

# Dinamika prašuma crnog bora (*Pinus nigra* J. F. Arnold) i munike (*Pinus heldreichii* H. Christ) u subalpskom pojasu jugoistočnih Dinarida

---

Lukač, Ljubica

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:832546>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)





Sveučilište u Zagrebu  
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE

Ljubica Lukač

**DINAMIKA PRAŠUMA CRNOG BORA (*Pinus nigra* J. F. Arnold) I MUNIKE (*Pinus heldreichii* H. Christ) U SUBALPSKOM POJASU JUGOISTOČNIH DINARIDA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



University of Zagreb  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF FORESTRY AND WOOD TECHNOLOGY

Ljubica Lukač

**DYNAMICS OF BLACK PINE (*Pinus nigra*  
J.F. Arnold) AND BOSNIAN PINE (*Pinus*  
*heldreichii* H. Christ) PRIMEVAL FORESTS  
IN SUBALPINE BELT OF THE  
SOUTHEASTERN DINARIC MOUNTAINS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2023



Sveučilište u Zagrebu  
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE

Ljubica Lukač

**DINAMIKA PRAŠUMA CRNOG BORA (*Pinus nigra* J. F. Arnold) I MUNIKE (*Pinus heldreichii* H. Christ) U SUBALPSKOM POJASU JUGOISTOČNIH DINARIDA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Stjepan Mikac

Zagreb, 2023.





University of Zagreb  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF FORESTRY AND WOOD TECHNOLOGY

Ljubica Lukač

**DYNAMICS OF BLACK PINE (*Pinus nigra*  
J.F. Arnold) AND BOSNIAN PINE (*Pinus*  
*heldreichii* H. Christ) PRIMEVAL FORESTS  
IN SUBALPINE BELT OF THE  
SOUTHEASTERN DINARIC MOUNTAINS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Assoc. Prof. Stjepan Mikac

Zagreb, 2023

## INFORMACIJE O MENTORU

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Mikac rođen je 25. kolovoza 1980. godine u Vinkovcima gdje je završio osnovnu i srednju školu. Na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu diplomirao je 2003. godine. Od svibnja 2004. godine zaposlen je na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za ekologiju i uzgajanje šuma. Doktorski rad pod naslovom „Strukturna i regeneracijska dinamika bukovo-jelove prašume Čorkova uvala“ obranio je 2010. godine. U znanstveno-nastavno zvanje docenta izabran je 16. srpnja 2014. godine na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Predaje na preddiplomskom i diplomskom studiju kolegije Uzgajanje šuma 1, Uzgajanje šuma 2, Prašume i šumski rezervati.

Znanstveni i stručni interes usmjeren je na proučavanje utjecaja klimatskih promjena na rast i razvoj šuma te na održivo gospodarenje šumskim ekosustavima s ciljevima održanja stabilnosti, produktivnosti i biološke raznolikosti šuma i vrsta u Republici Hrvatskoj i Europi. Također veliki naglasak u znanstvenom djelovanju usmjeren je na rekonstrukcije klimatskih promjena i elementarnih nepogoda pomoću dendrokronoloških metoda.

Njegova bibliografija sadrži 65 objava od čega je 25 izvornih znanstvenih radova (indeksiranih u relevantnoj bazi podataka – WoSCC), 1 priručnik, 4 poglavlja u znanstvenim knjigama, 17 radova u recenziranim zbornicima skupova te 13 sažetaka u zbornicima skupova.

Aktivno sudjeluje na domaćim i međunarodnim znanstvenim i stručnim skupovima i to na 22 međunarodne i 5 nacionalnih znanstvenih konferencija. Sudjelovao je na 20 domaćih stručnih skupova i radionica sa temom utjecaja klimatskih promjena na razvoj šumskih ekosustava. Godine 2018. osnovao je Laboratorij za dendroekologiju u kojem se aktivno proučava utjecaj klime na rast i razvoj šuma, ali i dugoročne rekonstrukcije klimatskih čimbenika.

Vodio je 1 istraživački projekt Hrvatske zaklade za znanost u razdoblju od 2015. do 2018. godine pod naslovom Uspostava dugoročnog znanstvenog monitoringa prirodnih šumskih ekosustava u Republici Hrvatskoj – Crofem. Trenutno vodi EU projekt: Mjere prilagodbe klimatskim promjenama za održivo upravljanje prirodnim resursima - "MEMORIE" financiran iz Operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014. – 2020. godina „*Shema za jačanje primijenjenih istraživanja za mjere prilagodbe klimatskim promjenama*“, (ref. oznaka: KK.05.1.1.02).

Glavni je autor Prve procjene stanja očuvanosti šumskih staništa u Republici Hrvatskoj za potrebe izvješćivanja RH o napretku i implementaciji Direktive o staništima (članak 17.) (MZOE RH). Nadalje, glavni je autor Analize stanja u šumarstvu za potrebe izrade strateškog plana zajedničke poljoprivredne politike Republike Hrvatske za novo programsko razdoblje 2020. – 2027. (MP RH). Također je glavni autor Akcijskog plana za sanaciju nizinskih šuma obuhvaćenih klimatskim promjenama i biotskim štetnicima u Republici Hrvatskoj.

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

TI (naslov)	Dinamika prašuma crnog bora ( <i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold) i munike ( <i>Pinus heldreichii</i> H. Christ) u subalpskom pojasu jugoistočnih Dinarida
AU (autor)	Ljubica Lukač
AD (adresa)	Solunskih dobrovoljaca, 45a, 74000 Dobož, BiH e-mail: <a href="mailto:lukac.ljubica@gmail.com">lukac.ljubica@gmail.com</a>
SO (izvor)	Šumarska knjižnica, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Svetošimunska 23, 10000 Zagreb
PY (godina objave)	2023.
LA (izvorni jezik)	Hrvatski
DE (ključne riječi)	Klimatske promjene, dinamika šume, crni bor, munika, Dinaridi, Dendrokronologija
GE (zemlja objave)	Republika Hrvatska
PT (vrsta objave)	Doktorski rad
VO (obujam)	130 stranica, 20 tablica, 73 slike i 116 navoda literature
AB (sažetak)	<p>Prirodi blisko uzgajanje šuma je temelj šumarstva jugoistočne Europe. Razumijevanje silvidinamike prašumskih sastojina je važna teorijska podloga za razvoj konceptualnih modela prirodi bliskog gospodarenja šumama. Zbog malog broja očuvanih lokaliteta koje imaju karakter prašuma za većinu vrsta drveća nedostaju potrebni podaci kako bi se istražila njihova prirodna silvidinamika. Trenutno najbolje očuvane prašumske sastojine crnoga bora (<i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold) i munike (<i>Pinus heldreichii</i> H. Christ.) možemo pronaći na visokim predjelima dinarskih planina u Sloveniji, Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini, Crnoj Gori, Albaniji i Makedoniji. Dosadašnja istraživanja prašuma i starih šuma crnoga bora i munike na području Dinarida su rijetka i nesustavna. Stoga su glavni ciljevi ovoga istraživanja analizirati silvidinamiku i odgovor prašuma i starih šuma crnoga bora i bora munike na klimatske promjene na području jugoistočnih Dinarida. Istraživanje je obavljeno u Dinarskom gorju od sjeverozapada prema jugoistoku. Ukupno su postavljene 33 pokusne plohe u prašumama i starim sastojinama crnog bora i munike. Rezultati istraživanja pokazuju da su prašumske sastojine crnog bora i munike raznodobne, maksimalne starosti kod crnog bora od 501 godine i 625 godina kod munike. Premda pridolaze na vrlo strmim i nedostupnim terenima njihova produkcija varira od 150 do 1300 m<sup>3</sup>/ha. Sastojine crnoga bora na zapadnim Dinaridima imaju manji volumen i starosti u odnosu na sastojine na istočnim lokalitetima i većim nadmorskim visinama. Temeljnica i drvna zaliha u istraživanim sastojinama crnog bora i munike je u optimalnim vrijednostima za stanišne uvjete što ukazuje da sastojine postižu maksimalnu proizvodnu sposobnost bez obzira na oskudne stanišne prilike.</p> <p>Utjecaj klime na rast stabala obje istraživane vrste je značajan. Crni bor za razliku od munike pokazuje značajnu prilagodbu na klimatske promjene na način da iskorištava visoke temperature zraka u proljeće (veljača-ožujak) te time počinje sa ranijim rastom naročito nakon 1960. godine. Stoga sve veće temperature zraka u ljetnom periodu (lipanj-kolovoz) ne ograničavaju njegov</p>

