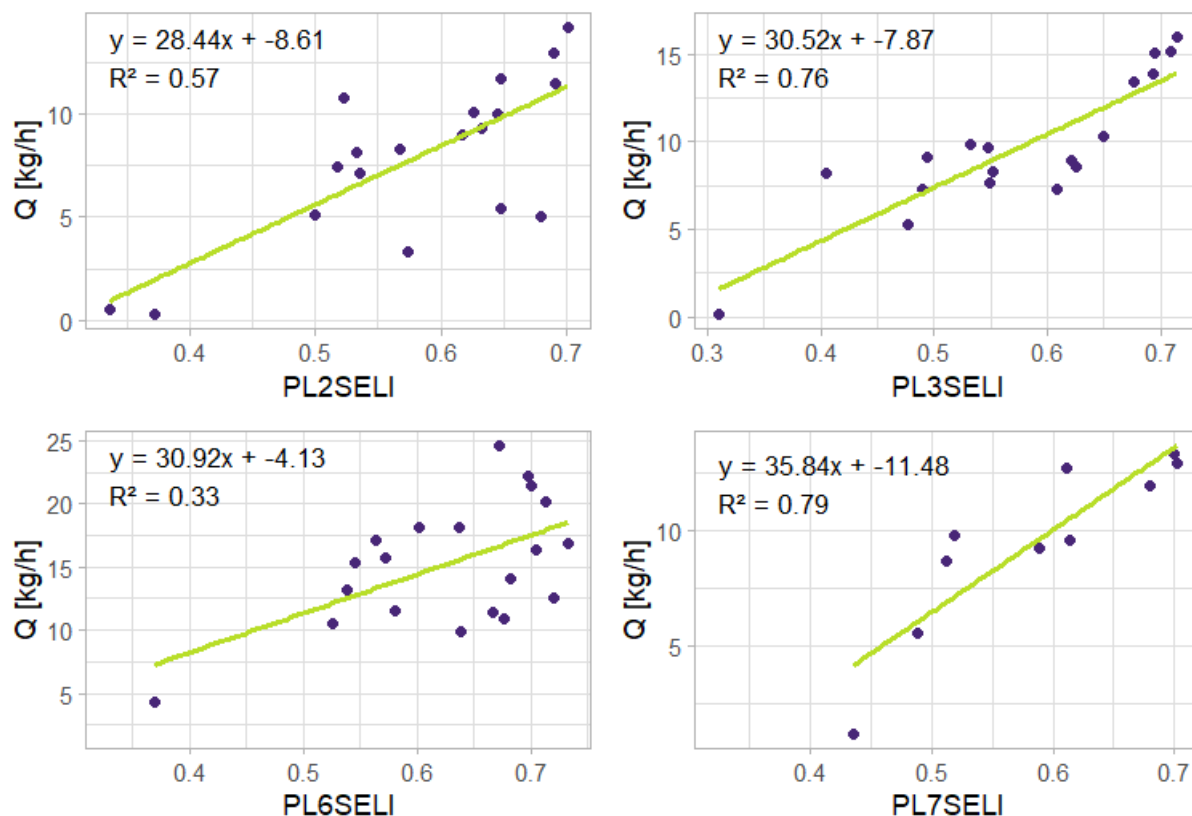
Slika 41. Koeficijenti determinacije (R^2) linearnih regresija za protok ksilemskog soka (trenutni: Q10min i dnevni: Q24h) kao funkcije Sentinel-2 indeksa za svaku plohu za cijelu vegetacijsku sezonu 2019. i 2020.

SELI indeks 2019.



Slika 42. Odabrani linearni modeli na plohama s trenutnim protokom ksilemskog soka na razini sastojine u odnosu na Sentinel-2 indeks SELI u 2019. godini

SELI indeks 2020.



Slika 43. Odabrani linearni modeli na plohama s trenutnim protokom ksilemskog soka na razini sastojine u odnosu na Sentinel-2 indeks SELI u 2020. godini

Podaci za Sentinel-2 SELI indeks nisu bili normalno distribuirani (Shapiro-Wilk test), pa sam primijenila Spearmanov koeficijent korelacije (r_s) (Tablica 21). U 2019. na svim plohama su SELI i protok ksilemskog soka bili jako i pozitivno korelirani, s tim da je korelacija s trenutnim protokom (Slika 43.) bila veća nego s dnevnim protokom. U 2020. samo na plohi 7 (za trenutni i dnevni protok) i plohi 3 (za trenutni protok) je bila jaka i pozitivna korelacija, dok je na ostalim plohama bila pozitivna korelacija s umjerenom jačinom (Slika 44.).

Tablica 21. Spearmanov koeficijent korelacije (r_s) između protoka ksilemskog soka (dnevni: Q24 h i trenutni: Q10min) i Sentinel-2 SELI indeksa za vegetacijske sezone 2019. i 2020. zajedno, te podijeljeno po periodima (period I: 7.4.2019.-17.6.2019. i 6.4.2020-10.7.2020. i period II: 18.6.2019.-31.10.2019. i 11.7.-30.10.2020.). p-vrijednosti: *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

SELI	Protok k.s.	Ploha 2	Ploha 3	Ploha 6	Ploha 7
2019. i 2020.	Q24h	0,591***	0,842***	0,627**	0,814***
	Q10min	0,675***	0,890***	0,684**	0,774***
2019	Q24h	0,833***	0,965***	0,851***	0,947***
	Q10min	0,921***	0,978***	0,947***	0,960***
2020	Q24h	0,535*	0,760***	0,290*	0,860***
	Q10min	0,651*	0,831***	0,451*	0,903***

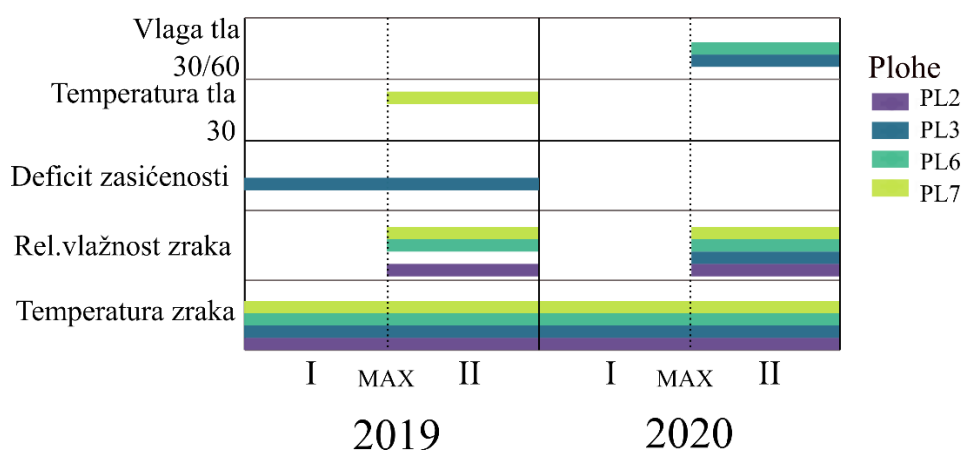
4.4.Hijerarhijska analiza ekoloških čimbenika transpiracije

4.4.1. Modeli linearne regresije za podatke mjerenja provedenih svakih 30 minuta

Temperatura zraka i deficit zasićenosti zraka vodenom parom bile su značajni okolišni čimbenici na svim plohama za opisivanje varijacije 30-minutnog protoka ksilemskog soka s podacima za 2019. i 2020. zajedno (R^2 na svim plohama od 0,54 - 0,57) (Tablica 22). Modeli na plohama u periodu I 2019. također su opisivali oko 50 % (R^2 od 0,4 do 0,58) varijacije u protoku ksilemskog soka i to s temperaturom zraka za plohe 2, 6 i 7, dok je na plohi 3 još dodatni značajni čimbenik u modelu bio deficit zasićenosti zraka (Slika 44). U periodu II 2019. na svim su plohama, uz temperaturu zraka, značajni čimbenici u modelu bili relativna vlažnost zraka na plohi 2 ($R^2 = 0,68$), plohi 6 ($R^2 = 0,76$) i plohi 7 ($R^2 = 0,81$ uz temperaturu tla na 30 cm dubine), te deficit zasićenosti zraka na plohi 3 ($R^2 = 0,74$). U periodu I 2020. godine samo je temperatura zraka bila značajni čimbenik na svim plohama, s modelima koji su opisivali od 36 % (ploha 2) do 73 % (ploha 7) varijacije u protoku ksilemskog soka (Tablica 22). U periodu II 2020. godine čimbenici su bili isti kao u periodu II 2019. za plohu 2 (temperatura zraka i relativna vlažnost zraka, $R^2 = 0,62$) i plohu 7 ($R^2 = 0,8$). Na plohama 3 i 6 uz temperaturu zraka, značajni čimbenici u periodu II 2020. bili su relativna vlažnost zraka i vlaga tla na 60 cm (ploha 3) i 30 cm (ploha 6) ($R^2 = 0,7$ odnosno $R^2 = 0,79$).

Tablica 22. Uspješnost odabranih modela linearne regresije za 30-minutni protok ksilemskog soka kao funkcije jednog ili više okolišnih čimbenika (temperature zraka i tla, relativne vlažnosti zraka, deficita tlaka pare, vlage tla) za vegetacijske sezone 2019. i 2020., te podijeljeno po periodima (period I: 1.4.2019.-14.6.2019. i 1.4.2020 -5.7.2020. i period II: 15.6.2019.-31.10.2019 i 6.7.-31.10.2020.). Uspješnost modela izražena je preko koeficijenta determinacije (R^2). p-vrijednosti: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

	Ploha 2	Ploha 3	Ploha 6	Ploha 7
2019. i 2020.	0,54***	0,54***	0,56***	0,57***
2019. period I	0,48***	0,52***	0,58***	0,40***
2019. period II	0,68***	0,74***	0,76***	0,81***
2020. period I	0,36***	0,43***	0,44***	0,73***
2020. period II	0,64***	0,71***	0,79***	0,80***



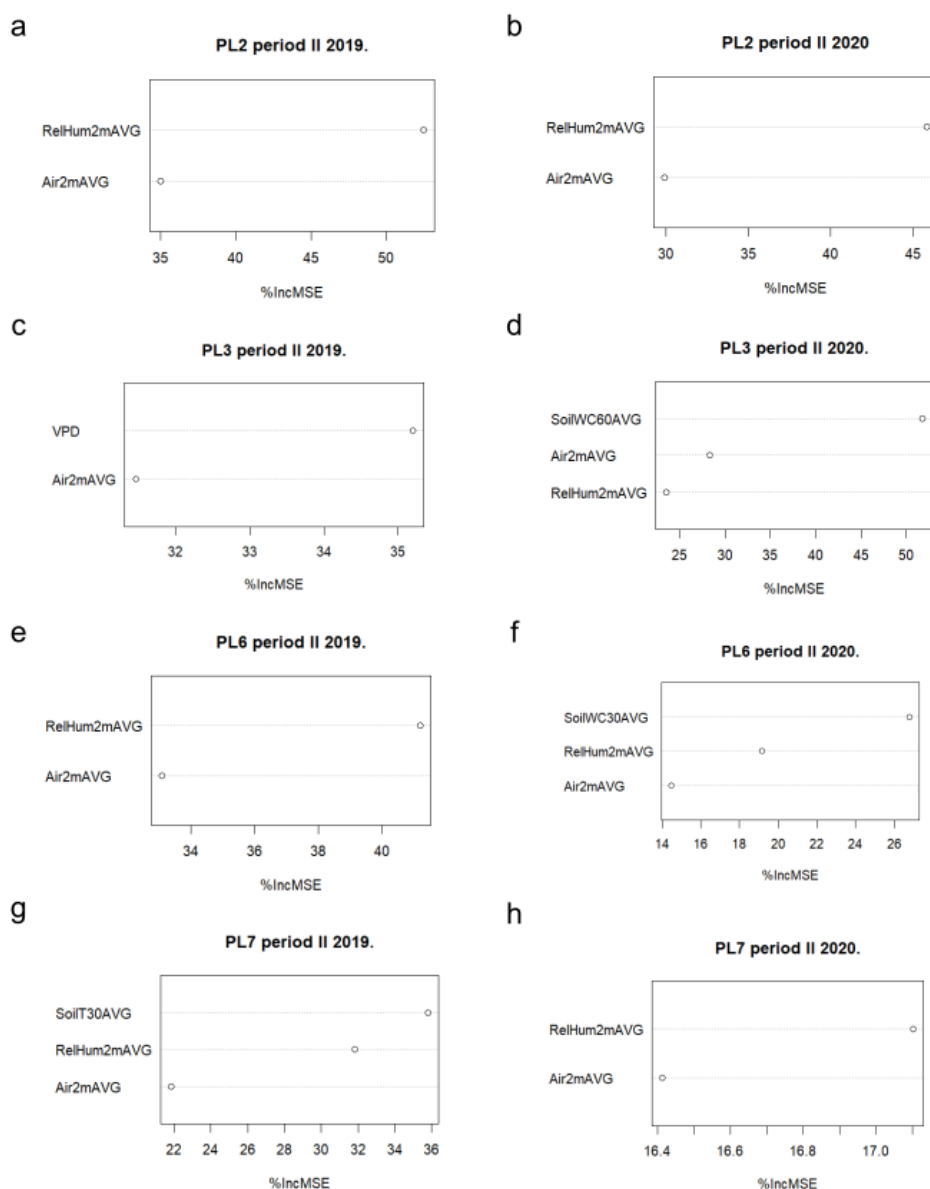
Slika 44. Značajni okolišni čimbenici u modelima višestruke linearne regresije za 30-minutne protoke ksilemskog soka (Q). Prikazani su modeli za 2019. i 2020. odvojeno po periodima (do i od sezonskog maksimuma dnevnog protoka ksilemskog soka) za svaku godinu i plohu.

4.4.1.1. Važnost okolišnih čimbenika u modelima koji su objašnjavali 30-minutnu varijaciju protoka ksilemskog soka

Provođenjem Random forest metode na odabranim modelima napravljena je hijerarhija vrijednosti varijabli za pojedini model (Slika 45). Modeli u periodu I za 2019. i 2020. zasebno nisu bili bolji (uspoređujući koeficijente determinacije) od onih za obje godine zajedno (Tablica 22), pa sam odabrala period II iz obje godine za prikaz važnosti čimbenika.

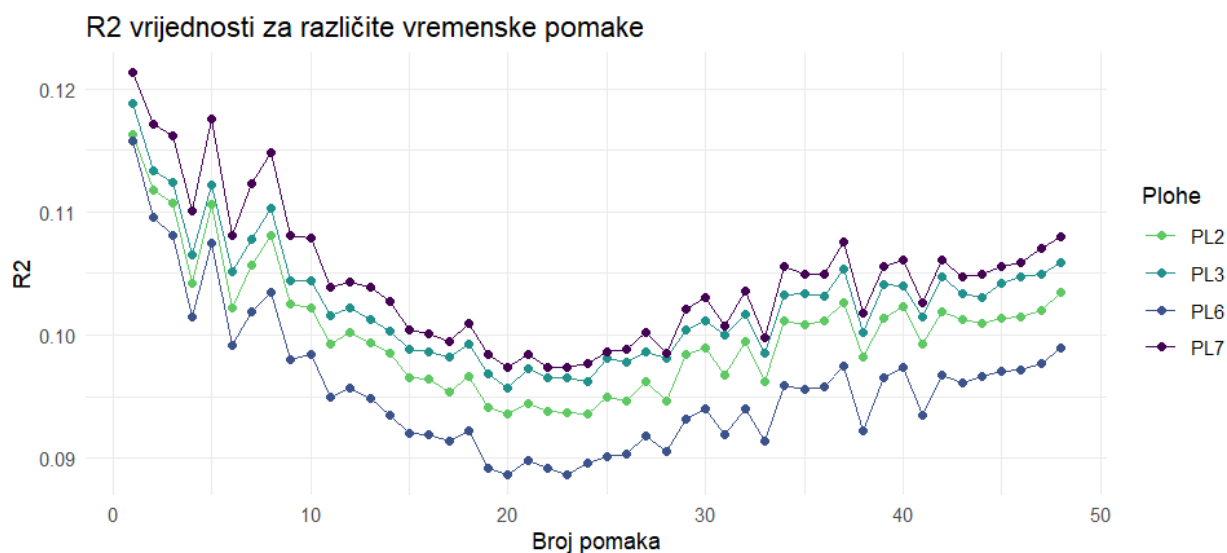
Podaci modela iz perioda II za 2019. i 2020. po plohama pokazuju da je relativna vlažnost zraka bila najbitniji čimbenik na plohi 2 (Slika 45 a i b), plohi 6 u 2019. (Slika 45 e), plohi 7 u 2020. (Slika 45 h). Na plohi 3 u periodu II 2019. najbitniji čimbenik bio je deficit zasićenosti (Slika 45 c), a volumni udio vode u tlu na 60 cm dubine u periodu II 2020 (Slika 45 d). Volumni udio vode u tlu na 30 cm dubine bio je najbitniji čimbenik u periodu II 2020. na plohi 6 (Slika 45 f). Na plohi 7 u periodu II 2019. najvažniji čimbenik bila je temperatura tla na 30 cm dubine (Slika 45 g). Na svim plohama u periodu II 2019. i 2020. godine, osim za plohu 3 period II 2020., temperatura zraka bila je značajna za modele, ali je imala najmanju važnost.

Važnost okolišnih čimbenika 30-minutna mjerenja



Slika 45. Postotno povećanje srednje kvadratne pogreške (%IncMSE) koja procjenjuje važnost čimbenika u Random Forest modelima. Prikazana je važnost čimbenika za pojedine modele 30-minutnog protoka ksilemskog soka i njihove vrijednosti na plohama 2 (a i b), 3 (c i d), 6 (e i f) i 7 (g i h) za podatke u periodu II 2019. (15.6.2019.-31.10.2019.) i periodu II 2020. (6.7.2020.-31.10.2020.). SoilWC30AVG-volumni udio vode u tlu na 30 cm dubine, SoilWC60AVG-volumni udio vode u tlu na 60 cm dubine, SoilT30AVG - temperatura tla na 30 cm dubine, Air2mAVG –temperatura izmjerena na 2 m visine od tla, RelHum2mAVG – relativna vlažnost zraka izmjerena na 2 m visine od tla, VPD – deficit zasićenosti zraka vodenom parom.

Napravljena je analiza vrijednosti modela s vremenskim pomacima protoka ksilemskog soka da se usporede vrijednosti s trenutnim i ispita mogućnost odgođene reakcije ksilemskog soka na vanjske čimbenike. Graf u nastavku (Slika 46) pokazuje da se i nakon jednog pomaka od +30 minuta R^2 za sve modele smanjio s oko 0,5 na 0,1 te nastavio padati za svih 48 pomaka (sve vrijednosti protoka pomaknule su se za 24 h). Isto je primijenjeno na podacima podijeljenima u periode na svim plohama, te su također pokazivali drastični pad u odnosu na R^2 trenutnog protoka. Zbog jednostavnosti prikaza, dan je samo graf za objedinjene godine 2019. i 2020. Dinamika R^2 vrijednosti ovisno o broju pomaka preklapala se na plohama, primjerice nakon 5 pomaka (30 min x 5 = 150 min) vrijednosti R^2 su porasle, da bi na 6. pomaku (180 min) ponovo pale. Ipak, radi se o veoma malim kvantitativnim promjenama R^2 vrijednosti ($\pm 0,01$).



Slika 46. Uspješnost modela za 30-minutni protok ksilemskog soka vremenski pomaknutog 1-48 puta na plohama za 2019. i 2020. godinu zajedno. Svi modeli koristili su temperaturu zraka i deficit zasićenosti kao značajne okolišne čimbenike. Broj pomaka označava koliko puta se protok ksilemskog soka “pomaknuo” za 30 min. Ukupno je napravljeno 48 pomaka (24 h) za svaku plohu. Uspješnost modela izražena je preko koeficijenta determinacije (R^2).

4.4.2. Korelacije između okolišnih čimbenika i modeli linearne regresije na dnevnim podacima

Prije izrade modela linearnih regresija, provjerila sam korelaciju svih čimbenika korištenjem Spearmanovog koeficijenta korelacije (podaci su prethodno testirani Shapiro – Wilk testom normalnosti koji je pokazao da podaci nisu bili normalno distribuirani da bi se koristio Pearsonov koeficijent korelacije). Na matrici grafova korelacija (Slika 47), dnevni protok ksilemskog soka bio je pozitivno koreliran i umjerene jačine s insolacijom na svim plohama (prosječni $r_s = 0,61$), temperaturom tla na 30 cm ($r_s = 0,6$) i temperaturom zraka ($r_s = 0,75$). Relativna vlažnost zraka i deficit zasićenosti imaju jaku i negativnu korelaciju ($r_s = -0,93$) što je i očekivano jer se deficit zasićenosti zraka vodenom parom računa iz temperature zraka i relativne vlažnosti zraka. Temperatura zraka imala je umjereno jaku i pozitivnu korelaciju s temperaturom tla ($r_s = 0,75$) i insolacijom ($r_s = 0,66$). Insolacija je imala pozitivnu korelaciju umjerene jačine s deficitom zasićenosti ($r_s = 0,7$) i negativnu korelaciju s relativnom vlažnosti zraka ($r_s = -0,55$).



Slika 47. Matrica grafova korelacije dnevnog protoka ksilemskog soka (Q24h) i odabranih okolišnih čimbenika, na podacima za vegetacijsku sezonu 2019. i 2020. Oborine - dnevne vrijednosti za oborinu na postaji Gradište, insolacija - broj osunčanih sati, JacVjetr14h - jačina vjetera u 14 h, Tlak - tlak zraka, VlaznTla-volumni udio vode u tlu na 30 cm dubine, TempTla30cm - temperatura tla na 30 cm dubine, TempZraka - temperatura zraka, VlazZraka - relativna vlažnost zraka, VPD - deficit zasićenosti. p-vrijednosti: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; Corr – Spearmanov koeficijent korelacije (r_s). Istaknute su vrijednosti koje se navode u tekstu.

Zatim sam napravila modele linearne regresije s dnevnim protokom ksilemskog soka kao funkcije jednog ili više okolišnih čimbenika. Neki modeli bili su jednostavna linearna regresija, a neki višestruka linearna regresija, ovisno o tome koliko čimbenika je bolje objašnjavalo varijaciju dnevnog protoka. Nakon što sam napravila i odabrala modele, izračunala sam varijabilni faktor inflacije da bih provjerila multikolinearnost čimbenika

u modelu. Svi čimbenici (za 2019. i 2020. godinu zajedno i odvojeno po periodima) imali su VIF faktor manji od 5, što znači da su bili korelirani s umjerenom jačinom.

U obje godine tijekom vegetacijske sezone na svim plohama su temperatura zraka i broj osunčanih sati bile značajni okolišni čimbenici u modelima linearne regresije kojima se pojašnjavao dnevni protok ksilemskog soka (Slika 48). Dodatno je temperatura tla na dubini od 30 cm poboljšavala modele na plohama 2, 6 i 7. Na plohama 6 i 7 modeli su bolje opisivali dnevni protok ksilemskog soka ($R^2 > 0,7$) u odnosu na plohe 2 i 3 ($R^2 = 0,53$ odnosno $R^2 = 0,54$).

Modeli koji su uključivali podatke za obje godine zajedno imali su niže koeficijente determinacije u 2019. godini nego na svim plohama za istu godinu podijeljenu po periodima.

Tablica 23. Uspješnost odabranih modela za dnevni protok ksilemskog soka kao funkcije jednog ili više okolišnih čimbenika (temperature zraka i tla, relativne vlažnosti zraka, deficita zasićenosti zraka vodenom parom, broj osunčanih sati, vlage tla) za vegetacijske sezone 2019. i 2020., te podijeljeno po periodima (period I: 1.4.2019.-14.6.2019. i 1.4.2020.-5.7.2020. i period II: 15.6.2019.-31.10.2019 i 6.7.-31.10.2020.). Uspješnost modela izražena je preko koeficijenta determinacije (R^2). p-vrijednosti: *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

	Ploha 2	Ploha 3	Ploha 6	Ploha 7
2019. i 2020.	0,53***	0,54***	0,73***	0,72**
2019 period I	0,74***	0,66***	0,84***	0,73***
2019 period II	0,63***	0,72***	0,71***	0,75***
2020 period I	0,49***	0,72***	0,44***	0,75**
2020 period II	0,57***	0,76***	0,83***	0,52***

Gledajući odvojeno po plohama, periodima i godinama, na plohi 2 u periodu I 2019. (1.4.-14.6.2019.) najveći koeficijent determinacije imao je model s temperaturom zraka i temperaturom tla na 90 cm ($R^2 = 0,74$) (Tablica 23, Slika 48). Isti čimbenici objašnjavaju dinamiku dnevnog protoka ksilemskog soka na ostalim plohama, s dodatnim čimbenikom relativne vlažnosti zraka na plohi 7.

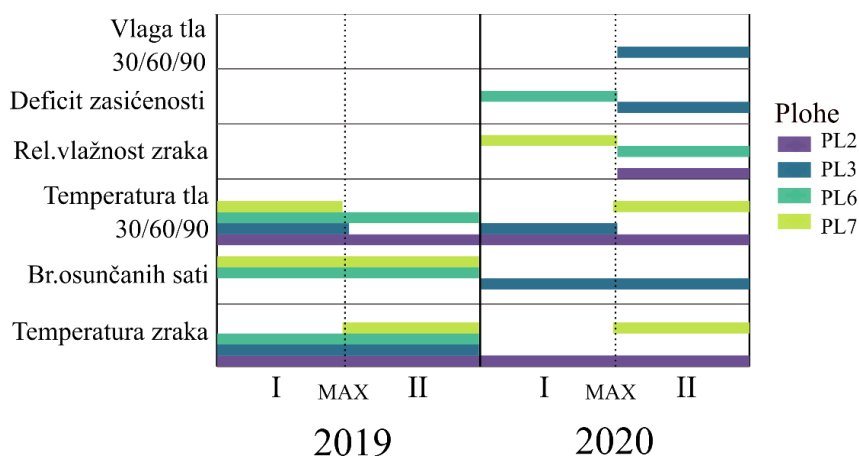
Na plohi 3 u 2019. je temperatura zraka bila značajna za objašnjavanje dinamike dnevnog protoka ksilemskog soka u oba perioda, s dodatkom temperature tla na 90 cm dubine u periodu I ($R^2 = 0,66$ za period I i $R^2 = 0,72$ za period II). U 2020. su temperatura tla i broj osunčanih sati najbolje opisivali dnevni protok ksilemskog soka u periodu I ($R^2 = 0,72$), dok su u periodu II to bili deficit vodene pare, volumni udio vode u tlu na 90 cm dubine i broj osunčanih sati ($R^2 = 0,77$) (Tablica 23, Slika 48).

Na plohi 6 su temperatura zraka, broj osunčanih sati i temperatura tla na dubini od 30 cm bili značajni čimbenici za opisivanje protoka ksilemskog soka 2019. godine u periodima I ($R^2 = 0,84$) i II ($R^2 = 0,71$). U periodu I 2020. godine temperatura tla na dubini od 30 cm i deficit vodene pare su opisivali do 44 % varijacije dnevnog protoka ksilemskog soka. U periodu II 2020. godine relativna vlažnost zraka istaknula se kao samostalni značajni okolišni čimbenik na plohi 6 ($R^2 = 0,83$).

Na plohi 7 je u 2019. broj osunčanih sati bio značajni čimbenik u oba perioda, dok je temperatura tla na dubini od 90 cm bila dodatni čimbenik u periodu I ($R^2 = 0,75$), a temperatura zraka u periodu II (također $R^2 = 0,75$). Relativna vlažnost zraka bila je

samostalni čimbenik koji je opisivao dnevni protok ksilemskog soka 2020. u periodu I ($R^2 = 0,75$), a u periodu II iste godine temperatura zraka i broj osunčanih sati su slabije opisivali dnevne protoke ksilemskog soka ($R^2 = 0,52$).

Temperatura zraka općenito je na svim plohama bila značajan čimbenik u 2019. godini, dok u 2020. nema veću značajnost na plohama 3, 6 i 7. Temperatura tla na dubini od 30 cm bila je značajna na plohama 2, 6 i 7 za obje godine zajedno, dok je u dubljim slojevima (90 cm) bila značajna za plohu 2 (svi periodi u 2019. i 2020. godini) i plohu 3 (periodi I u 2019. i 2020.) (Slika 48). Deficit zasićenosti bio je značajan u periodu II 2020. na plohi 3 i u periodu I 2020. na plohi 6. Relativna vlažnost zraka bila je značajan čimbenik u modelima za period II 2020. (plohe 2 i 6), te period I 2020. za plohu 7. Dodatno, na plohama 6 i 7 relativna vlažnost zraka bila je samostalni čimbenik za opisivanje dnevnog protoka ksilemskog soka. Volumni udio vode u tlu na 90 cm dubine bio je značajan za plohu 3 u periodu II 2020.



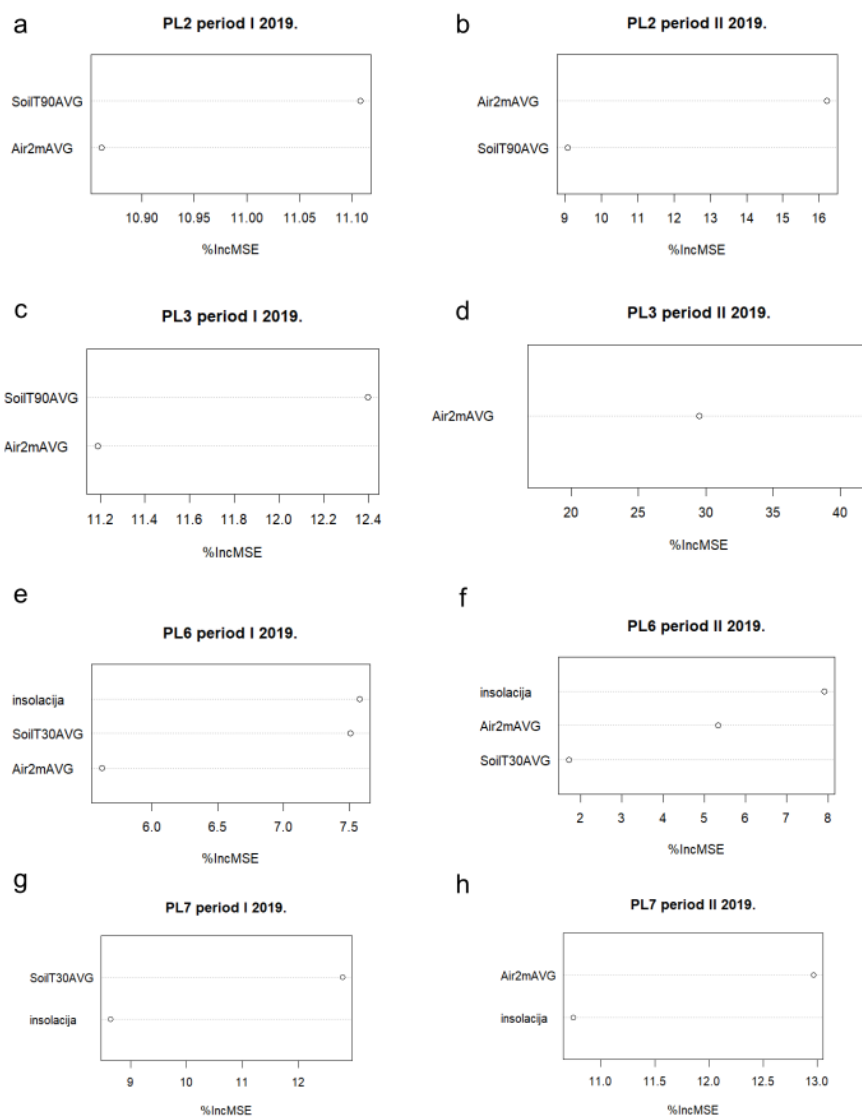
Slika 48. Značajni okolišni čimbenici u modelima višestruke linearne regresije za dnevne protoke ksilemskog soka (Q). Prikazani su modeli za 2019. i 2020. godinu odvojeno po periodima (od i do sezonskog maksimuma protoka ksilemskog soka) za svaku godinu.