---

<p>rast. Na rast munike pozitivno utječu oborine u ljetnom periodu, dok temperatura u ljeto reducira rast ove vrste. Kako bilo iz provedenih analiza možemo zaključiti da se crni bor prilagodio recentnim promjenama klime te ih iskoristio na najbolji način. Analizama stabilnih vodikovih izotopa iz celuloze drva napravljene su rekonstrukcije indeksa jačine suše (scPDSI) za cijele Dinaride. Rekonstrukcija pokazuje da su jačine i intenzitet suša sve veći tijekom posljednjih 250 godina te da je trend suša u porastu. Sukladno rezultatima provedenih analiza možemo zaključiti da su obje istraživane vrste, a posebice crni bor otporne na suše te da se kao takve trebaju koristiti za pošumljavanja i uzgajanje na teškim i nedostupnim krškim terenima Dinarskog gorja.</p>
--

---

## BASIC DOCUMENTATION CARD

TI (Title)	Dynamics of Black pine ( <i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold) and Bosnian pine ( <i>Pinus heldreichii</i> H. Christ) primeval forests in the subalpine belt of the southeastern Dinaric Mountain
OT (Original title)	Dinamika prašuma crnog bora ( <i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold) i munike ( <i>Pinus heldreichii</i> H. Christ) u subalpskom pojasu jugoistočnih Dinarida
AU (Author)	Ljubica Lukač
AD (Address)	Solunskih dobrovoljaca, 45a, 74000 Doboj, BiH e-mail: <a href="mailto:lukac.ljubica@gmail.com">lukac.ljubica@gmail.com</a>
SO (Source)	Library of Forestry, Faculty of Forestry and Wood Technology Svetošimunska 23, 10000 Zagreb
PY (Publication year)	2023.
LA (Text Language)	Croatian
DE (Description)	Climate change, forest dynamic, black pine, bosnian pine, Dinarides, Dendrochronology
GE (Geo. headings)	Republic of Croatia
PT (Publication type)	Doctoral Thesis
VO (Volume)	130 pages, 20 tables, 73 figures, 116 bibliographical references
AB (Abstract)	Close-to-nature forest management is the basis of forestry in Southeastern Europe. Understanding the silvodynamics of primary forests is an important theoretical basis for the development of conceptual models of close-to-nature forest management. Due to the small number of preserved localities that have the character of a primary forests, the necessary data are missing for most tree species. Currently, the best-preserved primary forests of black pine ( <i>Pinus nigra</i> J.F. Arnold) and bosnian pine ( <i>Pinus heldreichii</i> H. Christ.) can be found in the remote areas of the Dinaric mountains in Slovenia, Croatia, Bosnia and Herzegovina, Montenegro, Albania and Macedonia. Previous studies of primary and old-growth forests of black and bosnian pine in the area of the Dinarides are rare and unsystematic. Therefore, the main goals of this research are to analyze the silvodynamics and response of primary and old-growth forests of black pine and bosnian pine to climate change in the southeastern Dinarides. The research was carried out covering the gradient of the Dinaric Mountains from the northwest to the southeast. A total of 33 plots were set up in primary and old-growth stands of pines. The results of the research indicate that the forest stands of black pine and bosnian pine are of various ages, with a maximum age of 501 years for black pine and 625 years for bosnian pine. Although they grow on very steep and inaccessible terrain, their growing stock varies from 150 to 1300 m <sup>3</sup> /ha. The stands of black pine in the western Dinarides have a smaller volume and age compared to the stands in eastern localities and at higher altitudes. Basal area and growing stock in the researched stands of black pine and bosnian pine are at optimal

---

values for the habitat conditions, which indicates that the stands achieve maximum production capacity regardless of scarce habitat conditions. The influence of climate on the growth of trees of both researched species is significant. The black pine, unlike the bosnian pine, shows a significant adaptation to climate changes in a way that it takes advantage of the high air temperatures in the spring (February-March) and thus starts growing earlier, especially after 1960. Therefore, increasing air temperatures in the summer period (June-August) do not limit its growth. The growth of bosnian is positively influenced by precipitation in the summer period, while the temperature in the summer reduces the growth of this species. However, from the analyzes carried out, we can conclude that the black pine has adapted to recent climate changes and used them in the best way. The drought severity index (scPDSI) reconstructions for the entire Dinarides were made by analyzes of stable hydrogen isotopes from wood cellulose. The reconstruction shows that the strength and intensity of droughts have been increasing over the last 250 years and that the trend of droughts is increasing. According to the results of the analysis, we can conclude that both researched species, especially the black pine, are resistant to droughts and that as such they should be used for afforestation and cultivation on the difficult and inaccessible karst terrains of the Dinars Mountains in order to mitigate the consequences of climate change and possibly benefit from them.

---

# SADRŽAJ

Popis slika.....	I
Popis tablica.....	VII
1. UVOD.....	1
2. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA.....	3
2.1. Rasprostranjenost i ekologija.....	3
2.2. Silvidinamika sastojina crnoga bora i munike.....	8
2.3. Klimatske promjene.....	15
2.4. Dosadašnja istraživanja.....	16
2.4.1. Dendrokronološka istraživanja.....	16
2.4.2. Istraživanja strukture i pomlađivanja.....	17
2.4.3. Istraživanja gospodarenja crnoga bora i munike.....	18
3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	20
4. MATERIJAL I METODE RADA.....	21
4.1. Područje istraživanja.....	21
4.2. Klimatske prilike istraživanih lokaliteta.....	26
4.3. Prikupljanje podataka.....	30
4.4. Priprema uzoraka.....	33
4.4.1. Laboratorijska priprema i obrada uzoraka.....	33
4.4.2. Očitavanje vrijednosti širina godova.....	34
4.4.3. Procjena starosti stabla.....	35
4.4.4. Priprema izvrtaka za analizu ugljikovih i kisikovih stabilnih izotopa.....	36
4.5. Analiza i obrada podataka.....	38
4.5.1. Analiza i obrada podataka o strukturi sastojina.....	38
4.5.2. Analiza i obrada uzoraka širina godova.....	38
4.5.3. Korelacije s klimatskim čimbenicima.....	44
5. REZULTATI.....	45
5.1. Strukturne značajke istraživanih sastojina.....	45
5.1.1. Gustoća sastojina crnoga bora.....	45
5.1.2. Temeljnica sastojina crnoga bora.....	47

5.1.3.	Drvena zaliha sastojina crnoga bora.....	48
5.1.4.	Strukturne značajke sastojina munike.....	50
5.2.	Dobna struktura istraživanih sastojina.....	51
5.3.	Dendrokronološke analize.....	53
5.3.1.	Kronologije širina godova.....	53
5.3.2.	Kronologije širina godova crnoga bora.....	57
5.3.3.	Sličnosti između kronologija crnoga bora.....	58
5.3.4.	Regionalna kronologija.....	63
5.4.	Klimatska osjetljivost crnoga bora.....	66
5.4.1.	Lokalna klimatska osjetljivost crnoga bora.....	66
5.4.2.	Lokalna klimatska osjetljivost crnoga bora – sezonske korelacije.....	72
5.4.3.	Lokalna klimatska osjetljivost crnoga bora – pomične korelacije.....	74
5.4.4.	Lokalna klimatska osjetljivost crnoga bora – usporedba između lokaliteta.....	76
5.4.5.	Lokalna klimatska osjetljivost munike.....	78
5.5.	Regionalna klimatska osjetljivost crnoga bora.....	83
5.5.1.	Klimatska osjetljivost na sezonske temperature zraka.....	84
5.5.2.	Klimatska osjetljivost na sezonske oborine.....	85
5.5.3.	Klimatska osjetljivost na Palmerov indeks jačine suše (scPDSI).....	86
5.5.4.	Klimatska osjetljivost na indeks suše (SPEI).....	87
5.5.5.	Vremenska stabilnost klimatske osjetljivosti.....	88
5.6.	Prostorne korelacije.....	93
5.7.	Rekonstrukcije klimatskih uvjeta u prošlosti.....	96
5.7.1.	Korelacije s klimatskim čimbenicima.....	100
5.7.2.	Validacija i kalibracija modela.....	103
5.7.3.	Prostorna korelacija.....	104
6.	RASPRAVA.....	106
6.1.	Strukturne značajke i prirodna dinamika sastojine.....	106
6.2.	Utjecaj klimatskih čimbenika na dinamiku rasta.....	107
6.3.	Prilagodba crnog bora i munike na klimatske promjene.....	112
7.	ZAKLJUČCI.....	116
8.	LITERATURA.....	119



## **Popis slika:**

<b>Slika 1.</b> Prašumska sastojina crnog bora na Zelengori <b>A)</b> . Gospodarska sastojina crnog bora <b>B)</b> .	2
<b>Slika 2.</b> Prašumska sastojina crnog bora na Sjevernom Velebitu <b>A)</b> i sastojina munike na Orjenu <b>B)</b> .....	5
<b>Slika 3.</b> Recentna geografska rasprostranjenost podvrsta crnoga bora (lijevo) i bora munike (desno).....	7
<b>Slika 4.</b> Tragovi požara na pridanku stabla munike <b>A</b> , opožarena površine 2012. godine u sastojini crnoga bora <b>B</b> i <b>C</b> , Prikaz ožiljaka od požara na presjeku stabla crnoga bora na kojemu su vidljivi tragovi dva požara (označeno crvenim strelicama) <b>D</b> . .....	10
<b>Slika 5.</b> Uzorak iz stabala crnoga bora sa korom sa lokaliteta Crna Poda (Photo: S.Mikac 2023). .....	11
<b>Slika 6.</b> Geografski položaj istraživanih lokaliteta gdje su: 1. Borovi Vrh, 2. Budim, 3. Paklenica, .....	23
<b>Slika 7.</b> Prikaz položaja istraživanih lokaliteta crnoga bora .....	24
<b>Slika 8.</b> Izgled šuma munike na panorami masiva Orjena <b>A</b> , Položaj pokusnih ploha <b>B</b> i izgled sastojine (primjer pokusne plohe BIH6) <b>C</b> . .....	25
<b>Slika 9.</b> Ukupne količine oborina po mjesecima i prosječne mjesečne temperature zraka prema lokalitetima za razdoblje od 1901 – 2021. godine. ....	26
<b>Slika 10.</b> Ekodiagram prikazuje odnos između prosječne godišnje temperature zraka i ukupne godišnje količine oborina za Europu.....	29
<b>Slika 11.</b> Prikupljanje uzoraka na pokusnoj plohi na lokalitetu Borovi vrh sa označenim pojedinačnim stablima (Photo: S.Mikac, 2019.).....	30
<b>Slika 12.</b> Prikupljanje uzoraka pomoću električne bušilice sa stabala munike i crnoga bora .....	32
<b>Slika 13.</b> Lijepljene uzoraka na drvene predloške (lijevo) i priprema uzoraka pomoću mirkotoma (desno).....	33
<b>Slika 14.</b> Snimanje uzoraka pomoću sustava ATRICS .....	34
<b>Slika 15.</b> Očitavanje uzoraka pomoću programa Coorecorder.....	34

<b>Slika 16.</b> Problem kod očitavanja godova na crnom boru gdje je vidljivo spajanje dva goda u jedna (crvena strelica). .....	35
<b>Slika 17.</b> Procjena starosti svakog pojedinog uzorka pomoću programa CooRecorder.....	35
<b>Slika 18.</b> Srebrne kapsule za određivanje izotopa ugljika i kisika (Elementar Analysensysteme, Langensfeld, Njemačka). .....	36
<b>Slika 19.</b> Elementarni analizator (AE).....	37
<b>Slika 20.</b> Teoretski prikaz sadržaja informacija u uzorku širina godova i standardizacije (preuzeto iz (Siegwolf i sur., 2022)).....	40
<b>Slika 21.</b> Prikaz standardizacija jedne serije širine godova koristeći se metodom „Spline“. .....	40
<b>Slika 22. A)</b> Neobrađene (sive linije) i prosječne vremenske serije (1780–2018) stabilnih izotopskih omjera ugljika ( $\delta^{13}\text{C}$ ) i kisika ( $\delta^{18}\text{O}$ ) u godovima munike. <b>(B)</b> Prikazani su izraženi populacijski signal (EPS; pune linije) i korelacija među serijama ( $R_{\text{bar}}$ ; isprekidane linije) neobrađenih serija $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{18}\text{O}$ . EPS i $R_{\text{bar}}$ statistike izračunate su za 30-godišnje prozore s kašnjenjem od 25 godina. ....	42
<b>Slika 23.</b> Glavni koraci frakcioniranja i tipične vrijednosti sastava izotopa kisika ( $\delta^{18}\text{O}$ ) u umjerenoj klimi. $\delta^{18}\text{O}$ SMOW, standardna srednja vrijednost $\delta^{18}\text{O}$ u oceanskoj vodi; $\delta^{18}\text{O}$ V, $\delta^{18}\text{O}$ P, $\delta^{18}\text{O}$ LW, $\delta^{18}\text{O}$ u vodenoj pari, oborini (bilo kiši ili snijegu) i vodi iz lista; VPD, deficit tlaka pare; gs, stomatalna vodljivost. Izvorni podaci IAEA/WMO (2001.) i (Saurer i sur., 1997) .....	43
<b>Slika 24.</b> Distribucije broja stabala crnoga bora prema debljinskim razredima i lokalitetima .....	46
<b>Slika 25.</b> Distribucije volumena crnoga bora prema debljinskim razredima i lokalitetima .....	49
<b>Slika 26.</b> Distribucije broja stabala i volumena munike prema debljinskim razredima .....	50
<b>Slika 27.</b> Distribucije broja stabala crnoga bora prema starosti i prema lokalitetima .....	52
<b>Slika 28.</b> Distribucija broja stabala munike po prema starosti.....	52
<b>Slika 29.</b> Serije širina godova (TRW) crnoga bora prema godinama za lokalitete iz Bosne i Hercegovine. ....	54
<b>Slika 30.</b> Serije širina godova (TRW) crnoga bora prema godinama za lokalitete iz Hrvatske....	55
<b>Slika 31.</b> Serije širina godova (TRW) munike prema godinama. Rasponom boja su označene starosti (duljine) svakog pojedinog stabla unutar kronologije.....	56
<b>Slika 32.</b> Rezidualne kronologije crnoga bora prema istraživanim lokalitetima <b>A)</b> i veličina uzoraka širina godova prema godinama <b>B)</b> . ....	58

<b>Slika 33.</b> Korelacijska matrica s prikazanim vrijednostima korelacijskog koeficijenta između rezidualnih kronologija crnoga bora između istraživanih lokaliteta. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) korelacije su označene zasjenjenim poljima.....	60
<b>Slika 34.</b> Biplot PCA analize za rezidualne kronologije crnoga bora prema lokalitetima A). Klusterski dijagram prema sličnost rezidualnih kronologija prema lokalitetima B). .....	61
<b>Slika 35.</b> Biplot PCA analize za rezidualne kronologije crnoga bora prema lokalitetima A). Klusterski dijagram prema sličnost rezidualnih kronologija prema lokalitetima B). .....	62
<b>Slika 36.</b> Biplot PCA analize za rezidualne kronologije crnoga bora prema lokalitetima A). Klusterski dijagram prema sličnost rezidualnih kronologija prema lokalitetima B). .....	62
<b>Slika 37.</b> Prostorni položaj klastera prema varijabilnosti rezidualnih kronologija širina godina kod crnog bora. ....	63
<b>Slika 38.</b> Biplot PCA analize za rezidualne kronologije crnoga bora prema lokalitetima A). Klusterski dijagram prema sličnost rezidualnih kronologija prema lokalitetima B).. .....	65
<b>Slika 39.</b> Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) sa svakom pojedinom kronologijom širina godina prema lokalitetima. Korelacije su napravljene za razdoblje od 1901 – 2016. godine. ....	67
<b>Slika 40.</b> Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) sa svakom pojedinom kronologijom širina godina prema lokalitetima. Korelacije su napravljene za razdoblje od 1901 – 1959. godine. ....	70
<b>Slika 41.</b> Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) sa svakom pojedinom kronologijom širina godina prema lokalitetima. Korelacije su napravljene za razdoblje od 1960 – 2016. godine. ....	71
<b>Slika 42.</b> Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) uprosječeni za sezonu od 2 ili 3 mjeseca. ....	72
<b>Slika 43.</b> Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) uprosječeni za sezonu od 2 ili 3 mjeseca za dva polurazdoblja. ....	73
<b>Slika 44.</b> Pomične korelacije između prosječnih temperatura zraka i sume oborina u ljeto tekuće godine (od lipnja do kolovoza, JJA) za duljinu od 40 godina + 1. godina za razdoblje do 1901 – 2016. godine prema lokalitetima .....	74