4.4.2.1. Važnost okolišnih čimbenika u modelima koji su objašnjavali dnevnu varijaciju protoka ksilemskog soka

Provođenjem Random forest na odabranim modelima napravljena je hijerarhija vrijednosti čimbenika za pojedini model (Slika 49). Postotno povećanje srednje kvadratne pogreške (%IncMSE) na grafovima pokazuje koliko je čimbenik bio bitan za model - što su veće vrijednosti, čimbenik je bio bitniji za model.

Budući da su modeli u 2019. godini bili po periodima bolji nego oni u 2020., odabrala sam periode samo u 2019. godini da prikazem važnost okolišnih čimbenika (Slika 49). U periodu I, temperatura tla na 90 cm i zatim temperatura zraka bili su značajni čimbenici u modelima za nize (plohe 2 i 3), a broj osunčanih sati i temperatura tla na 30 cm za grede (plohe 6 i 7). Zatim je u drugom periodu slijedio obrat važnosti čimbenika kad temperatura zraka postaje važniji čimbenik od temperature tla ili broja osunčanih sati na svim plohama. Važnost broja osunčanih sati za grede u modelima u periodu II ostala je ista u odnosu na period I (najvažnija na plohi 6 i zadnja po važnosti na plohi 7).

Važnost okolišnih čimbenika dnevna mjerenja 2019.

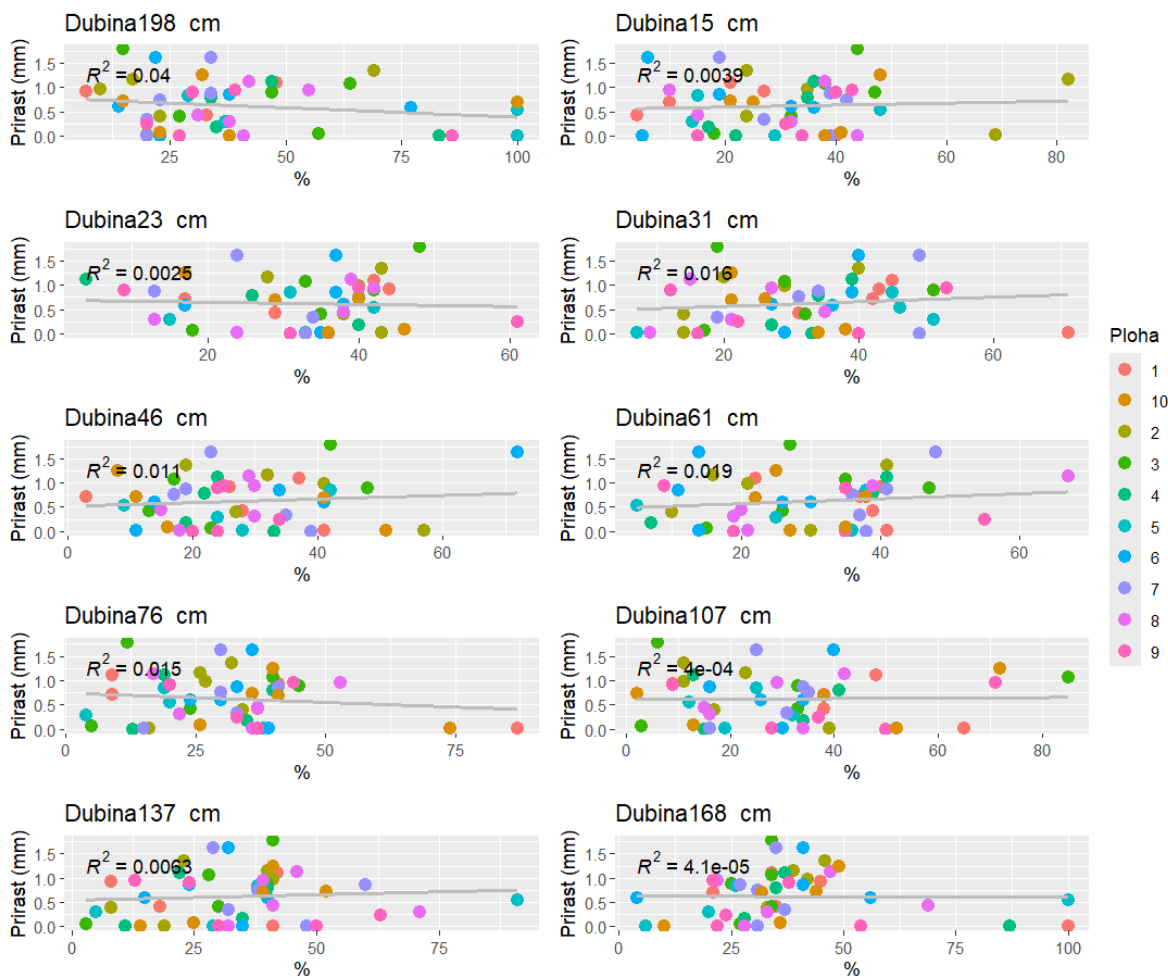


Slika 49. Postotno povećanje srednje kvadratne pogreške (%IncMSE) koja procjenjuje važnost okolišnih čimbenika u Random Forest modelima. Prikazana je važnost čimbenika za pojedine modele dnevnog protoka ksilemskog soka na plohama 2, 3, 6 i 7 za podatke u dva perioda (prije i poslije vegetacijskog maksimuma dnevnog protoka ksilemskog soka) zasebno u 2019. (period I: 1.4.2019.-14.6.2019. i period II: 15.6.2019.-31.10.2019.). SoilT30AVG-prosječna dnevna temperatura tla na 30 cm dubine, SoilT90AVG - prosječna dnevna temperatura tla na 90 cm dubine, insolacija-broj osunčanih sati, Air2mAVG – dnevni prosjek temperatura izmjerenih na 2 m visine od tla.

4.5. Debljinski prirast hrasta lužnjaka u odnosu na vlažnost tla

Iz grafova debljinskog prirasta hrasta lužnjaka i vlage tla na različitim dubinama te njihovih koeficijenata determinacije (R^2) vidljivo je da vlaga u tlu nije dobro opisivala varijacije u prirastu (Slika 50).

Vlaga u tlu na različitim dubinama i prosječni debljinski prirast po plohama



Slika 50. Vlaga u tlu na različitim dubinama (od 15 do 198 cm) i debljinski prirast hrasta lužnjaka na datume: 02.04.2020., 15.05.2020., 02.07.2020., 18.09.2020. i 4.12.2020. po plohama 1-10.

5. RASPRAVA

5.1. Protok ksilemskog soka i transpiracija

Dnevni protok ksilemskog soka

Dnevni prosječni protok ksilemskog soka na pet stabala na svim plohama iznosio je oko 147 ± 52 kg/24 h tijekom vegetacijske sezone 2019., dok je u 2020. godini bio 103 ± 44 kg/24 h. Najveći srednji dnevni protok zabilježen je na plohi 6, koja je također imala najveći dnevni maksimum protoka od 383 kg/24 h u lipnju. Ovi rezultati u skladu su s prethodnim istraživanjima na hrastu lužnjaku: srednji protok od 385 ± 41 kg/24 h na hrastovima starim 140 godina s prosječnim promjerom od 83 cm (Sanchez-Perez i sur., 2008) te maksimumi do 400 kg/24 h za starija stabla (Čermák i sur., 1982) i do 162 kg/24 h u srpnju za mlađa stabla (Özçelik, 2017). Za usporedbu, hrast kitnjak imao je dnevne prosjeke od 142-156 kg/24 h između svibnja i rujna u dvije sušne godine, s maksimumima od 246-254 kg/24 h (Vannassche, 2011).

Vrijeme dnevnih maksimuma protoka ksilemskog soka

Maksimumi dnevnih protoka u travnju bili su raspoređeni tijekom cijelog dana i noći, dok su se od svibnja do kraja sezone maksimumi protoka najčešće javljali između 11 i 16 sati na svim plohama. U travnju, koji je označavao početak vegetacijske sezone i prolistavanje krošnje hrasta lužnjaka, zabilježeni su niži protoci s malim dnevnim varijacijama, pri čemu su se maksimumi mogli zabilježiti bilo kada tijekom dana, a ne nužno oko podneva kao u kasnijoj vegetacijskoj sezoni.

Maksimalni protoci oko podneva za hrast lužnjak zabilježeni su kod Čermák i sur. (1982), dok su Knight i sur. (1981) isto zabilježili za šumu četinjača. Za usporedbu, poljoprivredne kulture također su imale maksimum oko podneva (Hou i sur., 2019), ali i oko 15 sati (Hou i sur., 2021). Starija stabla hrasta lužnjaka imala su krajem lipnja maksimalni satni protok od 30 kg/h (Sanchez-Perez i sur., 2008). U radu Loritz. i sur. (2024), rod *Quercus* imao je u rujnu satni protok od 2-3 kg/h u podne, što je deset puta manje od protoka izmjenjenog u isto doba dana na stablima u spačvanskoj šumi. Autori nisu specificirali koje vrste i starosti stabala su uzeli u obzir za izračun protoka, koji varira

ovisno o veličini stabla (površini bjeljike kroz koju teče ksilemski sok) (Wullschleger i sur., 2001).

Transpiracija

Jedan od izazova u ovom radu bio je kako izraziti transpiraciju koristeći podatke o protoku ksilemskog soka. Poznato je da postoji vremenski pomak u protocima ksilemskog soka i transpiracije jer se voda koristi u biljnim tkivima za primarne metaboličke procese (Čermák i sur., 2004; Granier i Bréda, 1996). Veća stabla mogu skladištiti više vode u deblu, kao što je utvrđeno kod hrasta kitnjaka, čiji je dnevni doprinos skladištene vode početkom rujna iznosio između 14 % i 16,5 % ukupne transpiracije stabla (Bequet i sur., 2010). Gornji dio krošnje američke duglazije gubio je vodu brže nego donji dijelovi, što je dovelo do zaključka da je protok izmjeren na prsnom promjeru stabla podcijenjen u odnosu na stvarnu transpiraciju (Čermák i sur., 2007). Nadalje, istraživanja su pokazala da se gotovo sva voda, otprilike 99 %, transpirira tijekom perioda od jednog do nekoliko dana (Forster, 2017). S druge strane, azijska vrsta (*Quercus variabilis* Blume) koristila je 93,91 % protoka ksilemskog soka za transpiraciju na razini godine, a ostatak je skladištila (Liu i sur., 2021). Kapacitet izmjene vode i vrsta stabla značajno su utjecali na vrijeme koje je bilo potrebno da se promjene u protoku ksilemskog soka reflektiraju na transpiraciju krošnje (Čermák i sur., 2007; Granier i sur., 1996; Herbst i sur., 2007).

U istraživanju koje je proveo Ferraz i sur. (2015) (Ferraz i sur., 2015), protok ksilemskog soka kod stabala papaje bio je linearno vezan s transpiracijom krošnje, iako je bilo potrebno kalibrirati podatke za svaku sastojinu. Nalevankova i sur. (2020) koristili su satne protoke ksilemskog soka za procjenu trenutne transpiracije. Međutim, s obzirom na potencijalne vremenske pomake između transpiracije i protoka ksilemskog soka (Granier i sur., 1996), nisam izjednačila trenutne protoke (10-minutne, 30-minutne i satne) s trenutnom transpiracijom. Također, nisam uočila vremenske pomake u odgovoru protoka ksilemskog soka (30-minutni intervali) na okolišne čimbenike, čak i nakon 24 h. Na temelju tih rezultata, zaključila sam da su trenutne varijacije u okolišnim čimbenicima najbolje objašnjavale trenutne varijacije u protoku ksilemskog soka.

Nadalje, u ovom radu sam dnevne i 8-dnevne protoke ksilemskog soka stabla u sastojini smatrala transpiracijom krošnje tog stabla, kao što to smatra i Kučera i sur. (2017).

Na svim plohama i stablima, transpiracija (T) je bila niža u 2020. nego u 2019., što se može objasniti padom kvalitete mjerenja protoka na uređaju. U 2020. je smanjen broj terenskih izlazaka zbog epidemije koronavirusa, pa akumulatori nisu mijenjani dovoljno često što je uzrokovalo mjerenja različite kvalitete (npr. pred kraj baterije akumulatora) ili čak da su mjerenja izostala (npr. za plohu 7 u drugom dijelu vegetacijske sezone).

5.2. Procjena transpiracije metodama daljinskog motrenja

5.2.1. Procjena fenoloških faza

Fenološke faze procjenjivane metodama daljinskog motrenja uključivale su PPI indeks Copernicus CLMS produkta HRVPP i Sentinel-2 indekse. Procjena početka sezone korištenjem PPI preklapila se s početkom porasta T hrasta lužnjaka. Kraj sezone preko PPI procijenjen je polovicom ili krajem rujna (na plohi 6. i početkom listopada u 2019.), dok je T hrasta lužnjaka još bila aktivna nakon tog razdoblja. PPI imao je skoro linearnu vezu s LAI vegetacije, a računao se pomoću refleksija u crvenom i blisko infracrvenom spektru (Jin i Eklundh, 2014). Na LAI utječu sve vrste u sastojini, pa je moguće da je zbog toga kraj sezone procijenjen ranije nego kraj vegetacijske sezone hrasta lužnjaka. Očekivala sam da se dan vegetacijskog maksimuma određen s PPI, koji odražava LAI, preklapa s maksimumom SELI, također indeksom za procjenjivanje LAI. No dan vegetacijskog maksimuma određen s PPI nastupio je skoro mjesec dana ranije od maksimuma SELI, ali i T hrasta lužnjaka na većini ploha u 2019. i preko mjesec dana ranije u 2020. U svom radu, Jin i Eklundh (2014), zaključili su da je PPI naglašavao suptilne promjene tijekom vegetacijske sezone listopadnih šuma umjerenog pojasa i izbjegao efekt zasićenosti u gustim vegetacijama što se događalo s drugim indeksima. Također, uočili su dva odvojena događaja listanja – prvi za prizemnu vegetaciju i drugi u krošnji drveća. Početak sezone, nakon obrade podataka u TIMESAT programu, definirali su kao vrijednost u kojem je prilagođena krivulja (eng. fitted curve) postizala 20 % praga sezonske amplitude. Ovakav pristup može se primijeniti i na podacima protoka ksilemskog soka hrasta lužnjaka da bi se dobio precizniji datum početka vegetacijske sezone. Nadalje, u istom radu su pokazali da je u vrhuncu vegetacijske sezone PPI bio najosjetljiviji na šum u signalu, a manje u prijelaznim fenološkim fazama. Šum u signalu mogao bi objasniti zašto se dan vegetacijskog maksimuma određen u produktu HRVPP

nije preklapao sa sezonskim maksimumom dnevne T hrasta lužnjaka i procjenom preko Sentinel-2 SELI, jer su na plohama rasle ostale vrste s različitim udjelima i fenološkim fazama pa se nije posebno istaknula fenološka faza za hrast lužnjak.

Na plohi 3 u 2020. je maksimalni PPI bio najveći u usporedbi s drugim plohama za obje godine. Na ovoj plohi razlikovao se i datum maksimuma vrijednosti NDVI, koji je nastupio oko 10 dana ranije nego na ostalim plohama u 2019.

Sastojina na kojoj se nalazila ploha 6 imala je najmanje stabala hrasta lužnjaka po hektaru, no oni su imali najdeblje prosječne promjere stabla i najveću temeljnicu u usporedbi s ostalim plohama, a to je povezano i s količinom lisne mase i LAI, što je moglo objasniti veće vrijednosti PPI.

Ploha 7 je jedina u 2020. koja je prema HR-VPP podacima imala duljinu trajanja vegetacijske sezone veću nego onu u 2019. Vrijednosti PPI su na ovoj plohi bile manje u 2020. za sve fenološke faze, dok su na ostalim plohama PPI vrijednosti bile veće u 2020. nego u usporedbi s 2019.

U borealnoj zoni PPI se pokazao kao bolji od NDVI i EVI za procjenu početka sezone (Karkauskaite i sur., 2017). Za usporedbu, NDVI i EVI nisu bili posebno osjetljivi na varijacije u LAI kod njegovih visokih vrijednosti i šum u signalu ovih indeksa bio je manje izražen jer su dosegli zasićenost (Jin i Eklundh, 2014).

Sve navedeno išlo je u prilog tome da je PPI na plohama uvjetovan vrstama, njihovim fenološkim fazama i udjelu u sastojini, te da nije bio prikladan za procjenu fenoloških faza za hrast lužnjak.