<b>Slika 45.</b> Pomične korelacije između prosječnih temperatura zraka u zimi (veljača i ožujak, FM) tekuće godine <b>A</b> ) te sume oborina u jesen prethodne godine (kolovoz – listopad, aso) <b>B</b> ) prema lokalitetima .....	75
<b>Slika 46.</b> Rezultati klusterske analize prema koeficijentima korelacija za dva polurazdoblja i prikaz dobivenih klastera u geografskom prostoru istraživanih lokaliteta.....	76
<b>Slika 47.</b> Usporedba sličnosti između klastera gdje su klasteri dobiveni pomoću rezidualnih kronologija A te klasteri dobiveni pomoću korelacijskih koeficijenata s klimatskim čimbenicima za razdoblje od 1901 -2016. godine kod crnoga bora.....	77
<b>Slika 48.</b> Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) sa svakom pojedinom kronologijom širina godova prema lokalitetima munike. Korelacije su napravljene za razdoblje od 1901 – 2016. godine .....	79
<b>Slika 49.</b> Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) sa ukupnom kronologijom širina godova munike. Ukupno i prema polurazdobljima.....	80
<b>Slika 50.</b> Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) uprosječeni za sezonu od 2 ili 3 mjeseca za dva polurazdoblja.....	81
<b>Slika 51.</b> Pomične korelacije za svaki mjesec između oborina i temperature zraka te ukupne kronologije munike. Duljina korelacijskog prozora iznosi 40 godina. Zvezdicom su označene statistički značajne korelacije.....	82
<b>Slika 52.</b> Koeficijenti korelacije između regionalne kronologije PC1 i odabranih klimatskih čimbenika za razdoblje od 1901 – 2008. godine. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) .....	83
<b>Slika 53.</b> Koeficijenti korelacije između regionalne kronologije PC1 i prosječnih vrijednosti temperature zraka za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja.....	84
<b>Slika 54.</b> Koeficijenti korelacije između regionalne kronologije PC1 i sume oborina za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja.....	85
<b>Slika 55.</b> Koeficijenti korelacije između prve komponente PC1 rezidualnih kronologija te indeksa suše (PDSI) za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja.....	86
<b>Slika 56.</b> Koeficijenti korelacije između prve komponente PC1 rezidualnih kronologija te indeksa suše (SPEI) za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja.....	87
<b>Slika 57.</b> Pomične korelacije za svaki mjesec između oborina i temperature zraka. Duljina korelacijskog prozora iznosi 40 godina.....	88

<b>Slika 58.</b> Koeficijenti korelacije između prve komponente PC1 rezidualnih kronologija te indeksa suše (PDSI) za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja. ....	89
<b>Slika 59.</b> Pomične korelacije s prosječnim vrijednostima temperature zraka u ljeto tekuće godine (od lipnja – kolovoza, JJA) sa sumom oborina (od srpnja – kolovoza, JA) te sa prosječnom temperaturom zraka u proljeće (veljača – ožujak, FM) sa regionalnom kronologijom crnoga bora (PC1). ....	90
<b>Slika 60.</b> Regionalna kronologija crnoga bora PC1 i standardno odstupanje ljetnih temperatura zraka tijekom razdoblja zadnjih 100. godina (A). Pomične korelacije s temperaturom zraka (B) i raspršeni dijagrami za razdoblje do 1950 i nakon 1950. godine (C). ....	91
<b>Slika 61.</b> Standardna odstupanja prosječnih ljetnih (lipanj-kolovoz, JJA) i proljetnih (veljača-ožujak, FM) temperatura zraka i sume oborina u ljeto (lipanj-kolovoz, JJA) i trajanje sunčevog zračenja u lipnju i srpnju (JJ) za razdoblje od 1780 – danas. ....	92
<b>Slika 62.</b> Prostorne korelacije PC1 komponente rezidualnih kronologije s oborinama u ljeto (lipanj-srpanj, JJ) i temperaturom zraka za dva polurazdoblja. Prostorne korelacije su napravljene pomoću platforme KNMI Climate Explorer ( <a href="https://climexp.knmi.nl/">https://climexp.knmi.nl/</a> ). ....	94
<b>Slika 63.</b> Prostorne korelacije PC1 komponente rezidualnih kronologije sa indeksima suše SPEI i PDSI za dva polurazdoblja. Prostorne korelacije su napravljene pomoću platforme KNMI Climate Explorer ( <a href="https://climexp.knmi.nl/">https://climexp.knmi.nl/</a> ). ....	95
<b>Slika 64.</b> Prostorne korelacije PC1 komponente rezidualnih kronologije sa minimalnom i maksimalnom temperaturom zraka u proljeće (veljača – ožujak, FM) za dva polurazdoblja. Prostorne korelacije su napravljene pomoću platforme KNMI Climate Explorer ( <a href="https://climexp.knmi.nl/">https://climexp.knmi.nl/</a> ). ....	96
<b>Slika 65.</b> A) Prosječne vrijednosti stabilnih kisikovih izotopa u individualnim uzorcima drva te B) korelacijska matrica između uzoraka s Orjena i Lom-a. ....	97
<b>Slika 66.</b> Standardizirane serije stabilnog kisikovog izotopa $\delta^{18}\text{O}$ . Narančastom bojom su bojom označene serije sa lokaliteta Orjen a plavom bojom serije s lokaliteta Lom i Janj (An i sur., 2023) (A). Prosječne vrijednosti (za 50.godina) EPS-a i Rbar su prikazane na donjoj slici (B).....	98
<b>Slika 67.</b> Standardizirane kronologije stabilnog kisikovog izotopa $\delta^{18}\text{O}$ za Orijen (svjetlo plavo) i Lom-Janj (tamno plavo) s linearnim trendovima (A). Distribucija frekvencija standardiziranih vrijednosti kronologija (B). Raspršeni dijagram između kronologija crnog bora (PINI) sa lokaliteta Lom&Janj u odnosu prema kronologiji bora munike (PIHE) s Orjena (C).....	99
<b>Slika 68.</b> Standardizirane kronologije stabilnog kisikovog izotopa $\delta^{18}\text{O}$ za Orijen (svjetlo plavo) i Lom-Janj (tamno plavo) s linearnim trendovima (A). Distribucija frekvencija standardiziranih vrijednosti kronologija (B). Raspršeni dijagram između kronologija crnog bora (PINI) sa lokaliteta Lom&Janj u odnosu prema kronologiji bora munike (PIHE) s Orjena (C).....	101

<b>Slika 69.</b> Korelacijski koeficijent (R) između sezonskih vrijednosti klimatskih čimbenika i regionalne kronologije (TRSI) stabilnog izotopa kisika $\delta^{18}\text{O}$ . Gdje su: TEMP – prosječna temperatura zraka, PREC – ukupne oborine, SPEI - multiskalarni indeks suše i scPDSI - samokalibrirajući Palmerov indeks jačine suše. ....	102
<b>Slika 70.</b> Korelacijski koeficijent (R) između sezonskih vrijednosti klimatskih čimbenika i regionalne kronologije (TRSI) stabilnog izotopa kisika $\delta^{18}\text{O}$ . ....	103
<b>Slika 71.</b> Odnos između mjerenih vrijednosti PDSI u ljeto te kronologije stabilnih izotopa za razdoblje do 1901 – 2018. godine A. Raspršeni dijagram odnosa kronologije stabilnih izotopa kisika i indeksa suše. Ovaj model se koristio za rekonstrukciju suše u povijest izvan obuhvata instrumentalnih mjerenja B). ....	104
<b>Slika 72.</b> Prostorna korelacija između rekonstruiranog i mjerenog Palmerovog indeksa jačine suše (PDSI).....	105
<b>Slika 73.</b> Rekonstruirane vrijednosti Palmerovog indeksa suše za područje Dinarida od 1761 – danas. Pozitivne vrijednosti označuju vlažna razdoblja a negativne vrijednosti suha razdoblja. ....	105
<b>Slika 74.</b> Obnavljanje crnoga bora čistim sječama sa ostavljenim stablima – pričuvcima ..... <b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b>	

## Popis tablica:

<b>Tablica 1.</b> Popis istraživanih lokaliteta s brojem uspostavljenih pokusnih ploha .....	22
<b>Tablica 2.</b> Mjesečne vrijednosti količina oborina (mm) za istraživane lokalitet .....	27
<b>Tablica 3.</b> Mjesečne vrijednosti temperature zraka (°C) za istraživane lokalitete. Avg. – srednja godišnja temperatura zraka .....	28
<b>Tablica 4.</b> Broj stabala crnoga bora (kom/ha) prema debljinskim razredima (d1.30, širine 10 cm) za istraživane lokalitete: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borovi vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač, PAK – Paklenica i CP - Crna poda.....	45
<b>Tablica 5.</b> Temeljnica (m <sup>2</sup> /ha) crnoga bora prema debljinskim razredima (d1.30, širine 10 cm) za istraživane lokalitete: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borovi vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač, PAK – Paklenica i CP - Crna poda.....	47
<b>Tablica 6.</b> Volumen (m <sup>3</sup> /ha) crnoga bora prema debljinskim razredima (d1.30, širine 10 cm) za istraživane lokalitete: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borovi vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač, PAK – Paklenica i CP - Crna poda.....	48
<b>Tablica 7.</b> Distribucija broja stabala, temeljnice i volumena munike .....	50
<b>Tablica 8.</b> Statističke vrijednosti starosti istraživanih sastojina crnoga bora. ....	51
<b>Tablica 9.</b> Popis broja uzorkovanih stabala na lokalitetima .....	53
<b>Tablica 10.</b> Ukupna duljina kronologija širina godova (TRI) prema lokalitetima (I) i ukupni broj uzorkovanih stabala (N). ....	57
<b>Tablica 11.</b> Vrijednost Perasonovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija crnoga bora prema lokalitetima za razdoblje od 1900 – 2017. godine. ....	59
<b>Tablica 12.</b> Vrijednost Perasonovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija crnoga bora prema lokalitetima za razdoblje od 1900 – 2017. godine. ....	61
<b>Tablica 13.</b> Vrijednost Pearsono-ovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija crnoga bora i oborina prema lokalitetima za razdoblje od 1901 – 2016. godine.....	68
<b>Tablica 14.</b> Vrijednost Pearson-ovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija crnoga bora i temperature zraka prema lokalitetima za razdoblje od 1901 – 2016. godine.....	69
<b>Tablica 15.</b> Vrijednosti Pearson-ovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija munike prema pokusnim ploham i klimatskih čimbenika za razdoblje od 1901 – 2016. godine.. ..	78

<b>Tablica 16.</b> Korelacijski koeficijenti između serija izotopa $\delta^{18}\text{O}$ između pojedinih stabala za razdoblje preklapanja serija od 1828 – 2018. godine.....	99
<b>Tablica 17.</b> Mann-Kendall trend test za kronologije (TRSI) stabilnog kisikovog izotopa $\delta^{18}\text{O}$ ... ..	100
<b>Tablica 18.</b> Deskriptivne vrijednosti koncentracije stabilnog kisikovog izotopa za svaki uzorak posebno. Vrijednosti su izračunate za razdoblje od 1828 – 2018. godine za koje postoji preklapanje izmjera. ....	100
<b>Tablica 19.</b> Pokazatelji kvalitete linearnog modela za rekonstrukciju indeksa suše PDSI-a .....	104
<b>Tablica 20.</b> Popis najvlažnijih ( $\text{scPDSI} > 2.0$ ) i sušnih ( $\text{scPDSI} < -1.5$ ) godina .....	106



# 1. UVOD

Istraživanja silvidinamike prašumskih sastojina teorijska su podloga za razvoj modela prirodi bliskog gospodarenja šumama. Zbog antropogenog utjecaja tijekom povijesti očuvane prašumske sastojine su vrlo rijetke u Europi. U većini slučajeva nedostaju potrebni podaci za razvoj navedenih modela. Ovo je posebice istaknuto kod vrsta drveća koje nisu široko geografski rasprostranjene ili pak nisu temeljne gospodarske vrste kao što su vrste reliktnih borova. Trenutno najbolje očuvane prašumske sastojine crnoga bora (*Pinus nigra* J. F. Arnold) i munike (*Pinus heldreichii* H. Christ.) možemo pronaći na visokim predjelima dinarskih planina u Sloveniji, Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini, Crnoj Gori, Albaniji i Makedoniji. Unatoč visokoj očuvanosti i prirodnosti njihova silvidinamika i mehanizam prirodne obnove još uvijek nisu u potpunosti istraženi. Razlog tomu leži isključivo u činjenici da su teško dostupne, izolirane i u većini slučajeva zahtijevaju veliki istraživački napor.

Dosadašnja istraživanja pokazuju da se očuvane prašume crnoga bora i munike sastoje od stabala starijih od 500 godina, te se stoga s razlogom mogu smatrati rijetkima u širem europskom kontekstu.

Učestalost klimatskih ekstrema koji se ogledaju kroz jake i intenzivne suše, toplinske valove, razorne šumske požare pokrenute antropogenim promjenama klime predstavlja najveći izazov u šumarstvu. Šumski ekosustavi su složene cjeline koje su se kroz povijest na različite načine prilagođavale promjenama. Međutim, intenzitet klimatskih promjena u posljednjih nekoliko desetljeća znatno se ubrzao, a novonastali uvjeti za razvoj šumskih ekosustava se mijenjaju brzinom koja dovodi u pitanje mogućnost njihove prirodne prilagodbe. Opstanak i razvoj šumskih ekosustava ovise o stupnju prilagodbe i načinu gospodarenja koje nužno trebaju pratiti stupanj promjena i odgovora vrsta drveća na njih. Proučavanjem silvidinamike prašumskih sastojina crnog bora i munike na području jugoistočnih Dinarida nastoji se istražiti rasprostranjenost, dinamika te rast i razvoj, posebice u kontekstu prošlih uvjeta klime kako bi se donijele preporuke za gospodarenje i zaštitu ovih vrijednih ekosustava u uvjetima recentnih, ali i budućih promjena klime. Na osnovu dobivenih rezultata utvrdit će se sposobnost prilagodbe navedenih vrsta drveća klimatskim promjenama te predložiti praktični i primjenjivi šumskouzgojni modeli. Ovo istraživanje doprinijet će novim znanstvenim spoznajama o strukturi prašumskih sastojina crnoga bora i prašumskih sastojina munike, njihovoj silvidinamici i otpornosti na klimatske promjene.

Osim toga, poslužiti će kao teorijska podloga za razvoj modela prirodi bliskog gospodarenja šumama navedenih vrsta drveća u uvjetima klimatskih promjena.



**Slika 1.** Prašumska sastojina crnog bora na Zelengori **A**). Gospodarska sastojina crnog bora **B**) (Photo: S.Mikac, 2023).

## 2. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA

### 2.1. Rasprostranjenost i ekologija crnog bora i munike

Borovi u Europi najčešće pridolaze na marginalnim staništima planinskih i borealnih predjela, na suhim i plitkim tlima i geološkoj podlozi vapnenaca i dolomita. Pojava crnog bora i munike na kiselim tlima nije potvrđena. Iako mogu rasti na pogodnijim i bogatijim staništima, obično su potisnuti zbog konkurencije drugih vrsta i to prvenstveno onih koje podnose zasjenu. Nedostatak konkurentnih vrsta na staništima borova najvjerojatnije je rezultat ekstremnih stanišnih uvjeta. Druge vrste ne podnose tako suha, hranjivima siromašna i marginalna staništa.

Za vrstu *Pinus nigra* J. F. Arnold, poznatiju kao europski bor ili crni bor o kojem je u povijesti napisana opširna literatura, od samog početka opisivanja javlja se neujednačena nomenklatura vrste, podvrsta, varijeteta i formi.

Naziv *Pinus nigra* prvi put se pojavio 1785. godine (Vidaković 1965). Arnold je opisao crni bor i naveo da se do tada u njemačkoj literaturi ova vrsta smatrala kao varijetet običnoga bora koji je tada bio opisan. Kasnija istraživanja pokazala su da su pod imenom *Pinus nigra* obuhvaćeni borovi različitih staništa koji se međusobno razlikuju po morfološkim, anatomskim i drugim osobinama. Zbog toga je došlo do diferencijacije svojta crnog bora na više taksonomskih kategorija u sistematici. Tako prema autorima Debazac (1971), Quezel (1980) i Higgins i Richardson (1998) razlikujemo šest podvrsta crnog bora: *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franko koji se od prirode javlja u južnoj Francuskoj Španjolskoj, *Pinus nigra* subsp. *mauretanica* rasprostranjen u sjevernoj Africi, *Pinus nigra* subsp. *laricio* (Poiret) rasprostranjen na području Korzike, Sicilije i Kalabrije, *Pinus nigra* subsp. *dalmatica* (Visiani) Franko iz primorskog dijela Hrvatske, Crne Gore i Albanije i *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* (Lambert) Holomboe koji se rasprostire u istočnim i južnim dijelovima Balkanskog poluotoka, u Bugarskoj, Grčkoj i Makedoniji te na Krimu i Maloj Aziji.

*Pinus nigra* J. F. Arnold predstavlja grupu podvrsta borova sa širokim, ali veoma rascjepkanim arealom koji se prostire širom Europe od Španjolske do Male Azije sve do Cipra, Krete, Alžira i Maroka, pretežno u planinskim ili brdskim predjelima, na suhim i kamenitim terenima. Njegov areal se proteže između 5–38° istočne dužine i 35–48° sjeverne širine. Njegova prirodna rasprostranjenost seže od same obale mora gdje se nalazi u Hrvatskoj i u Italiji pa do 2 200 metara

na planini Taurus u Turskoj. Crni bor trenutno pokriva više od 3,5 milijuna hektara površine što ga čini jednom od najraširenijih vrsta četinjača na Balkanskom poluotoku i Maloj Aziji, Isajev (2003). Njegova najšira rasprostranjenost je u Turskoj i to više od 2,5 milijuna hektara (Enescu i sur., 2016).