U svojoj studiji Nagai i sur. (2010) su pak koristili NDVI za procjenu početka sezone u listopadnim šumama hladnijeg umjerenog pojasa i uvidjeli da se NDVI s vrijednostima 0,6 – 0,7 mogao koristiti za definiranje vremena početka listanja, ali nije bio uspješan u detekciji vremena otpadanja listova. U ovom radu koristila sam maksimume vrijednosti indeksa za detekciju maksimuma sezone, no ovi podaci mogli bi se poboljšati i spomenutim obradama popunjavanja praznina (pogotovo zbog nedostupnosti snimki bez naoblake u važnim fenološkim fazama) i zaglađivanja podataka, a u cilju detekcije datuma početka vegetacijske sezone.

5.2.2. Evapotranspiracija

Dinamika T fluktuirala je u sredini sezone, ali generalno je pratila dinamiku ET (dobivenu putem MODIS produkta) u spačvanskoj šumi, a njihova korelacija je bila jaka na svim plohama u 2019. godini za periode prije i poslije sezonskog maksimuma dnevne T. U 2020. godini korelacije između ET i T su varirale, pretpostavljam zbog pada kvalitete mjerenja na uređaju, jer su i u ostalim analizama bili sustavno slabiji rezultati.

MODIS ET je za obje godine objašnjavao 30-50 % varijacije T, ali uspješniji su bili modeli s podacima podijeljenima na periode. U prvom periodu (do vegetacijskog maksimuma dnevne transpiracije) MODIS ET je uspješno predviđao T u 2019. na svim plohama. U periodu II 2019. (nakon vegetacijskog maksimuma dnevne transpiracije) modeli su općenito manje uspješni, a najbolji na plohama koje su bile na gredama. U sastojini na kojoj se nalazila ploha 2 bilo je najviše stabala poljskog jasena, skoro u jednakom omjeru kao hrasta lužnjaka. Dodatno, na toj plohi su stabla hrasta lužnjaka imala nepotpun do rijetki sklop krošnje, što je omogućavalo razvitak krošnje u donjim slojevima. Zbog većeg površinskog udjela krošanja jasena na plohi 2, pretpostavljam da je jasen više pridonosio ukupnoj T i posljedično ET nego na ostalim plohama.

U sastojini na kojoj se nalazila ploha 6 nije bilo puno stabala hrasta lužnjaka po hektaru, ali su bili ujednačenog prostornog rasporeda, a u gornjem sloju dominirao je hrast lužnjak. Moguće je da su zbog dominantnosti krošnje hrasta lužnjaka bile bolje korelacije s ET, SIF i vegetacijskim indeksima jer je hrast lužnjak najviše doprinio ukupnoj T odnosno ET plohe.

U 2020. su modeli u periodu I opet bili uspješni, iako manje nego oni iz 2019., pretpostavljam zbog smanjenja kvalitete mjerenja protoka na uređaju. Prema ovim rezultatima, bilo je moguće koristiti MODIS ET za objašnjavanje dinamike T u spačvanskoj šumi u periodu I, tj. do vegetacijskog maksimuma dnevnog T, a nakon toga se uspješnost modela smanjila. Prema rezultatima ovog rada, postoje naznake da u periodu II MODIS ET može bolje predviđati T na gredama nego na nizama, ali za to je potreban veći skup podataka kroz više godina. U svom radu Vodnik i sur. (2019) su proučavali protok ksilemskog soka u hrastu meduncu na područjima s propusnim tlima i onima s većom retencijom vode. Pokazali su da je medunac prilagođavao protok ksilemskog soka i provodljivost puči na stresne čimbenike s obzirom na tip tla na kojem

raste. Pokazali su i da je u sezoni kad postoji dovoljno vode u tlu, protok ksilemskog soka bio veći u hrastu meduncu koji raste na propusnom tlu, a zatim se, smanjenjem količine vode u tlu u srpnju, na oba područja smanjio protok. Hrast medunac regulirao je ove procese smanjenjem provodljivosti puči što je dovelo i do smanjenja radijalnog rasta debla, ali i promjenama veličine i vremena nastajanja provodnih kanala u različitim godinama. Prema rezultatima utjecaja okolišnih čimbenika na dnevnu T (potpoglavlje 5.3), u spačvanskoj šumi hrast lužnjak oslanjao se više na podzemne vode nego na oborinsku vodu.

Razlike evapotranspiracije između dviju vegetacijskih sezona

Značajne razlike između ET u dvije godine nije bilo, moguće zbog toga što je MODIS ET model koji uzima u obzir lokalne okolišne meteorološke čimbenike, ali oni ovise i o dostupnim meteorološkim postajama na području. Naime MODIS16A2GF produkt koristi podatke svjetske meteorološke organizacije (WMO), te dodatno primjenjuje prostornu interpolaciju koja ublažava nagle promjene između postaja mjerenja (Mu i sur., 2013). Najbliža postaja spačvanskoj šumi je u Mađarskoj u mjestu Pecs (WMO broj: 0-20000-0-12942), udaljena 125 km i nalazi se na 200 m nvm te postaja Szeged (WMO broj: 0-20000-0-12982), udaljena 165 km na 81 m nvm. Moguće da se zbog udaljenosti postaja, interpolacijom generalizirao model za šire područje, pa nije odražavao specifične lokalne uvjete. Primjerice, šuma hrasta lužnjaka pripada listopadnim šumama, no i unutar ovog tipa šuma postoje razlike zbog vrsta, njihove starosti i omjera te okolišnih čimbenika u kojima rastu (Mu i sur., 2013). Produkt MODIS 16A2GF koristi kartu korištenja zemljišta sa 17 klasa i ne radi razliku između prostorno-vremenskih varijacija fizioloških čimbenika pojedinih staništa (npr. šuma hrasta lužnjaka u spačvanskoj šumi uključena je u jednaku kategoriju korištenja zemljišta kao i šuma s javorom u Kanadi) (Running i sur., 2019).

Dodatno, studije koje su koristile MODIS ET snimke analizirale su veća područja, pa i čitave države (Ersi i sur., 2022; Sriwongsitanon i sur., 2020), dok sam na spačvanskom području obrađivala četiri piksela kroz vrijeme. Mozaičnost staništa važna je pogotovo u kontekstu vremenskog niza satelitskih snimki kad su one ograničene prostornom rezolucijom gdje u jednom pikselu dolazi do miješanja signala različitih tipova staništa pa je npr. godišnji ET šuma bio manji od ET travnjaka (jer su šume imale kraću

vegetacijsku sezonu) (Fischer i sur., 2013; Hou i sur., 2021). Nadalje, stabla četinjača na rubu šume pridonosila su više ukupnoj transpiraciji sastojine (Ringgaard i sur., 2012). Prostorna rezolucija od 500 m MODIS piksela obuhvatila je homogena šumska staništa na plohama u spačvanskoj šumi i stabla se nisu nalazila na rubu sastojine, pa su i pikseli bili reprezentativni za cijelu sastojinu.

Razlike evapotranspiracije između ploha

Nije postojala razlika u ET na plohama iako su imale drugačiji sastav vrsta i uvjete rasta (nize i grede). U svom radu Herbst i sur. (2007) su pokazali da se razlike između korištenja vode u dva tipa šuma (šuma hrasta lužnjaka u kojima je bio kodominantan s bukvom i druga u kojoj je dominirao jasen i gorski javor) izjednače na razini godine. Među tim šumama postojale su varijacije u transpiracijama krošnje u kraćim vremenskim intervalima zbog drugačijih regulatornih mehanizama (drugačiji LAI i duljina trajanja sezone), no oni su se izjednačili na razini sezone i sastojine.

Omjer ET/PET

Omjer ET i PET se može koristiti za utvrđivanje vodnog stresa u okolišu, primjerice koliko je suša intenzivna (Running i sur., 2019). Na većini ploha u 2019. najmanji omjer ET/PET bio je krajem kolovoza, a u tom mjesecu je istovremeno bilo i kumulativno najmanje padalina uspoređujući od početka sezone. U 2020. godini najmanji omjeri ET/PET zabilježeni su za tri od četiri plohe početkom vegetacijske sezone (travanj), a za jednu plohu (ploha 3) sredinom rujna. U travnju i rujnu 2020. na postaji Gradište bilo je barem 50 % manje oborine, a u kolovozu skoro pet puta više oborine nego za iste mjesece u prethodnoj godini. Prema tome su krajem kolovoza 2019., početkom travnja i kolovoza te sredinom rujna 2020. prevladavali aridni uvjeti i to je MODIS uspio detektirati.

Omjer T/ET

Najčešći omjer T/ET kroz vegetacijsku sezonu za obje godine kretao se od 0,2 do 0,5. Najmanji je bio na plohi 7. Ovi rasponi vrijednosti bili su nešto niži od globalnih procjena T/ET (46 -76 %) (Schlesinger i Jasechko, 2014). Valja naglasiti da je u ovom radu terenski mjerena samo transpiracija hrasta lužnjaka, ali i druge vrste su pridonosile ukupnoj T, te sam i očekivala da će omjer T hrasta lužnjaka i ET biti podcijenjen u odnosu na stvarnu T sastojine. Dodatno, maksimumi ET u 8-dnevnim periodima na plohama nisu pratili

maksimume T hrasta lužnjaka. Na plohama u spačvanskoj šumi dominirao je hrast lužnjak koji je imao najveće temeljnice, drvene zalihe i srednju sastojinsku visinu (Tablica 3) pa je bilo očekivano da je njegova transpiracija najviše pridonosila transpiraciji na razini sastojine.

Ostale vrste u sastojinama spačvanske šume doprinosile su ukupnoj transpiraciji u određenom omjeru, no pošto nije mjeren protok ksilemskog soka na njima, nisam mogla kvantificirati taj iznos. Primjerice, Liu i sur. (2020) su zaključili kako su ukupnoj transpiraciji u sastojini najviše pridonosila stabla s dominantnim krošnjama i površinom bjeljike/temeljnice, neovisno o vrsti stabala. Ringgaard i sur. (2012) su zaključili kako je u nasadima jele otvorenog sklopa krošnje postojala značajna veza između veličine stabla i gustoće protoka ksilemskog soka. S druge strane, Čermák i sur. (2004) naveli su da je pri procjeni transpiracije na razini sastojine ili šume, važno uzeti u obzir broj, veličinu i vrstu stabala te da su dominantna stabla utjecala na oko 60 % gubitka vode iz sastojine, stabla srednje veličine oko 20 % i rijetka stabla samo 5-10 % (Čermák, Kučera and Nadezhdina, 2004 prema Čermák i sur. 1978).

Na svim plohama u spačvanskoj šumi sklop sastojine bio je nepotpun, pa se treba uzeti u obzir i T prizemnog sloja vegetacije i vrsta koje rastu ispod razine krošanja hrasta lužnjaka. Primjerice, u radu Caroline Vincke i sur. (2005) u starim šumama hrasta lužnjaka s većom gustoćom krošnje, transpiracija prizemnog sloja bila je manja, ali je taj sloj ostao kompetitivan za vodu. Prema istom radu, u sastojinama hrasta lužnjaka koje su prorjeđivane, transpiracija hrasta je iznosila 21-38 % transpiracije sastojine i bila je manja od transpiracije prizemnog sloja. Poyatos i sur. (2005) navode da su Čermak i sur. (1998) ustanovili da transpiracija u donjim slojevima sastojine hrasta čini oko 15 % s ukupne transpiracije.

Od početka rujna T/ET se povećavao, dok su se ukupne ET i T smanjivale prema kraju sezone. To znači da je T pridonosila više u ukupnom ET prema kraju sezone nego u prethodnom periodu. Ovo je u skladu s istraživanjima Wang i sur. (2014) koji su uočili viši T/ET u kasnijim fazama vegetacijske zone kod specifičnih LAI vrijednosti. Objasnili su ovo time što u kasnijim fazama dolazi do otpadanja lišća i da je na tlu bilo više organskog materijala koje je smanjilo isparavanje iz tla.

Moguće je i da je hrast lužnjak imao dulju sezonu listanja, a da su ostale vrste (jasen, klen, obični grab) gubile svoje lišće i nisu transpirirale u tolikom omjeru kao u ranijim razdobljima. Pretpostavku da hrast nastavlja transpirirati u znatnom opsegu i nakon kraja sezone za većinu okolnih vrsta potkrijepio je i Herbst i sur. (2007) (prema Rasmussen i Rasmussen 1984 i Poyatos i sur. 2007) koji je naveo kako su šume u kojima je dominirao hrast, povećavale frakciju dostupne energije korištene za transpiraciju u kasnoj sezoni u uvjetima kada postoji dovoljno vode u tlu.

Mnogi autori su preporučili da se za bolju procjenu T i omjera T/ET treba mjeriti i isparavanje (E), npr. iz tla ili krošnje nakon oborina, što bi poboljšalo i razdvajanje satelitski mjerene ET na te dvije komponente (Kool i sur., 2014; Marshall i sur., 2016; Scott i sur., 2006).

U spačvanskoj šumi od 2013. postoji zaraza hrastovom mrežastom stjenicom koja polaže jaja na listove hrasta lužnjaka i siše biljne sokove. Nikolić i sur. (2019) su ustanovili da se brzina transpiracije smanjila za 20 % na hrastovima lužnjaka koji su bili zaraženi ovom vrstom. Moguće da je u periodima kad nije bilo obilnih oborina (i koje bi utjecale na isparavanje iz krošnje i tla) i gdje bi očekivali da transpiracija hrasta lužnjaka pridonosi najviše ukupnoj evapotranspiraciji, T/ET vrijednosti nisu prelazile 0,5 zbog utjecaja stjenice.

Na plohi 2 od kolovoza i plohi 6 od listopada 2019., T je premašivala vrijednost ET što je fizički nemoguće. Ovo može biti zbog nesigurnosti MODIS modela, primjerice Parajuli i sur. (2022) su pokazali da je bolje koristiti ET vrijednosti simulirane iz hidroloških modela koji koriste više ulaznih podataka (topografija, tip tla, oborine, minimalna i maksimalna temperatura, brzina vjetra, solarna radijacija, relativna vlažnost zraka) za predviđanje ET u kraćim vremenskim intervalima (8 dana) na poljoprivrednom području. Za veće vremenske intervale (usporedba sezona i godina), adekvatan je i godišnji MODIS ET zbog manjeg raspona fluktuacija vrijednosti koje ne prikazuju stvarno stanje u kraćim vremenskim intervalima. Nedostatak ovakvog pristupa je što ne postoje potpuni podaci potrebni za hidrološke modele za sva područja, dok satelitske snimke pokrivaju većinu kopna.

Evapotranspiracija i oborina

Ukupna ET na većini ploha u sezoni bila je veća do 26 % od ukupne količine oborine, osim na plohi 3 gdje je bila manja za 17 % u odnosu na ukupnu oborinu u obje godine (Slika 32). Neki autori (Mu i sur., 2013; Wang i sur., 2014) navode da je godišnja evaporacija bila jednaka godišnjoj oborini na istom području. U slučaju kada ET premašuje vrijednosti oborine to znači da je sva oborina koja je pala vraćena natrag u atmosferu isparavanjem ili transpiracijom. U svom radu, Ffolliott i sur. (2003) su procijenili da su dnevne i godišnje T različitih vrsta hrastova iznosile 45-80 % godišnjih oborina, ovisno o strukturi sastojine. Dodatna količina vode u ET može dolaziti evaporacijom iz tla koje je bilo vlažno i prije početka vegetacijske sezone. Druga mogućnost je da su modeli MODIS ET procijenili vrijednosti stvarne ET. Primjerice, modeli MODIS ET pokazivali su značajne greške kod klimatskih ekstrema kao što su visoka temperatura, visok deficit zasićenosti i suša (Qian i sur., 2023). Kod ovakvih događaja procjena ET produkta MOD16A2 bila je uglavnom precijenjena, pogotovo u vlažnim i poluvlažnim područjima u blizini 30°N. Najznačajnije greške bile su na poljoprivrednim područjima i listopadnim šumama, pogotovo u miješanim šumama.

Rousta i sur. (2022) koristili su MODIS produkt MOD16A2GF i našli pozitivnu i značajnu vezu između ET i oborine u proljeće. Navode i da su u ovom dijelu sezone oborine glavni čimbenik koji utječe na dinamiku vegetacije, dok se temperatura zraka može zanemariti u slučajevima kad ima obilnih oborina. U ljetnim mjesecima temperatura zraka bila je negativno korelirana s ET. Obilne oborine u jesen produljile su vegetacijsku sezonu, najviše zbog povećanja vlažnosti tla.

Prema Ersi i sur. (2022) transpiracija vegetacije najviše je pridonosila ET u vegetacijskom razdoblju, a bila je u vezi s NDVI-em koji se pak povećavao pod utjecajem oborine i temperatura. Ke i sur. (2017) koristili su Landsat 8 da poboljšaju prostornu rezoluciju MODIS ET produkta s 1 km na 30 m što bi u budućim istraživanjima moglo omogućiti smanjenje izmiješanosti signala u pikselu na manjim područjima koja se promatraju.

5.2.3. Suncem inducirana fluorescencija

Dinamika SIF i transpiracije u 2019. bile su čvrsto pozitivno vezane na plohi 7 u 2019. godini, dok je na ostalim plohama jačina korelacije bila umjerena. SIF je najbolje bio predstavljen korigiranim SIF743 koji je koristio duljinu dana za korekciju trenutne vrijednosti snimljene u jednom trenutku u danu. Na plohi 7 dominirao je hrast lužnjak u gornjem sloju krošnje, pa je vjerojatno i najviše pridonosio ukupnoj T, a signal SIF je također dolazio dominantno iz gušćeg sklopa krošnje (niži slojevi vegetacije nisu značajno doprinikli ukupnom SIF).

TROPOSIF produkt korigirani SIF743 najbolje je opisivao varijacije dnevne T. Korigirani SIF743 uzimao je u obzir duljinu dana koja je direktno vezana uz solarni zenitni kut čiju je dinamiku pratila i T. SIF na valnoj duljini 743 nm označava drugi vrhunac SIF spektra i daje informacije o fotosustavu I (PSI) i fotosustavu II (PSII) (Gao i sur., 2024). U istom radu, SIF na 740 nm i SIF na 760 nm najbolje su predviđali T na otvorenim staništima eukaliptusa u Australiji. Proučavali su i čimbenike koji utječu na vezu SIF-T te zaključili kako temperatura i oborine nisu imale značajan utjecaj osim u slučajevima temperatura viših od 30 °C, i dnevnih oborina većih od 10 mm (zbog povećanog isparavanja s krošnje koje utječe na transmisiju fotona). SIF je u toj studiji dobiven iz RTM simulacija uz podatke senzora Lidar i Sentinel-2. Studija je rađena na području koje je različito po vrstama i stanišnim uvjetima od spačvanske šume, no potvrdila je da je SIF u kanalima na oko 740 nm (blisko infracrveni spektar) dobro povezana s T. U ovom radu nisam obradila moguće utjecaje temperature i oborina na SIF-T u poplavnoj šumi hrasta lužnjaka, pa je to prilika za buduća istraživanja.

Validacija TROPOSIF produkata pokazala je da SIF743 ima točnost od oko 40 % (Du i sur., 2023), a u produktu postoji i sloj koji procjenjuje tu grešku (SIF743_err) koji se može koristiti za bolju procjenu T u daljnjim istraživanjima.

Maksimumi prosječnih vrijednosti SIF zabilježeni su oko četiri tjedna ranije u 2019. i tri tjedna ranije u 2020. u odnosu na maksimum dnevnog protoka ksilemskog soka.

Prednost korištenja TROPOSIF SIF743 je što je ima manju osjetljivost na naoblaku nego npr. Sentinel-2, a pokazao se kao dobar prediktor T hrasta lužnjaka u spačvanskoj šumi. Rezultate modela za objašnjavanje dinamike T hrasta lužnjaka bi trebalo testirati na više ploha koje uključuju različite udjele tipova staništa i okolišne čimbenike. Također bi

mjerenje SIF krošnje (npr. putem tornja) poboljšalo analizu tako da se podaci mjereni direktno na krošnji mogu usporediti i validirati s podacima satelitskih snimki. Za razliku od senzora u troposferi, na vrijednosti s tornja nije potrebno primijeniti složene atmosferske korekcije i signal SIF nije toliko raspršen (jer je manji put od senzora do krošnje).

Prostorna rezolucija TROPOSIF produkata je mala, a pikseli su često heterogeni (više različitih staništa). Du i sur. (2023) koristili su Sentinel-2 indeks NIRv za ublažavanje utjecaja piksela s izmiješanim signalom. Buduće generacije misija koje će snimati SIF iz svemira uključuju FLEX (Fluorescence Explorer, ESA Space Operations Centre Darmstadt), a predviđeni početak lansiranja je 2026. Planirano je da satelit leti u tandemu sa Sentinel-3 satelitom te da prati njegovu prostornu rezoluciju od 300 m (Drusch i sur., 2017). Ovakva rezolucija smanjit će izmiješanost signala u pikselu, pa bi ga se moglo primijeniti i na spačvanskoj šumi u budućim praćenjima.

5.2.4. Vegetacijski indeksi

SELI

Indeks SELI najbolje je opisivao trenutni protok ksilemskog soka na plohama u 2019. Modeli SELI kao funkcije dnevne T hrasta lužnjaka bili su nešto manje uspješni, no još uvijek dovoljno dobri za procjenu dnevne T. Modeli u 2020. su vjerojatno bili slabiji zbog pada kvalitete mjerenja protoka na uređaju u toj godini.

Ovaj indeks izrađen je kao neizravna mjera za procjenu gustoće krošnje (LAI), a LAI se pak koristio kao neizravna mjera za transpiraciju sastojine (Zhang i sur., 2018). U miješanoj šumi umjerenog pojasa, LAI je bio glavni čimbenik koji je objašnjavao sezonsku dinamiku ET i odražavao varijacije temperature zraka i globalne radijacije (Wang i sur., 2022). Uz LAI, temperaturu i neto zračenje, na godišnjoj razini su još i indeks aridnosti, voda u tlu i deficit zasićenosti zraka regulirali učinkovitost korištenja vode (Xie i sur., 2016). Kod LAI vrijednosti većih od 2, dolazilo je do saturacije u crvenom kanalu što se odrazilo na NDVI koji koristi kanal B4 (crveni kanal) i koji je posljedično manje osjetljiv na promjene u LAI (Pasqualotto i sur., 2019). Za razliku od NDVI, SELI je koristio Sentinel-2 kanale B5 i B8A. Kanal B5 je označavao početak

vegetacijskog rubno crvenog spektra od 705 nm koji uravnotežuje utjecaj jake apsorpcije klorofila u tom dijelu spektra i minimalnog raspršenja za umjerene do visoke vrijednosti LAI (Pasqualotto i sur., 2019). Kod visokih vrijednosti LAI, SELI je značajno podcjenjivao LAI (Mourad i sur., 2020). Zato bi bilo dobro provjeriti i druge opcije računanja LAI, s normaliziranim satelitskim podacima da se eliminira pristranost varijabilnosti senzora, širine kanala i primijenjenih atmosferskih korekcija.

Maksimum SELI indeksa najčešće se preklapao s maksimumima protoka ksilemskog soka, osim u 2020. na plohama koje su se nalazile na gredama kad je maksimum SELI bio oko 3 tjedna ranije. Ipak, ovaj indeks može se koristiti za procjenu datuma kada je nastupio maksimum protoka u spačvanskoj šumi, pa prema tome i perioda prije i poslije njega (period I i period II, primijenjeno na MODIS i TROPOSIF podacima).

Sentinel-2 ima dobru prostornu rezoluciju (od 10 m do 60 m) i vremensku (svakih 5 dana), a SELI je jednostavan indeks. Nedostatak ovih snimki je što u dane kada je visoka naoblaka vrijednosti kanala se ne mogu koristiti. Period u kojem biljka razvija listove i dolazi do najveće transpiracije često se preklapa s periodima najviše naoblake (jer se evaporacijom i transpiracijom vodena para vraća u atmosferu), pa su snimke optičkih senzora, kao Sentinel-2, manje korisne u periodima veće naoblake.

MSI

Sentinel-2 indeks MSI nije dobro opisivao varijacije u T hrasta lužnjaka. Ovaj indeks koristio je kanale B11 i B12 za izračun, a oni su utjecani građom lista (npr. lignin, celuloza i voda) (Pasqualotto i sur., 2019). Tako je kanal B11 imao odaziv u 1610 nm, a kanal B12 u 2190 nm, što je utjecalo na svojstva raspršivanja u NIR i SWIR, i bio manje povezan s LAI koji se temelji na fotosintetskim procesima. Isti autori navode da modeli koji su koristili ove kanale mogu poboljšati dohvaćanje LAI kod zdrave vegetacije, ali su manje pouzdani na područjima s različitom strukturom vrsta ili stresnim uvjetima.

NIRv

NIRv je postigao svoj sezonski maksimum na većini ploha ranije od ostalih indeksa u 2019. i preklapao se s danom vegetacijskog maksimuma dnevne T u 2019. na plohama 2 i 6. U svom radu, Dechant i sur. (2022) su uočili raniji maksimum SIF/NIRv u vegetacijskoj sezoni za kultivirana i travnjačka staništa. Prema istraživanjima Badgley i

sur. (2017)(Badgley i sur., 2017), NIRv je bio jako pozitivno koreliran sa SIF, a predstavljao je proporciju refleksije vegetacije u pikselu i eliminirao problem miješanog piksela. NIRv se računao kao produkt NDVI koji se koristi za procjenu pokrivenosti vegetacijom i kanalom u NIR spektru koji procjenjuje FAPAR. No pošto su oba faktora u izračunu NIRv procjenjivala fAPAR, Camps-Valls i sur. (2021) su upozorili na pitanje kako to utječe na interpretaciju ovog indeksa i koje sve informacije koristi iz spektralnih kanala.

Suncem inducirana fluorescencija iznad različitih poljoprivrednih kultura pokazala je brži odgovor na stres kroz varijacije vrijednosti u usporedbi sa strukturalnim varijablama kao što je npr. NIRv. Ipak, NIRv je bilo lakše izračunati te je bio robusniji procjenitelj SIF-a u daleko-crvenom spektru (Dechant i sur., 2022).

U svom radu Zhang. i sur. (2022) su potvrdili da su NIRv i SIF bolji procjenitelji fenoloških faza u odnosu na NDVI i EVI, pogotovo NIRv u širokolisnim šumama. NIRv se uspješno koristio i za višegodišnje procjene GPP (Dechant i sur., 2022; Mengistu i sur., 2021; Zhang i sur., 2022). U SIF podacima nerijetko nastaje šum zbog nestabilnosti signala, dok NIRv imao stabilniju kvalitetu podataka, vjerojatno zbog vremenske agregacije (Dechant i sur., 2022). Nedostatak NIRv jer što je osjetljiv na naoblaku, pa u vrijeme kad je ona visoka, ne postoje podaci za neko područje, dok dohvaćanje SIF-a (npr. snimke TROPOSIF, OCO-2, GOME) nije pod tim utjecajem. NIRv daje podatke o strukturi vegetacije, a SIF dodatno i za fiziološke procese (fotosinteza).

Veći NIRv se očekivao na vegetaciji koja je imala visoke stope asimilacije ugljika npr. u poljoprivrednim kulturama (Badgley i sur., 2017). Za razliku od poljoprivrednih kultura, šume imaju kompleksan oblik krošnje s grupiranim i zasjenjenim listovima. Biljke optimiziraju svoju krošnju tako da može najviše iskoristiti fotosintetski kapacitet i to je direktno korelirano s gornjim listovima u krošnji koje biljka raspoređi tako da dobivaju veću proporciju direktnih zraka solarne radijacije.

5.3. Hijerarhija okolišnih čimbenika koji su utjecali na transpiraciju

U periodu nakon sezonskog maksimuma dnevnog protoka, različiti čimbenici objašnjavali su 70-80 % varijacije protoka ksilemskog soka mjerenog svakih 30 minuta, najčešće su to bili relativna vlažnost zraka (ili povezani deficit zasićenosti zraka) i temperatura zraka. U ovim modelima, temperatura zraka bila je sustavno manje važan okolišni čimbenik, iako su postojale razlike između godina i plohi. Razlike u važnosti čimbenika među godinama mogu se objasniti različitim meteorološkim uvjetima, primjerice, 2020. godina imala je manje oborina u vegetacijskoj sezoni u usporedbi s 2019. godinom, a više osunčanih dana u travnju i svibnju.

Okolišni čimbenici koji su najbolje objašnjavali dinamiku dnevne T u vegetacijskoj sezoni uključivali su temperaturu tla na 90 cm dubine i temperaturu zraka za nize (plohe 2 i 3), a broj osunčanih sati i temperaturu tla na 30 cm dubine za grede (plohe 6 i 7) (Poglavlje 4.4.2.1). U periodu II došlo je do obrata važnosti čimbenika kad je temperatura zraka postala važniji (ponekad i najvažniji) okolišni čimbenik od temperature tla. Važnost broja osunčanih sati na gredama ostala je jednaka u odnosu na period I. U 2020. su modeli varirali po uspješnosti, što bi se moglo objasniti padom kvalitete mjerenja protoka na uređaju.

Poboljšanje modela korištenjem različitih dubina nije značajno mijenjalo njihovu uspješnost, no svejedno su određene dubine bolje opisivale varijacije u T . Na nizama je temperatura u donjem sloju tla na dubini od 90 cm bila značajniji čimbenik, dok je u gredama to bila temperatura tla u gornjem sloju tla, do 30 cm dubine.

Temperatura zraka pozitivno utječe na transpiraciju jer viša temperatura utječe na veću kinetičku energiju i dolazi do veće evaporacije s površine lista. Jačina vjetra također utječe pozitivno na transpiraciju jer održava gradijent vodnog potencijala, no u mojim rezultatima nije se izdvojila kao bitan čimbenik. Jačina vjetra u obje vegetacijske sezone bila je tijekom dana većinom vrlo slaba u jutarnjim i večernjim satima do slaba u popodnevnim satima. Iako jačina vjetra u apsolutnim vrijednostima nije bila velika, relativno povećanje snage vjetra u popodnevnim satima moglo bi objasniti i sate dnevnih maksimuma T koji su najčešće zabilježeni između 11 i 16 h.

Intenzitet svjetla pozitivno utječe na transpiraciju jer su puči više otvorene što omogućava veću površinu za evaporaciju s lista. Intenzitet svjetla povezan je s brojem osunčanih sati u danu (kada nema zasjene), a izraženiji utjecaj je imao na gredama. Broj osunčanih sati bio je najvažniji okolišni čimbenik za dnevnu T hrasta lužnjaka u oba perioda na plohi 6 koja je imala najstarija stabla i najveće temeljnice.

Oborine se nisu izdvojile kao važan čimbenik u modelima za 30-minutne i dnevne protoke, niti je objašnjavala sezonsku varijaciju T. Ovo je moguće zbog toga što hrast lužnjak manje ovisi o vodi u gornjim dijelovima tla, a više o vlazi na dubljim dijelovima ili u podzemnim vodama, pa je i veća njegova otpornost na sušu, kao što su pokazali Thomsen i sur. (2020) za hrast lužnjak i Poyatos i sur. (2005) za medunac. U svom radu, Barbeta i Penuelas (2017) pokazali su da su se drvenaste vrste snažno oslanjale (25-85 %) na unos vode iz podzemnih voda u sušnim sezonama i nešto manje u kišnim sezonama (10-45 %). Sanchez-Perez i sur. (2008) zaključili su da je u poplavnim šumama hrasta lužnjaka, običnog jasena i bijele topole u Francuskoj gustoća korijena lužnjaka bila najveća na dubinama od 20 do 60 cm od tla tj. u zoni vodom nezasićenog tla i višoj od dosega podzemnih voda. Struktura korijena i prema tome distribucija unosa vode bila je prilagodba hrasta u poplavnoj šumi na povišena područja za razliku od nižih dijelova gdje je razina podzemnih voda bliža površini tla. Mlada stabla hrasta lužnjaka pokazala su najraniji i najjači odgovor na sušu - smanjivanje promjera, smanjenje količine vode u listu i ranije pojavljivanje izrazito negativnog vodnog potencijala (Fruechtenicht i sur., 2018). Cui i sur. su (2024) predložili korištenje NDWI indeksa za procjenu dostupnosti vode u zoni korijena drvenastih i grmovitih vrsta za vrijeme suhih sezona i suša. Njega je moguće dobiti i preko MODIS i Sentinel-2 snimaka, pa je preporuka da se u budućim istraživanjima koristi ovaj indeks.