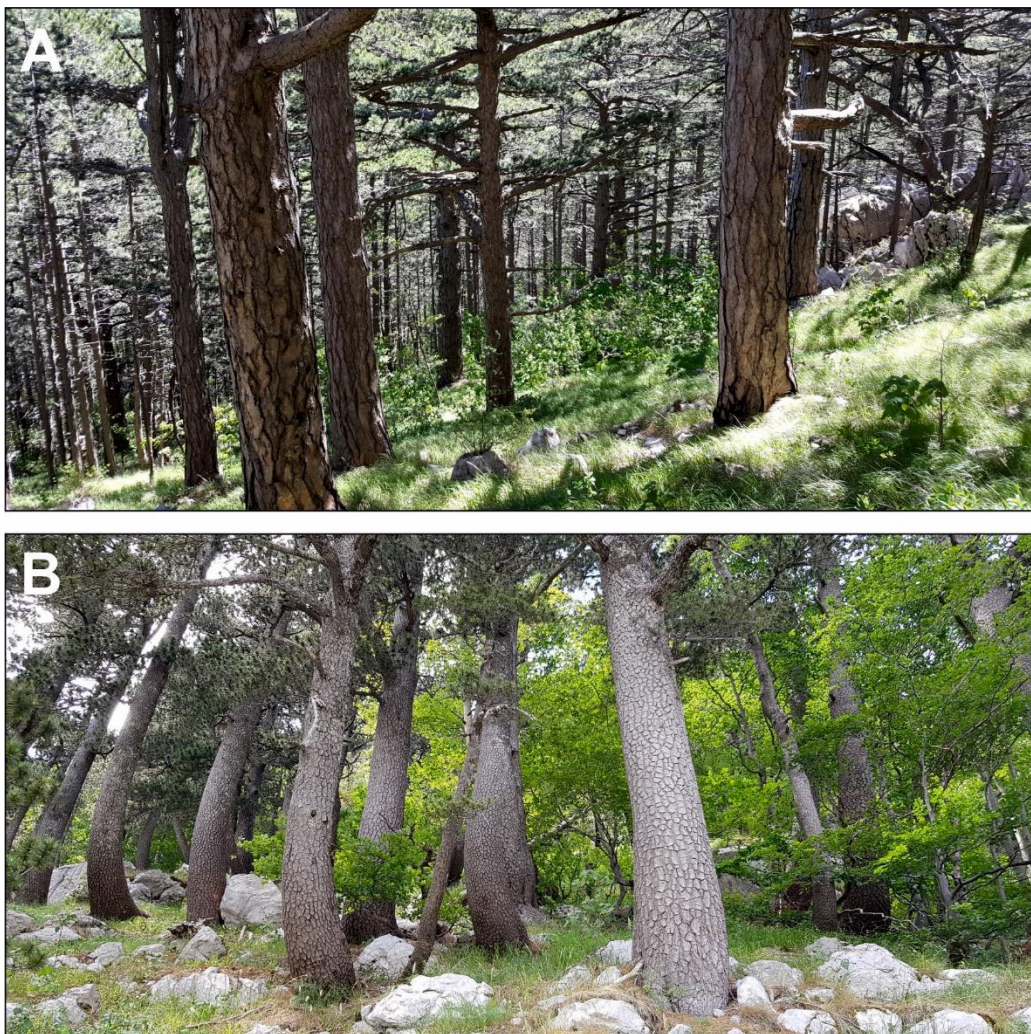
Širok i rascjepkan areal doveo je do morfoloških varijacija vrste koje je teško protumačiti i zbog koje je došlo do nekoliko različitih klasifikacija crnoga bora. O njegovom rasprostiranju u povijesti se relativno malo zna pa je s toga teško rekonstruirati njegovu distribuciju i kretanje. Zna se da je u Tercijaru bio rasprostranjeniji nego danas te da se postepeno povlačio iz priobalnih predjela u svoje trenutne planinske predjele gdje suha i hladna klima podsjeća na prošle glacijalne periode. Migracijska kretanja koja su se dogodila između glacijalnih perioda doprinijela su pojavi različitih hibridnih populacija koje su se kasnije genetski izolirale doprinoseći tako teškoj taksonomskoj karakterizaciji ove vrste (Afzal-Rafii i Dodd 2006). Lokalizirane studije koje se baziraju na mikrofosilima potvrdile su da je crni bor bio prisutan u sjeverozapadnom mediteranskom slivu u razdoblju kasnog pleistocena i holocena. Zbog sve toplije klime početkom holocena populacije crnoga bora znatno su se smanjivale tijekom cijelog razdoblja. Današnjem prirodnom rasprostranjenju crnoga bora koje je rascjepkano i ograničeno na planinske predjele najvećim dijelom doprinijeli su događaji iz prošlosti kao što je antropogeni utjecaj koji je zbog prekomjernog iskorištavanja drva doveo do nestanka borovih šuma na pojedinim mjestima kao i pojava invazivnih alohtonih vrsta drveća koje su bile konkurencija borovima i neizostavno klimatske promjene koje su utjecale na povlačenje borova u više predjele (Barbet-Massin i sur., 2012). Povećanje temperature i suše mogu prouzročiti pojavu vodnog stresa na području Mediterana i šire što će se odraziti na razvoj i distribuciju crnog bora u budućnost. Kao rezultat klimatskih promjena smatra se da će se distribucija crnog bora u budućnosti mijenjati mada će se rezultati razlikovati u ovisnosti od regije do regije (Barbet-Massin i sur., 2012).

Crni bor (*Pinus nigra* J. F. Arnold) jedna je od najzastupljenijih i najrasprostranjenijih vrsta borova i četinjača uopće na području Mediterana, Balkana i Male Azije. Prirodno pridolazi u planinskim područjima na suhim i kamenitim terenima na različitim vrstama tala, od pjeskovitih, podzolastih do vapnenačkih crnica. Zauzima suhe i otvorene položaje kao izraziti heliofit i pionir. Prašumske sastojine su naizgled jednolične i jednodobne bez pomlatka što upućuje na postanak sastojina nakon požara. Dosadašnja istraživanja prašuma crnoga bora na području Dinarida su rijetka i nesustavna, ali ukazuju na golemi potencijal ovog područja za stvaranje dugih, klimatski osjetljivih



kronologija za potrebe rekonstrukcije prošlih klimatskih uvjeta te rekonstrukcije dinamike prašumskih sastojina i prirodnih nepogoda čak i do 1000 godina unatrag.

Recentna istraživanja ukazuju da je crni bor na području Dinarida osjetljiv na sušni stres (Poljanšek i sur., 2012), visoke temperature zraka (Levanič i sur., 2015), intenzivne ljetne suše (Levanič i sur., 2013) i prirodne požare (Nagel i sur., 2017a). S obzirom na to da su požari sastavni dio dinamike prašumskih sastojina borova pretpostavka je da su požari uglavnom nastali od udara groma. Međutim, potrebno je provesti detaljnije rekonstrukcije požara kako bi se okarakterizirao požarni režim u prašumskim sastojinama.



**Slika 2.** Prašumska sastojina crnog bora na Sjevernom Velebitu **A)** i sastojina munike na Orjenu **B)** (Photo: S.Mikac, 2018.).

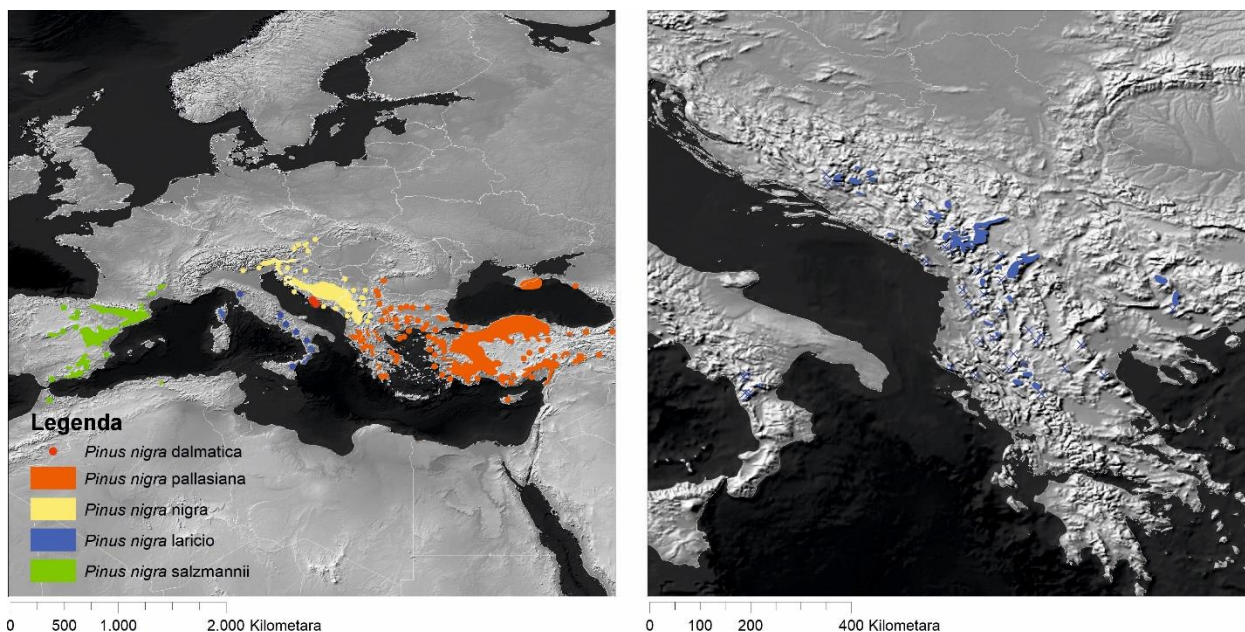
*Pinus heldreichii* H. Crist, munika ili bosanski bor je endem i tercijarni relik. Prvi znanstveni naziv ovoj vrsti dao je švicarski botaničar Christ 1863. godine. On je, proučavajući porodicu borova, naišao na primjerke jedne vrste borova koje je na tesalskom Olimpu prikupio botaničar Th. Heldreichi. U isto vrijeme botaničar Franjo Maly sakupljao je biljni materijal na planini Orjen i naišao na sastojine njemu nepoznatog bora koji je kasnije na osnovu sakupljenog materijala opisao bečki botaničar Antoine i dao mu ime *Pinus Leucodermis*. Kasnije Christ piše da se u stvari radi o istoj vrsti drveta Fukarek (1966).