5.4. Debljinski prirast i vlaga u tlu

Vlažnost tla na različitim dubinama nije objašnjavala varijacije debljinskog prirasta hrasta lužnjaka. Ježik i sur. (2016) potvrdili su da je smanjenje vodnog potencijala tijekom suše značajno utjecalo na povećanje debljinskog prirasta u mlađim stablima bukve. U istom istraživanju temperatura zraka bila je najbitniji okolišni čimbenik za povećanje debljinskog prirasta u početku sezone i tijekom ljeta kada je bilo dovoljno vode u tlu. S

druge strane, Raffelsbauer i sur. (2019) su proučavali promjene opsega stabala u sušnim uvjetima u kišnim šumama i utvrdili da se duljina odgovora (povratak opsega na vrijednosti prije suše) mijenjala s obzirom na vrstu. Učestalost mjerenja vlažnosti tla i debljinskog prirasta na 10 ploha u ovom radu bila je manja od jednom mjesečno, a u tom periodu teško je primijetiti promjene u debljinskom prirastu. Dodatno, podaci prikupljeni za vlažnost tla u 2019. zbog greške u mjerenju nisu bili upotrebljivi, pa je dodatno smanjen skup podataka koje sam analizirala. Nisam koristila podatke na četiri plohe na kojima se mjerio protok ksilemskog soka, ali i opseg te vlažnost tla, svakih 30 minuta. Ovi podaci dali bi detaljniji prikaz promjena na puno manjim vremenskim skalama. U budućim istraživanjima bilo bi dobro definirati periode suše, tj. odrediti broj dana bez oborina koji utječu na odgovor stresa u stablima hrasta lužnjaka. Pošto je hrast lužnjak freatofit, tj. prilagođen je na crpljenje vode iz podzemnih voda, pretpostavljam da bi periodi bez oborina koji utječu na odgovor na stres kod hrasta lužnjaka bili dulji nego za vrste koje nemaju takvu prilagodbu. Odgovori na stres zbog suše, osim promjene debljinskog prirasta, reflektiraju se na stopi transpiracije. U budućim istraživanjima trebalo bi dodatno kvantificirati promjene transpiracije pod utjecajem okolišnih čimbenika. Za procjenu vlažnosti tla moguće je koristiti Sentinel-1 snimke, ali trebalo bi napraviti i validaciju s terenskim podacima na različitim dubinama tla.

6. ZAKLJUČAK

1. Prema ovim rezultatima, evapotranspiracija dobivena iz produkta MOD16A2GF i transpiracija hrasta lužnjaka bili su čvrsto vezani u vegetacijskoj sezoni i bilo je moguće koristiti MOD16A2GF produkt za praćenje dinamike transpiracije hrasta lužnjaka u spačvanskoj šumi u periodu I, tj. do sezonskog maksimuma dnevne transpiracije hrasta lužnjaka, a nakon toga je uspješnost modela smanjena. Postoje naznake da u periodu II MOD16A2GF evapotranspiracija može bolje objasniti transpiraciju hrasta lužnjaka na gredama nego na nizama, ali za to je potreban veći skup podataka za više godina.
2. Suncem inducirana fluorescencija i transpiracija bile su čvrsto vezane u vegetacijskoj sezoni na plohi u kojoj je u gornjem sloju krošnje dominirao hrast lužnjak, dok je na plohama, u kojima je postojao miješani signal zbog različitih udjela ostale vegetacije, postojala korelacija umjerene jačine. Korigirana vrijednost (s obzirom na duljinu dana) Suncem inducirane fluorescencije u kanalu 743 nm TROPOSIF produkta najbolje je opisivala varijaciju dinamike dnevne transpiracije hrasta lužnjaka. Prednost korištenja TROPOSIF korigiranog SIF743 je što je manje osjetljiv na periode s naoblakom i što postoje podaci skoro za svaki dan, dok je nedostatak manja prostorna rezolucija gdje dolazi do miješanja signala različitih tipova zemljišnog pokrova.
3. Indeks SELI izveden iz Sentinel-2 snimki najbolje je u usporedbi s ostalim indeksima opisivao varijaciju dinamike trenutnog protoka ksilemskog soka, ali i dnevne transpiracije hrasta lužnjaka u vegetacijskoj sezoni. SELI se pokazao i kao dobar procjenitelj perioda kad je zabilježen vegetacijski maksimum dnevne transpiracije hrasta lužnjaka. Ovo se može primijeniti za određivanje perioda prije i poslije vegetacijskog maksimuma dnevne transpiracije u kojima su modeli sa TROPOSIF SIF i MOD16A2GF ET bili uspješni za procjenu dinamike sezonske transpiracije hrasta lužnjaka.
4. Protok ksilemskog soka na razini 30 minuta nije bio istovremeno i protok transpiracije, koja se pak iskazivala na dnevnoj razini. Najvažniji okolišni čimbenici koji su utjecali na dnevnu transpiraciju do njenog maksimuma u sezoni u nizama bili su temperatura u dubljim slojevima tla i temperatura zraka, dok su

na gredama to bili broj osunčanih sati i temperatura u gornjem sloju tla. Nakon sezonskog maksimuma dnevne transpiracije, najvažniji čimbenik bila je temperatura zraka u nizama i u gredama, s dodatnim čimbenikom broja osunčanih sati na gredi u starijoj sastojini hrasta lužnjaka.

5. Vlažnost tla na različitim dubinama na 10 ploha nije objašnjavala varijacije debljinskog prirasta hrasta lužnjaka, no nisam analizirala dovoljno veliki skup podataka. Prijedlog za buduća istraživanja je da se analiziraju podaci mjerenja povećanja opsega hrasta lužnjaka i vlažnosti tla na četiri plohe na kojima je mjeren protok ksilemskog soka.

7. LITERATURA

- Alarcón, J.J., Domingo, R., Green, S., Sánchez-Blanco, M.J., Rodríguez Hernández, P., Torrecillas, A., 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant and Soil* 227, 77–85. <https://doi.org/10.1023/A:1026520111166>
- Allan, R., Pereira, L., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Almalki, R., Khaki, M., Saco, P.M., Rodriguez, J.F., 2022. Monitoring and Mapping Vegetation Cover Changes in Arid and Semi-Arid Areas Using Remote Sensing Technology: A Review. *Remote Sensing* 14, 5143. <https://doi.org/10.3390/rs14205143>
- Amani, B., Olfa, B., Raoul, L., Mohamed, B., 2013. Compariston between sap flow measurements and two prediction climate formulas to estimate transpiration in olive orchards (*Olea europea* L . Cv. Chemlali). *European Scientific Journal* 9.
- Badgley, G., Field, C.B., Berry, J.A., 2017. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances* 3, e1602244. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602244>
- Balenović, I., Simic Milas, A., Marjanović, H., 2017. A Comparison of Stand-Level Volume Estimates from Image-Based Canopy Height Models of Different Spatial Resolutions. *Remote Sensing* 9, 205. <https://doi.org/10.3390/rs9030205>
- Barbeta, A., Penuelas, J., 2017. Relative contribution of groundwater to plant transpiration estimated with stable isotopes. *Scientific Reports* 7, 10580. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09643-x>
- Battude, M., Al Bitar, A., Morin, D., Cros, J., Huc, M., Sicre, C.M., Le Dantec, V., Demarez, V., 2016. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 184, 668–681. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.030>
- Bequet, R., Cermak, J., Nadezhdina, N., De Canniere, C., Ceulemans, R., 2010. Tree water dynamics non-destructively assessed through sap flow measurements and potential evapotranspiration. *Biologia Plantarum* 54, 366–368. <https://doi.org/10.1007/s10535-010-0065-4>
- Bernacchi, C.J., VanLoocke, A., 2015. Terrestrial Ecosystems in a Changing Environment: A Dominant Role for Water, in: Merchant, S.S. (Ed.), *Annual Review of Plant Biology*. Annual Reviews, Palo Alto, pp. 599–622. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114834>
- Bittencourt, P., Rowland, L., Sitch, S., Poyatos, R., Miralles, D.G.G., Mencuccini, M., 2023. Bridging Scales: An Approach to Evaluate the Temporal Patterns of Global Transpiration Products Using Tree-Scale Sap Flow Data. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 128, e2022JG007308. <https://doi.org/10.1029/2022JG007308>

- Buchanan, B.B., Gruissem, W., Jones, R.L., 2015. *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. John Wiley & Sons.
- Cai, Z., Eklundh, L., Van Hoolst, R., Bonte, K., De Roo, B., Jonsson, P., 2023. HR-VPP ATBD Seasonal Trajectories and VPP parameters, Issue 1.1.
- Camps-Valls, G., Campos-Taberner, M., Moreno-Martínez, Á., Walther, S., Duveiller, G., Cescatti, A., Mahecha, M.D., Muñoz-Marí, J., García-Haro, F.J., Guanter, L., Jung, M., Gamon, J.A., Reichstein, M., Running, S.W., 2021. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere. *Science Advances* 7, eabc7447. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc7447>
- Cao, L., Bala, G., Caldeira, K., Nemani, R., Ban-Weiss, G., 2010. Importance of carbon dioxide physiological forcing to future climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 9513–9518. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913000107>
- Čavlović, J., Bončina, A., 2010. Prva nacionalna inventura šuma Republike Hrvatske. Ministarstvo regionalnog razvoja šumarstva i vodnog gospodarstva.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Grégoire, J.-M., 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment* 77, 22–33. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00191-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00191-2)
- Cendrero-Mateo, M.P., Carmo-Silva, A.E., Porcar-Castell, A., Hamerlynck, E.P., Papuga, S.A., Moran, M.S., 2015. Dynamic response of plant chlorophyll fluorescence to light, water and nutrient availability. *Functional Plant Biology* 42, 746–757. <https://doi.org/10.1071/FP15002>
- Čermák, J., Kucera, J., Bauerle, W.L., Phillips, N., Hinckley, T.M., 2007. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology* 27, 181–198. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.2.181>
- Čermák, J., Kučera, J., Nadezhdina, N., 2004. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees* 18, 529–546. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0339-6>
- Čermák, J., Úlehla, J., Kučera, J., Penka, M., 1982. Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robur* L.) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. *Biologia Plantarum* 24, 446–460. <https://doi.org/10.1007/BF02880444>
- Cestarić, D., Škvorc, Ž., Franjić, J., Sever, K., Krstonošić, D., 2017. Forest plant community changes in the Spačva lowland area (E Croatia). *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 151, 584–597. <https://doi.org/10.1080/11263504.2016.1179699>
- Cienciala, E., Kučera, J., Malmer, A., 2000. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *Journal of Hydrology* 236, 109–120. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00291-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00291-2)
- Cohen, I.B., 1976. Stephen Hales. *Scientific American* 234, 98–107.

- Cowan, I.R., 1978. Stomatal Behaviour and Environment, in: Preston, R.D., Woolhouse, H.W. (Eds.), *Advances in Botanical Research*. Academic Press, pp. 117–228. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(08\)60370-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(08)60370-5)
- Cramer, M.D., Hawkins, H.-J., Verboom, G.A., 2009. The importance of nutritional regulation of plant water flux. *Oecologia* 161, 15–24. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1364-3>
- Cui, G., Guo, W., Goulden, M., Bales, R., 2024. MODIS-based modeling of evapotranspiration from woody vegetation supported by root-zone water storage. *Remote Sensing of Environment* 303, 114000. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114000>
- Damm, A., Guanter, L., Paul-Limoges, E., van der Tol, C., Hueni, A., Buchmann, N., Eugster, W., Ammann, C., Schaepman, M.E., 2015. Far-red sun-induced chlorophyll fluorescence shows ecosystem-specific relationships to gross primary production: An assessment based on observational and modeling approaches. *Remote Sensing of Environment* 166, 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.004>
- Damm, A., Haghghi, E., Paul-Limoges, E., van der Tol, C., 2021. On the seasonal relation of sun-induced chlorophyll fluorescence and transpiration in a temperate mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 304–305, 108386. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108386>
- Dechant, B., Ryu, Y., Badgley, G., Köhler, P., Rascher, U., Migliavacca, M., Zhang, Y., Tagliabue, G., Guan, K., Rossini, M., Goulas, Y., Zeng, Y., Frankenberg, C., Berry, J.A., 2022. NIRVP: A robust structural proxy for sun-induced chlorophyll fluorescence and photosynthesis across scales. *Remote Sensing of Environment* 268, 112763. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112763>
- Doughty, R., Kurosu, T.P., Parazoo, N., Köhler, P., Wang, Y., Sun, Y., Frankenberg, C., 2022. Global GOSAT, OCO-2, and OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence datasets. *Earth System Science Data* 14, 1513–1529. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1513-2022>
- Drusch, M., Moreno, J., Del Bello, U., Franco, R., Goulas, Y., Huth, A., Kraft, S., Middleton, E.M., Miglietta, F., Mohammed, G., Nedbal, L., Rascher, U., Schüttemeyer, D., Verhoef, W., 2017. The FLuorescence EXplorer Mission Concept—ESA’s Earth Explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 55, 1273–1284. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2621820>
- Du, S., Liu, X., Chen, J., Duan, W., Liu, L., 2023. Addressing validation challenges for TROPOMI solar-induced chlorophyll fluorescence products using tower-based measurements and an NIRv-scaled approach. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* 290, 113547. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113547>
- Dubravac, T., Dekanić, S., 2009. Structure and Dynamics of the Harvest of Dead and Declining Trees of Pedunculate Oak in the Stands of Spačva Forest from 1996 to 2006. *Šumarski list* 133, 391–405.
- Dubravac, T., Gradečki-Poštenjak, M., Indir, K., Krajter Ostoić, S., Licht, R., Medak, J., Novak-Agbaba, S., Pladinić, E., Pernek, M., Pilaš, I., Vuletić, D., 2020. Povijest i značaj Posebnog rezervata šumske vegetacije „Lože“.

- Edwards, W.R.N., Becker, P., Cermak, J., 1997. A unified nomenclature for sap flow measurements. *Tree Physiology* 17, 65–67.
- Ersi, C., Bayaer, T., Bao, Yuhai, Bao, Yulong, Yong, M., Zhang, X., 2022. Temporal and Spatial Changes in Evapotranspiration and Its Potential Driving Factors in Mongolia over the Past 20 Years. *Remote Sensing* 14, 1856. <https://doi.org/10.3390/rs14081856>
- Ferraz, T.M., Netto, A.T., Reis, F.D.O., Pecanha, A.L., De Sousa, E.F., Machado Filho, J.A., Rodrigues, W.P., Glenn, D.M., Campostrini, E., 2015. Relationships between sap-flow measurements, whole-canopy transpiration and reference evapotranspiration in field-grown papaya (*Carica papaya* L.). *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 27, 251–262. <https://doi.org/10.1007/s40626-015-0049-z>
- Ffolliott, P.F., Gottfried, G.J., Cohen, Y., Schiller, G., 2003. Transpiration by dryland oaks: studies in the south-western United States and Northern Israel. *Journal of Arid Environments* 55, 595–605. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(02\)00290-2](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(02)00290-2)
- Fischer, M., Trnka, M., Kučera, J., Deckmyn, G., Orság, M., Sedlák, P., Žalud, Z., Ceulemans, R., 2013. Evapotranspiration of a high-density poplar stand in comparison with a reference grass cover in the Czech-Moravian Highlands. *Agricultural and Forest Meteorology* 181, 43–60.
- Forster, M.A., 2021. A Test of the Relationship between Sap Flow and Evapotranspiration, Normalized via Leaf Area, under Non-Limiting Soil Moisture. *Forests* 12, 875. <https://doi.org/10.3390/f12070875>
- Forster, M.A., 2017. How Reliable Are Heat Pulse Velocity Methods for Estimating Tree Transpiration? *FORESTS* 8, 350. <https://doi.org/10.3390/f8090350>
- Frear, J., 2021. Remote Sensing Tree Physiology: Comparing ECOSTRESS to sap- flux transpiration rates.
- Fruechtenicht, E., Neumann, L., Klein, N., Bonal, D., Brueggemann, W., 2018. Response of *Quercus robur* and two potential climate change winners-*Quercus pubescens* and *Quercus ilex* -To two years summer drought in a semi-controlled competition study: I-Tree water status. *Environmental and Experimental Botany* 152, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.01.002>
- Gan, R., Zhang, L., Yang, Y., Wang, E., Woodgate, W., Zhang, Y., Haverd, V., Kong, D., Fischer, T., Chiew, F., Yu, Q., 2021. Estimating ecosystem maximum light use efficiency based on the water use efficiency principle. *Environmental Research Letters* 16, 104032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac263b>
- Gao, S., Woodgate, W., Ma, X., Doody, T.M., 2024. Prediction of Open Woodland Transpiration Incorporating Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence and Vegetation Structure. *Remote Sensing* 16, 143. <https://doi.org/10.3390/rs16010143>
- Glavač, V.M., 1996. O “Analizi krvi” šumskog drveća. *Šumarski list* 9–10, 193–198.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote*

- Sensing of Environment, Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gradečki-Poštenjak, M., Novak Agbaba, S., Licht, R., Posarić, D., 2011. Dinamika plodnošenja i kvaliteta uroda sjemena hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) u narušenim ekološkim uvjetima. *Šumarski list* 135, 169–180.
- Granier, A., Biron, P., Bréda, N., Pontailler, J.-Y., Saugier, B., 1996. Transpiration of trees and forest stands: short and long-term monitoring using sapflow methods. *Global Change Biology* 2, 265–274. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00078.x>
- Granier, A., Bréda, N., 1996. Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. *Annales des Sciences Forestières* 53, 537–546. <https://doi.org/10.1051/forest:19960233>
- Guanter, L., Bacour, C., Schneider, A., Aben, I., van Kempen, T.A., Maignan, F., Retscher, C., Köhler, P., Frankenberg, C., Joiner, J., Zhang, Y., 2021. The TROPOSIF global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission. *Earth System Science Data* 13, 5423–5440. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5423-2021>
- Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* 342, 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hashimoto, A., Chiu, C.-W., Onda, Y., Tateishi, M., Tsuruta, K., Gomi, T., 2023. Satellite remote sensing model for estimating canopy transpiration in cypress plantation using in situ sap flow observations and forest inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 206, 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.11.009>
- Herbst, M., Roberts, J.M., Rosier, P.T.W., Taylor, M.E., Gowing, D.J., 2007. Edge effects and forest water use: A field study in a mixed deciduous woodland. *Forest Ecology and Management* 250, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.013>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Holm, E., Janiskova, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thepaut, J.-N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hilker, T., Hall, F.G., Coops, N.C., Collatz, J.G., Black, T.A., Tucker, C.J., Sellers, P.J., Grant, N., 2013. Remote sensing of transpiration and heat fluxes using multi-angle observations. *Remote Sensing of Environment* 137, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.023>

- Hou, M., Tian, F., Ortega-Farias, S., Riveros-Burgos, C., Zhang, T., Lin, A., 2021. Estimation of crop transpiration and its scale effect based on ground and UAV thermal infrared remote sensing images. *European Journal of Agronomy* 131. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126389>
- Hou, M., Tian, F., Zhang, T., Huang, M., 2019. Evaluation of canopy temperature depression, transpiration, and canopy greenness in relation to yield of soybean at reproductive stage based on remote sensing imagery. *Agricultural Water Management* 222, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.005>
- Hrašovec, B., Posaric, D., Lukic, I., Pernek, M., 2013. First record of oak lace bug (*Corythucha arcuata*) in Croatia. *Šumarski List* 137, 499–503.
- 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, The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): a new generation of Land Surface Monitoring* 83, 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A., Justice, C., Liu, H., 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment* 49, 224–234. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90018-3)
- Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K., van Leeuwen, W., 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 59, 440–451. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
- Hunt, E.R., Rock, B.N., 1989. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* 30, 43–54. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1)
- Hussain, S., Lu, L., Mubeen, M., Nasim, W., Karuppanan, S., Fahad, S., Tariq, A., Mousa, B.G., Mumtaz, F., Aslam, M., 2022. Spatiotemporal Variation in Land Use Land Cover in the Response to Local Climate Change Using Multispectral Remote Sensing Data. *LAND* 11, 595. <https://doi.org/10.3390/land11050595>
- Jacobs, T., Smets, B., Daems, D., De Roo, B., 2021. HR-VPP User Manual - Data Access on WEKEO, issue 1.0.
- Ježík, M., Blaženec, M., Kučera, J., Strelcová, K., Ditmarová, L., 2016. The response of intra-annual stem circumference increase of young European beech provenances to 2012-2014 weather variability. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 9, 960. <https://doi.org/10.3832/ifor1829-009>
- Jin, H., Eklundh, L., 2014. A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sensing of Environment* 152, 512–525. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.010>
- Jin, J., Cai, Y., Guo, X., Wang, L., Wang, Y., Liu, Y., 2023. Decoupled driving forces of variabilities of transpiration in Chinese subtropical vegetation based on remote sensing data. *Journal of Geographical Sciences* 33, 2159–2174. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2170-2>
- Karkauskaite, P., Tagesson, T., Fensholt, R., 2017. Evaluation of the Plant Phenology Index (PPI), NDVI and EVI for Start-of-Season Trend Analysis of the Northern

Hemisphere Boreal Zone. Remote Sensing 9, 485.
<https://doi.org/10.3390/rs9050485>

- Ke, Y., Im, J., Park, S., Gong, H., 2017. Spatiotemporal downscaling approaches for monitoring 8-day 30 m actual evapotranspiration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 126, 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.02.006>
- Keenan, T.F., Luo, X., Stocker, B.D., De Kauwe, M.G., Medlyn, B.E., Prentice, I.C., Smith, N.G., Terrer, C., Wang, H., Zhang, Y., Zhou, S., 2023. A constraint on historic growth in global photosynthesis due to rising CO₂. *Nature Climate Change* 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01867-2>
- Kern, A., Marjanović, H., Csóka, G., Mórnicz, N., Pernek, M., Hirka, A., Matošević, D., Paulin, M., Kovač, G., 2021. Detecting the oak lace bug infestation in oak forests using MODIS and meteorological data. *Agricultural and Forest Meteorology* 306, 108436. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108436>
- Knight, D.H., Fahey, T.J., Running, S.W., Harrison, A.T., Wallace, L.L., 1981. Transpiration From 100-yr-old Lodgepole Pine Forests Estimated with Whole-Tree Potometers. *Ecology* 62, 717–726. <https://doi.org/10.2307/1937740>
- Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J.L., Sauer, T.J., Ben-Gal, A., 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology* 184, 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.003>
- Krich, C., Mahecha, M.D., Migliavacca, M., De Kauwe, M.G., Griebel, A., Runge, J., Miralles, D.G., 2022. Decoupling between ecosystem photosynthesis and transpiration: a last resort against overheating. *Environmental Research Letters* 17, 044013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac583e>
- Kučera, J., 2023. Analysis of canopy transpiration based on the sap flow measurement (Disertacija). Technical University in Zvolen, Faculty of Forestry, Zvolen.
- Kučera, J., Brito, P., Soledad-Jimenez, M., Urban, J., 2017. Direct Penman–Monteith parameterization for estimating stomatal conductance and modeling sap flow | *Trees*. *Trees* 31, 873–885. <https://doi.org/DOI 10.1007/s00468-016-1513-3>
- Kučera, J., Urban, J., 2012. History of the development of the trunk heat balance method in last forty years. *Acta Horticulturae* 87–94. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.951.9>
- Kušan, V. (Ed.), 2019. Monitoring šumskih ekosustava višenamjenskog kanala Dunav-Sava za razdoblje 2018. – 2019.
- Lambers, H., Chapin, F.S., Pons, T.L., 2008. *Plant Physiological Ecology*. Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>
- Lazarević, B., Poljak, M., 2019. *Fiziologija bilja*. Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet.
- Leung, J., Bazihizina, N., Mancuso, S., Valon, C., 2016. Revisiting the Plant’s Dilemma. *Molecular Plant* 9, 7–9. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.07.007>
- Li, H., Luo, Y., Zhao, C., Yang, G., 2013. Remote sensing of regional crop transpiration of winter wheat based on MODIS data and FAO-56 crop coefficient method.

- Intelligent automation and soft computing 19, 285–294.
<https://doi.org/10.1080/10798587.2013.824150>
- Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2, 18–22.
- Lin, H., Chen, Y., Zhang, H., Fu, P., Fan, Z., 2017. Stronger cooling effects of transpiration and leaf physical traits of plants from a hot dry habitat than from a hot wet habitat. *Functional Ecology* 31, 2202–2211. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12923>
- Liu, Y., Ding, F., Shu, D., Zhao, W., Chui, Y., Hou, Y., Wu, P., 2020. Dominance-caused differences in transpiration of trees in a Karst broadleaved mixed forest. *Journal of Forestry Research* 31, 2083–2095. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01037-1>
- Liu, Z., Liu, Q., Wei, Z., Yu, X., Jia, G., Jiang, J., 2021. Partitioning tree water usage into storage and transpiration in a mixed forest. *Forest Ecosystems* 8, 72. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00353-5>
- Loritz, R., Wu, C.H., Klotz, D., Gauch, M., Kratzert, F., Bassiouni, M., 2024. Generalizing Tree-Level Sap Flow Across the European Continent. *Geophysical Research Letters* 51, e2023GL107350. <https://doi.org/10.1029/2023GL107350>
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., Moran, E., 2016. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth* 9, 63–105. <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.990526>
- Lu, Xinchun, Cheng, X., Li, X., Tang, J., 2018. Opportunities and challenges of applications of satellite-derived sun-induced fluorescence at relatively high spatial resolution. *Science of The Total Environment* 619–620, 649–653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.158>
- Lu, Xiaoliang, Liu, Z., Zhou, Y., Liu, Y., Tang, J., 2018. Performance of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in Estimating Water-Use Efficiency in a Temperate Forest. *Remote Sensing* 10, 796. <https://doi.org/10.3390/rs10050796>
- Luus, K.A., Commane, R., Parazoo, N.C., Benmergui, J., Euskirchen, E.S., Frankenberg, C., Joiner, J., Lindaas, J., Miller, C.E., Oechel, W.C., Zona, D., Wofsy, S., Lin, J.C., 2017. Tundra photosynthesis captured by satellite-observed solar-induced chlorophyll fluorescence. *Geophysical Research Letters* 44, 1564–1573. <https://doi.org/10.1002/2016GL070842>
- Maes, W.H., Pagan, B.R., Martens, B., Gentine, P., Guanter, L., Steppe, K., Verhoest, N.E.C., Dorigo, W., Li, X., Xiao, J., Miralles, D.G., 2020. Sun-induced fluorescence closely linked to ecosystem transpiration as evidenced by satellite data and radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment* 249, 112030. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112030>
- Marshall, M., Thenkabail, P., Biggs, T., Post, K., 2016. Hyperspectral narrowband and multispectral broadband indices for remote sensing of crop evapotranspiration and its components (transpiration and soil evaporation). *Agricultural and Forest Meteorology* 218, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.025>

- Martin, T.A., Brown, K.J., Cermák, J., Ceulemans, R., Kucera, J., Meinzer, F.C., Rombold, J.S., Sprugel, D.G., Hinckley, T.M., 1997. Crown conductance and tree and stand transpiration in a second-growth *Abies amabilis* forest. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 797–808. <https://doi.org/10.1139/x97-006>
- Martini, D., 2022. Deciphering the factors relating sun-induced fluorescence to photosynthesis and transpiration in space and time (PhD). University of Twente, Enschede, The Netherlands. <https://doi.org/10.3990/1.9789036554145>
- Meerts, P., 2002. Mineral nutrient concentrations in sapwood and heartwood: a literature review. *Annals of Forest Science* 59, 713–722. <https://doi.org/10.1051/forest:2002059>
- Mengistu, A.G., Mengistu Tsidu, G., Koren, G., Kooreman, M.L., Boersma, K.F., Tagesson, T., Ardö, J., Nouvellon, Y., Peters, W., 2021. Sun-induced fluorescence and near-infrared reflectance of vegetation track the seasonal dynamics of gross primary production over Africa. *Biogeosciences*. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2843-2021>
- Miller, P., Gates, D., 1967. Transpiration resistance of plants. *The American Midland Naturalist* 77, 77–85.
- Mini32 Software, EMS Brno, 2022.
- Mitchell, A.L., Rosenqvist, A., Mora, B., 2017. Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD+. *Carbon Balance and Management* 12, 9. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0078-9>
- Mohammed, G.H., Colombo, R., Middleton, E.M., Rascher, U., van der Tol, C., Nedbal, L., Goulas, Y., Pérez-Priego, O., Damm, A., Meroni, M., Joiner, J., Cogliati, S., Verhoef, W., Malenovský, Z., Gastellu-Etcheberry, J.-P., Miller, J.R., Guanter, L., Moreno, J., Moya, I., Berry, J.A., Frankenberg, C., Zarco-Tejada, P.J., 2019. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote Sensing of Environment* 231, 111177. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.030>
- Morales, A., López-Bernal, Á., Testi, L., Villalobos, F.J., 2021. Transpiration and photosynthesis of holm oak trees in southern Spain. *Trees, Forests and People* 5, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100115>
- Mourad, R., Jaafar, H., Anderson, M., Gao, F., 2020. Assessment of Leaf Area Index Models Using Harmonized Landsat and Sentinel-2 Surface Reflectance Data over a Semi-Arid Irrigated Landscape. *REMOTE SENSING* 12, 3121. <https://doi.org/10.3390/rs12193121>
- Mu, Q., Zhao, M., Running W., S., 2013. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3). Algorithm Theoretical Basis Document. Collection 5.
- Nagai, S., Nasahara, K.N., Muraoka, H., Akiyama, T., Tsuchida, S., 2010. Field experiments to test the use of the normalized-difference vegetation index for phenology detection. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.09.010>

- Nalevanková, P., Sitková, Z., Kučera, J., Štřelcová, K., 2020. Impact of Water Deficit on Seasonal and Diurnal Dynamics of European Beech Transpiration and Time-Lag Effect between Stand Transpiration and Environmental Drivers. *Water* 12, 3437. <https://doi.org/10.3390/w12123437>
- Nemeš, T., Dekanić, S., 2013. Groundwater regime of Biđ-Bosut forest area. *Radovi* 45, 145–159.
- Nikolić, N., Pilipović, A., Drekić, M., Kojić, D., Poljaković-Pajnik, L., Orlović, S., Arsenov, D., 2019. Physiological responses of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) to *Corythucha arcuata* (Say, 1832) attack. *Archives of Biological Sciences* 71, 167–176. <https://doi.org/10.2298/ABS180927058N>
- NOVELTIS, UPV, SRON, LSCE, 2021. The TROPOSIF global sun-induced fluorescence dataset from the TROPOMI mission. https://doi.org/10.5270/esa-s5p_innovation-sif-20180501_20210320-v2.1-202104
- Oki, T., Kanae, S., 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science* 313, 1068–1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- Ortega Adarme, M., Doblaz Prieto, J., Queiroz Feitosa, R., De Almeida, C.A., 2022. Improving Deforestation Detection on Tropical Rainforests Using Sentinel-1 Data and Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing* 14, 3290. <https://doi.org/10.3390/rs14143290>
- Özçelik, M., 2017. Daily transpiration of a single sessile oak measured by the tissue heat balance method. *European Water* 59.
- Pallardy, S.G., 2008. CHAPTER 2 - The Woody Plant Body, in: Pallardy, S.G. (Ed.), *Physiology of Woody Plants (Third Edition)*. Academic Press, San Diego, pp. 9–38. <https://doi.org/10.1016/B978-012088765-1.50003-8>
- Paloschi, R.A., Ramos, D.M., Ventura, D.J., Souza, R., Souza, E., Morellato, L.P.C., Nóbrega, R.L.B., Coutinho, Í.A.C., Verhoef, A., Körting, T.S., Borma, L.D.S., 2021. Environmental Drivers of Water Use for Caatinga Woody Plant Species: Combining Remote Sensing Phenology and Sap Flow Measurements. *Remote Sensing* 13, 75. <https://doi.org/10.3390/rs13010075>
- Parajuli, P.B., Risal, A., Ouyang, Y., Thompson, A., 2022. Comparison of SWAT and MODIS Evapotranspiration Data for Multiple Timescales. *Hydrology* 9, 103. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060103>
- Pasqualotto, N., Delegido, J., Van Wittenberghe, S., Rinaldi, M., Moreno, J., 2019. Multi-Crop Green LAI Estimation with a New Simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI). *Sensors* 19, 904. <https://doi.org/10.3390/s19040904>
- Pauwels, V.R.N., Samson, R., 2006. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland. *Agricultural Water Management* 82, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.06.001>
- Pevalek-Kozlina, B., 2000. *Fiziologija bilja*. Profil-Klett.
- Pietras, J., Stojanović, M., Knott, R., Pokorný, R., 2016. Oak sprouts grow better than seedlings under drought stress. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 9, 529. <https://doi.org/10.3832/ifor1823-009>