Areal rasprostranjenja munike smješten je u izoliranim populacijama pretplaninskog vegetacijskog pojasa na Balkanskom poluotoku i južnoj Italiji, Franjić (2005), Vidaković (1965). Sjeverna granica areala primaknuta je obalama Jadranskog, Jonskog i Egejskog mora i proteže se po planinskom lancu kome je početak na Prenju i Čvršnici u Hercegovini te ide sjevernom Crnom Gorom, prelazi Prokletije zatim Šar planinu, Perister gdje skreće na istok i prelazi vijencem Nidže na Pirin, Rilu i Rodope. Odavde se ova granica prekida tako da izvan područja koje je ograničeno sa istoka i sjevera i koje se od Peristera odnosno Galičice pruža na jug do ispod planine Pinda, imamo dvije sasvim odijeljene skupine staništa, i to skupinu na Pirinu i Ali Botušu u Bugarskoj te skupinu na tesalskom Olimpu. Zapadna granica areala sasvim je primaknuta obalama Jadranskog i Jonskog mora. Ona ide sa sjevera na hercegovačkim planinama Čabulji i Prenju, prolazi sredinom Crne Gore prelazi na južne obronke Komova, zatim prolazi Albanijom preko Elbasana i Berata, te na jugu zaokružuje planinu Pind. Kao što je bio slučaj kod istočne granice areala, i ovdje imamo dvije grupe staništa van ovih povučениh granica, i to staništa na Orjenu i Lovčenu i staništa u Akrokeraunskim planinama, južno od Valone. Ovako prihvaćen areal munike sastoji se iz jednog centralnog dijela i četiri odijeljene grupe staništa. K tome treba još dodati staništa u Kalabriji i Bazilikati u Južnoj Italiji, koja se jedino nalaze van Balkanskog poluotoka i koja su istovremeno najzapadnija staništa munike. Iz navedenog proizlazi, da je centralni areal munike jedan relativno uski pojas, koji se proteže paralelno sa obalama Jadranskog i Jonskog mora, na većoj ili manjoj udaljenosti od morske obale. U pogledu sjeverne, odnosno za muniku i istočne granice areala, ona ne označuje samo termičku granicu već i zonu različite vlažnosti. U ovom području uslijed blizine mora kiše su obilnije i češće nego u sjevernijim kontinentalnim predjelima, Fukarek (1966).

Munika je vrsta koja se javlja samo na velikim visinama i to od 900–2 500 metara nadmorske visine (Bucci i sur., 1997). Raste na suhim i osunčanim terenima, krševitim i teško pristupačnim



dosežući gornju granicu vegetacije. Munika nalazi optimalne uvjete uspijevanja u prelaznim kontinentalno mediteranskim (submediteranskim) predjelima. Ovakva staništa su visoke planine uz samu morsku obalu i oni planinski predjeli koji se nalaze iznad dubokih riječnih dolina mediteranskih pritoka. Zahtjevi ove vrste drveta za kakvoćom zemljišta vrlo su skromni, odnosno njena je sposobnost da raste i da se razvija u takvim uvjetima gdje ostalo šumsko drveće ili uopće ne opstaje ili se razvija u kržljave oblike. Pojava munike je usko vezana za vapnenačku podlogu. Na svim staništima munike na Balkanskom poluotoku ona dolazi na podlozi trijadičkih i juriskih vapnenaca i dolomita. Munika je vrsta koja je prilagođena na ekstremne stanišne uvjete te danas, kada je problem pošumljavanja krša postao neobično važan, jer su posljedice obešumljavanja vrlo teške, vrijednost munike, na određenim staništima, pojavljuje se u sasvim drugom pogledu. Za pošumljavanje viših planinskih predjela, u kojima nastanak gologa Krša ima najteže posljedice, možda nema prikladnijeg drveta od munike.



**Slika 3.** Recentna geografska rasprostranjenost podvrsta crnoga bora (lijevo) i bora munike (desno) (izvor: Caudullo i dr. 2017)

## 2.2. Silvidinamika sastojina crnoga bora i munike

Proučavanje dinamike prašuma znači proučavanje promjena koje se javljaju tijekom vremena i sukladno tome proučavanje uzroka promjena, ali i odgovora ekosustava na promjene. Dinamika prašuma je pojam koji označava promjenjiv proces koji je podložan varijacijama koji je specifičan određenoj vrsti drveća, njihovoj starosti, uvjetima staništa i klime, interakciji vrsta i naravno ljudskoj aktivnosti (Oliver i Larson 1996).

Proces ravnoteže u prašumskim ekosustavima traje jedan određeni vremenski period, dok je proces destrukcije (poremećaja) konstantna pojava i prašuma kao takva rijetko dostiže stanje ravnoteže (Oliver i Larson 1996). Poremećaji su najvažniji događaji koji tijekom vremena utječu na sastav vrsta (kompoziciju), strukturu sastojine i dinamiku pomlađivanja prašuma, (White 1985). Razlikujemo prašume koje su nastale nakon većih i intenzivnijih poremećaja nakon kojih se inicira pojava nove šumske sastojine od poremećaja umjerenog intenziteta nakon kojih se mijenja biomasa u sastojini. Prašuma može biti pogođena poremećajima koji variraju između ova dva krajnja intenziteta. Proces dinamike u prašumi podstaknut stvaranjem progala manjih razmjera prevladava u nekim šumama i ove šume su stabilne na nivou sastojine dugi vremenski period, (Runkle 1981).

Progale su glavni pokretači dinamike prašumskog ekosustava (Schliemann i Bockheim 2011). Progale sklopa (eng. *Canopy gaps*) su definirane kao mjesta u prostoru čiji je rezultat naglo i destruktivno odumiranja jednog ili većeg broja nadstojnih stabala i gdje je došlo do trajnog prekida sklopa (Whitmore 1989). Takvi trajno nastali otvori sklopa posljedica su sustava prirodnih poremećaja. Nakon otvaranja progale sklopa dolazi do naglih promjena ekoloških uvjeta čime se unutar progale oblikuju posebni mikroklimatski i mikrotopografski uvjeti (Belsky i Canham 1994). Poremećaji koji su glavni pokretači dinamike šuma mogu nastati prirodnim ili antropogenim djelovanjem. Prirodne poremećaje izazivaju abiotički i biotički čimbenici uključujući požare, suše, ledolome, vjetrolome, bujične tokove, klizanja tla, kukce, gljivična oboljenja, kao i nekontrolirano širenje alohtonih vrsta drveća i korova.

Požari su najveći, najučestaliji i najvažniji uzročnici prirodnih poremećaja u reliktnim sastojinama borova (Vacchiano i sur., 2017). Oni imaju važnu ulogu u njihovoj silvidinamici. Ovu tezu na području Alpa, Dinarida, Pirineja i Balkanskog Poluotoka potvrdili su (Bebi i sur., 2009); (Nagel i sur., 2017a); (Panayotov i sur., 2017).