- Poyatos, R., Llorens, P., Gallart, F., 2005. Transpiration of montane *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. forest stands measured with sap flow sensors in NE Spain. *Hydrology and Earth System Sciences* 9, 493–505. <https://doi.org/10.5194/hess-9-493-2005>
- QGIS Development Team, 2024. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Qian, L., Zhang, Z., Wu, L., Fan, S., Yu, X., Liu, X., Ba, Y., Ma, H., Wang, Y., 2023. High uncertainty of evapotranspiration products under extreme climatic conditions. *Journal of Hydrology* 626, 130332. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130332>
- R Core Team, 2024. *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raffelsbauer, V., Spannll, S., Peña, K., Pucha-Cofrep, D., Steppe, K., Bräuning, A., 2019. Tree Circumference Changes and Species-Specific Growth Recovery After Extreme Dry Events in a Montane Rainforest in Southern Ecuador. *Frontiers in Plant Science* 10, 342. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00342>
- Raschke, K., 1976. How stomata resolve the dilemma of opposing priorities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0031>
- Retscher, C., Zehner, C., Casadio, S., Gasbarra, D., Volden, E., 2021. Sentinel-5p+ Innovation Theme 6: Solar Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF). Product User Manual.
- Ringgaard, R., Herbst, M., Friborg, T., 2012. Partitioning of forest evapotranspiration: The impact of edge effects and canopy structure. *Agricultural and Forest Meteorology* 166, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.07.001>
- Rouse, J., Rh, H., Ja, S., Dw, D., 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS.
- Rousta, I., Mansourmoghaddam, M., Olafsson, H., Krzyszczyk, J., Baranowski, P., Zhang, H., Tkaczyk, P., 2022. Analysis of the recent trends in vegetation dynamics and its relationship with climatological factors using remote sensing data for Caspian Sea watersheds in Iran. *International Agrophysics* 36, 139–153. <https://doi.org/10.31545/intagr/150020>
- Running, S., Mu, Q., Zhao, M., Moreno, A., 2021. MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061>
- Running, W.S., Mu, Q., Zhao, M., Moreno, A., 2019. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). Version 2.2.
- Sanchez-Perez, J.M., Lucot, E., Bariac, T., Tremolieres, M., 2008. Water uptake by trees in a riparian hardwood forest (Rhine floodplain, France). *Hydrological Processes* 22, 366–375. <https://doi.org/10.1002/hyp.6604>

- Sap flow system EMS 81. Installation guide., 2018.
- Schenk, H.J., Jansen, S., Hölttä, T., 2021. Positive pressure in xylem and its role in hydraulic function. *New Phytologist* 230, 27–45. <https://doi.org/10.1111/nph.17085>
- Schlesinger, W.H., Jasechko, S., 2014. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 189–190, 115–117. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.011>
- Schloerke, B., Cook, D., Larmarange, J., Briatte, F., Marbach, M., Thoen, E., Elberg, A., Toomet, O., Crowley, J., Hofmann, H., Wickham, H., 2024. GGally: Extension to “ggplot2.”
- Scott, R.L., Huxman, T.E., Cable, W.L., Emmerich, W.E., 2006. Partitioning of evapotranspiration and its relation to carbon dioxide exchange in a Chihuahuan Desert shrubland. *Hydrological Processes* 20, 3227–3243. <https://doi.org/10.1002/hyp.6329>
- Seletković, A., Pernar, R., Ančić, M., Sučić, J., 2011. Assessment of Stand Structural Elements on the Basis of Spectral Reflectance Values of an IKONOS Satellite Image. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 32, 329–342.
- Sever, K., Bogdan, S., Škvorc, Ž., 2023. Response of photosynthesis, growth, and acorn mass of pedunculate oak to different levels of nitrogen in wet and dry growing seasons. *Journal of Forestry Research* 34, 167–176. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01505-1>
- Shan, N., Zhang, Y., Chen, J.M., Ju, W., Migliavacca, M., Peñuelas, J., Yang, X., Zhang, Z., Nelson, J.A., Goulas, Y., 2021. A model for estimating transpiration from remotely sensed solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment* 252, 112134. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112134>
- Shi, T.-T., Guan, D.-X., Wu, J.-B., Wang, A.-Z., Jin, C.-J., Han, S.-J., 2008. Comparison of methods for estimating evapotranspiration rate of dry forest canopy: Eddy covariance, Bowen ratio energy balance, and Penman-Monteith equation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113. <https://doi.org/10.1029/2008JD010174>
- Skinner, C.B., Poulsen, C.J., Mankin, J.S., 2018. Amplification of heat extremes by plant CO₂ physiological forcing. *Nature Communications* 9, 1094. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03472-w>
- Škvorc, Ž., Sever, K., Franjić, J., 2013. Fiziologija šumskoga drveća. Interna skripta. Sveučilište u Zagrebu Šumarski fakultet.
- Smets, B., Cai, Z., Eklundh, L., Tian, F., Bonte, K., Van Hoost, R., De Roo, B., Jacobs, T., Camacho, F., Sanchez-Zapero, J., Martinez-Sanchez, E., Swinnen, E., Scheifinger, H., Hufkens, K., Jonsson, P., 2023. Copernicus Land Monitoring Service: High resolution vegetation phenology and productivity (HR-VPP), Seasonal Trajectories and VPP parameters. User manual. Issue 2.3.
- Song, L., Liu, S., Kustas, W.P., Nieto, H., Sun, L., Xu, Z., Skaggs, T.H., Yang, Y., Ma, M., Xu, T., Tang, X., Li, Q., 2018. Monitoring and validating spatially and

- temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale. *Remote Sensing of Environment* 219, 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.002>
- Song, X.-P., Hansen, M.C., Stehman, S.V., Potapov, P.V., Tyukavina, A., Vermote, E.F., Townshend, J.R., 2018. Global land change from 1982 to 2016. *NATURE* 560, 639–+. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>
- Sriwongsitanon, N., Suwawong, T., Thianpopirug, S., Williams, J., Jia, L., Bastiaanssen, W., 2020. Validation of seven global remotely sensed ET products across Thailand using water balance measurements and land use classifications. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 30, 100709. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100709>
- Still, C.J., Page, G., Rastogi, B., Griffith, D.M., Aubrecht, D.M., Kim, Y., Burns, S.P., Hanson, C.V., Kwon, H., Hawkins, L., Meinzer, F.C., Sevanto, S., Roberts, D., Goulden, M., Pau, S., Detto, M., Helliker, B., Richardson, A.D., 2022. No evidence of canopy-scale leaf thermoregulation to cool leaves below air temperature across a range of forest ecosystems. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America* 119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2205682119>
- Tetens, O., 1930. Über einige meteorologische Begriffe. Friedrich Vieweg & Sohn Akt.-Gesellschaft.
- Thomsen, S., Reisdorff, C., Groengroeft, A., Jensen, K., Eschenbach, A., 2020. Responsiveness of mature oak trees (*Quercus robur* L.) to soil water dynamics and meteorological constraints in urban environments. *Urban Ecosystems* 23, 173–186. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00908-z>
- Tikvić, I., Zečić, Ž., Ugarković, D., Posarić, D., 2009. Oštećenost stabala i kakvoća drvnih sortimenata hrasta lužnjaka na spačvanskom području. *Šumarski list* 133, 237–248.
- Turner, A.J., Köhler, P., Magney, T.S., Frankenberg, C., Fung, I., Cohen, R.C., 2020. A double peak in the seasonality of California's photosynthesis as observed from space. *Biogeosciences* 17, 405–422. <https://doi.org/10.5194/bg-17-405-2020>
- Vadez, V., Kholova, J., Medina, S., Kakkera, A., Anderberg, H., 2014. Transpiration efficiency: new insights into an old story. *Journal of Experimental Botany* 65, 6141–6153. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru040>
- Vannassche, J., 2011. Sap flow dynamics in sessile oak during drought stress events in the Czech Republic: 1976–1977 and 2007–2008. Universiteit Gent, Gent.
- Vincke, C., Bréda, N., Granier, A., Devillez, F., 2005. Evapotranspiration of a declining *Quercus robur* (L.) stand from 1999 to 2001. I. Trees and forest floor daily transpiration. *Annals of Forest Science* 62, 503–512.
- Vodnik, D., Gričar, J., Lavrič, M., Ferlan, M., Hafner, P., Eler, K., 2019. Anatomical and physiological adjustments of pubescent oak (*Quercus pubescens* Willd.) from two adjacent sub-Mediterranean ecosites. *Environmental and Experimental Botany* 165, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.06.010>

- Wang, K., Dickinson, R.E., 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics* 50. <https://doi.org/10.1029/2011RG000373>
- Wang, L., Good, S.P., Caylor, K.K., 2014. Global synthesis of vegetation control on evapotranspiration partitioning. *Geophysical Research Letters* 41, 6753–6757. <https://doi.org/10.1002/2014GL061439>
- Wang, X., Zhu, X., Xu, M., Wen, R., Jia, Q., Xie, Y., Ma, H., 2022. Evapotranspiration dynamics and their drivers in a temperate mixed forest in northeast China. *PeerJ* 10, e13549. <https://doi.org/10.7717/peerj.13549>
- Wei, Z., Yoshimura, K., Wang, L., Miralles, D.G., Jasechko, S., Lee, X., 2017. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration. *Geophysical Research Letters* 44, 2792–2801. <https://doi.org/10.1002/2016GL072235>
- Weisberg, F.J., 2019. *An R Companion to Applied Regression*. Sage.
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D., Software, P., PBC, 2023. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*.
- Willis, A.J., Yemm, E.W., Balasubramaniam, S., 1963. Transpiration Phenomena in Detached Leaves. *Nature* 199, 265–266. <https://doi.org/10.1038/199265a0>
- Wullschleger, S.D., Hanson, P.J., Todd, D.E., 2001. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecology and Management, Special Issue: The Science of Managing Forests to Sustain* 143, 205–213. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00518-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00518-1)
- Xie, J., Chen, J., Sun, G., Zha, T., Yang, B., Chu, H., Liu, J., Wan, S., Zhou, C., Ma, H., Bourque, C.P.-A., Shao, C., John, R., Ouyang, Z., 2016. Ten-year variability in ecosystem water use efficiency in an oak-dominated temperate forest under a warming climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 218, 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.059>
- Xu, Z., Jiang, Y., Jia, B., Zhou, G., 2016. Elevated-CO₂ Response of Stomata and Its Dependence on Environmental Factors. *Frontiers in Plant Science* 7, 657. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00657>
- Yang, J., Huang, X., 2021. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data* 13, 3907–3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>
- Yu, B., Shang, S., 2020. Estimating Growing Season Evapotranspiration and Transpiration of Major Crops over a Large Irrigation District from HJ-1A/1B Data Using a Remote Sensing-Based Dual Source Evapotranspiration Model. *REMOTE SENSING* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12050865>
- Zarco-Tejada, P.J., Camino, C., Beck, P.S.A., Calderon, R., Hornero, A., Hernández-Clemente, R., Kattenborn, T., Montes-Borrego, M., Susca, L., Morelli, M., Gonzalez-Dugo, V., North, P.R.J., Landa, B.B., Boscia, D., Saponari, M., Navas-Cortes, J.A., 2018. Previsual symptoms of *Xylella fastidiosa* infection revealed in spectral plant-trait alterations. *Nature Plants* 4, 432–439. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0189-7>

- Zhan, W., Yang, X., Ryu, Y., Dechant, B., Huang, Y., Goulas, Y., Kang, M., Gentine, P., 2022. Two for one: Partitioning CO₂ fluxes and understanding the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and gross primary productivity using machine learning. *Agricultural and Forest Meteorology* 321, 108980. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108980>
- Zhang, Jingru, Xiao, J., Tong, X., Zhang, Jinsong, Meng, P., Li, J., Liu, P., Yu, P., 2022. NIRv and SIF better estimate phenology than NDVI and EVI: Effects of spring and autumn phenology on ecosystem production of planted forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 315, 108819. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108819>
- Zhang, Q., Jia, X., Shao, M., Zhang, C., Li, X., Ma, C., 2018. Sap flow of black locust in response to short-term drought in southern Loess Plateau of China. *Scientific Reports* 8, 6222. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24669-5>
- Zhu, X.-J., Yu, G.-R., Hu, Z.-M., Wang, Q.-F., He, H.-L., Yan, J.-H., Wang, H.-M., Zhang, J.-H., 2015. Spatiotemporal variations of T/ET (the ratio of transpiration to evapotranspiration) in three forests of Eastern China. *Ecological Indicators* 52, 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.030>
- Zimmermann, M.H., 1983. Xylem Structure and the Ascent of Sap, Springer Series in Wood Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-22627-8>

8. PRILOZI

KRATICE

APAR – Apsorbirana fotosintetski aktivna radijacija (eng. Absorbed Photosynthetically Active Radiation)

BPP – Bruto primarna proizvodnja (eng. Gross Primary Product)

E – Isparavanje (evaporacija)

EC – Vrtložna korelacija (eng. Eddy Correlation)

ET – Evapotranspiracija

EVI – Poboljšani vegetacijski index (eng. Enhanced Vegetation index)

HB – Metoda toplinskog uravnoteženja (eng. Heat Balance)

HPV – Brzina toplinskog pulsa (eng. Heat Pulse Velocity)

HR-VPP – Visoko rezolucijski slojeve za fenologiju i produktivnost vegetacije

NDVI – Normalizirana razlika vegetacijskog indeksa (eng. Normalized Difference Vegetation Index)

PSI – Fotosustav I

PSII – Fotosustav II

SELI – Sentinel-2 LAI indeks

SIF – Suncem inducirana fluorescencija

T – Transpiracija

TD – Odvođenje topline (eng. Thermal Dissipation)

UKV – Učinkovitost korištenja vode (eng. WUE)

9. ŽIVOTOPIS AUTORICE

Nela Jantol je završila ekologiju i zaštitu prirode na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 2014. godine. Od 2016. zaposlena je u Oikon d.o.o. - Institutu za primijenjenu ekologiju gdje radi kao stručna suradnica za staništa i floru u izradi Studija procjene utjecaja na okoliš za segment bioraznolikosti, zaštićenih područja i ekološke mreže. U Oikonu je aktivna članica Laboratorija za daljinska istraživanja i GIS gdje za različite projekte koristi daljinska istraživanja, primjerice korištenje Sentinel-2 snimki za identifikaciju i praćenje invazivnih biljnih vrsta, praćenje promjene klorofila u obalnim lagunama, testiranja modela za procjenu biomase grmlja, korištenje MODIS snimki za detekciju površine opožarenih područja i Landsat 8 snimki za kartiranje urbanih toplinskih otoka. Kroz projekt „Copernicus Land Monitoring Service - CLC+ Backbone Production, uključujući rasterske i vektorske proizvode temeljene na satelitskim ulaznim podacima od 2017./2018./2019.“ zaprimila je financiranje Hrvatske zaklade za znanost (projekt: DOK-2020-01-9841). Kroz projekt COST Action: CA17134 Optical synergies for spatiotemporal SENSing of Scalable ECOphysiological traits" (SENSECO) od 2018. do 2023. uključena je u radnu grupu koja povezuje stručnjake na temi smanjivanja raskoraka između terenskih mjerenja do satelitskih snimki. Cilj projekta je razviti metode za upotrebu snimki buduće FLEX misije koja će snimati suncem induciranu fluorescenciju. Glavna autorica je rada s temom primjene metode iskazivanja heterogenosti FLEX piksela korištenjem Sentinel-2 snimki i koautorica brojnih priloga s temom daljinskih istraživanja. Zanima ju primjena daljinskih istraživanja na prirodnim područjima za praćenje i detekciju promjena.