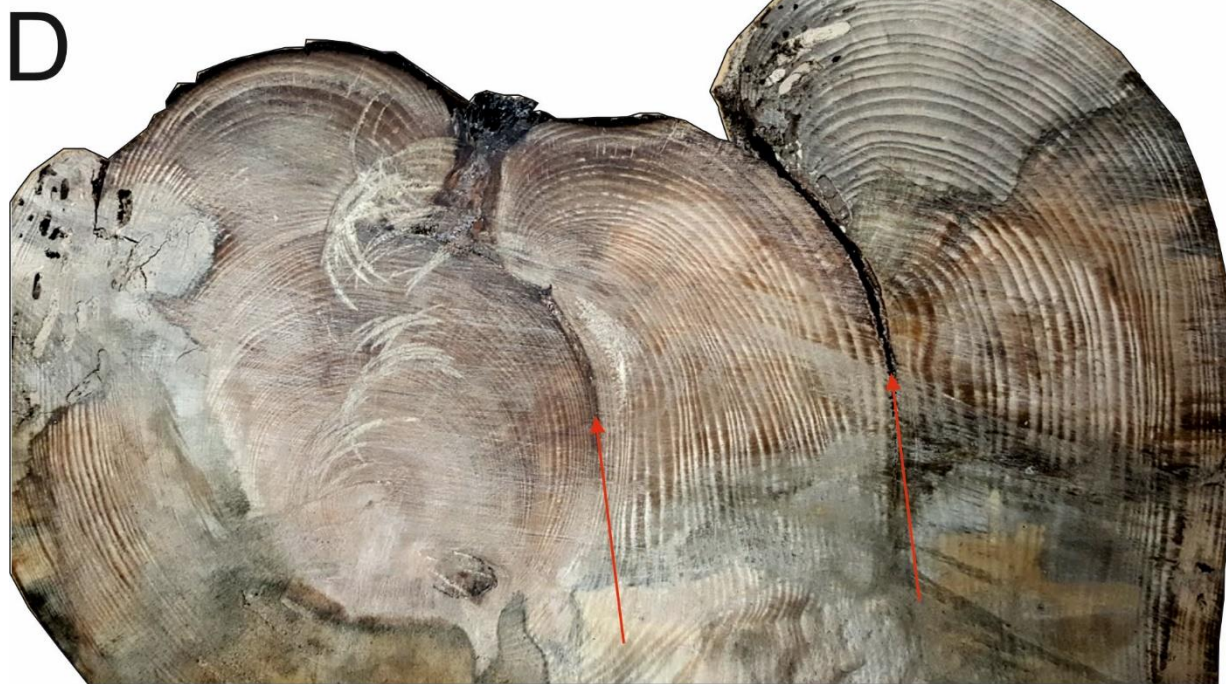
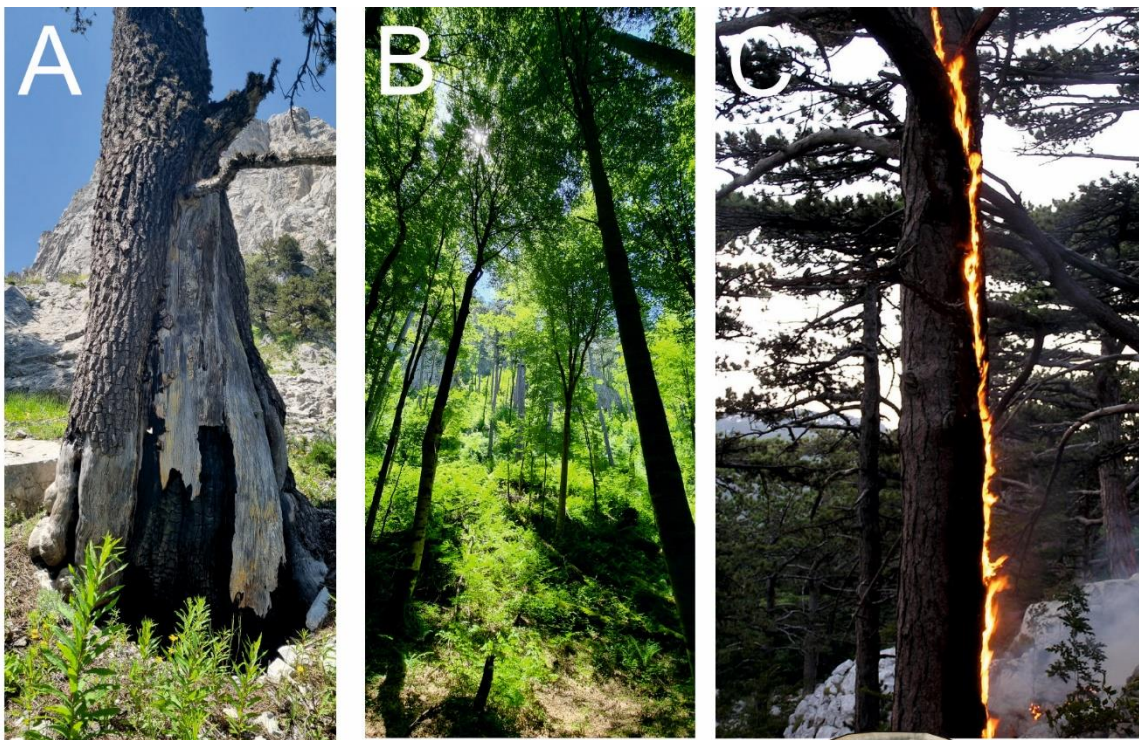


Požari i vrste iz roda *Pinus* neraskidivo su vremenski i prostorno povezani. Požari su velikim dijelom bili odgovorni za pridolazak i prilagodbu borova kao i njihovu široku rasprostranjenost u prirodnom području sjeverne hemisfere, ali su imali i važnu ulogu u proširivanju na južnu hemisferu kao alohtone vrste. Zašto su borovi toliko rašireni zahtijeva razumijevanje evolucionarne veze između borova i požara kao i u mnogome koja vrsta požara je bila u interakciji sa ovim dominantnim rodovima porodice *Pinaceae*. Požari, dio ekologije borova, postojali su na zemlji stotinama milijuna godina, iako je njihov uzrok varirao vremenski i prostorno. Razlikuju se prirodni i kulturni izvori nastanka požara.

Najzastupljeniji prirodni čimbenik koji uzrokuje požar jeste udar groma odnosno električno pražnjenje atmosfere. Mnogi udari groma se dešavaju između oblaka pa tako da rijetki udari groma sa dovoljno zapaljive energije mogu izazvati požar (Slika 4C). Požari izazvani prirodnim uzročnicima su izražajni na suhim i toplim staništima i izloženijim ekspozicijama.

Danas se raspravlja o tome koliko dugo ljudi kontroliraju vatru na zemlji. Iz ranih zapisa sa afričkog kontinenta evidentno je da kult logorske vatre datira više od milijun godina unazad (Brain i Sillent 1988). Mala je sumnja da je čovjek imao značajniji utjecaj na vegetaciju od kada su se počeli koristiti vatrom. U Europi ljudi su vatru počeli koristiti prije oko 400 tisuća godina dok u Sjevernoj Americi ova pojava je zabilježena tek prije 30 tisuća godina (Pyne 1982), (Prodon i Athias-Binche, 1987). Usprkos izraženom utjecaju čovjeka u mnogim područjima, skorije zagrijavanje zemljine atmosfere i klimatske promjene doprinijeli su povećanju broja šumskih požara i njihovoj učestalosti, pogotovu u subalpskom pojasu (Seidl i sur., 2011).

Gospodarenje borovim šumama uzimajući u obzir efekte požara na dinamiku razvoja šume zahtijeva znanje o učestalosti i rasprostranjenosti požara i njihovoj svezi s potencijalnim uzročnicima kao što su klima i utjecaj čovjeka. Niski požari u borovim šumama koji zahvaćaju niski travni i vegetacijski pokrivač na površini tla česta su pojava u borovim šumama i kao takvi ne nanose letalne štete na živim stablima. Ožiljci od požara (eng. *Fire scars*) ove vrste ostaju na kambijalnom dijelu odmah ispod kore drveta (Slika 4A, D). Na osnovu ovih ožiljaka mogu se vrlo uspješno rekonstruirati i odrediti pojava požara tijekom povijest (Swetnam i sur., 2009). Studija dinamike požara, rađena na crnom boru u Grčkoj sadrži zapis o požarima na području planinskog masiva Pindus od ranog 13. do kasnog 19. stoljeća gdje je zabilježeno ukupno 14 požara u tom razdoblju, dok se na uzorcima pojedinih stabala bilježi od jednog pa do osam ožiljaka od požara (Touchan i sur., 2012).



**Slika 4.** Tragovi požara na pridanku stabla munike A, opožarena površine 2012. godine u sastojini crnoga bora B i C, Prikaz ožiljaka od požara na presjeku stabla crnoga bora na kojemu su vidljivi tragovi dva požara (označeno crvenim strelicama) D (Photo: S.Mikac 2020).



Klimatske promjene direktno utječu na učestalost i intenzitet požara. Kao rezultat klimatskih promjena predviđa se pojačan intenzitet i učestalost prirodnih požara u narednih 100 godina. Topliji i suši uvjeti, zajedno sa promjenom režima požara smanjit će otpornost postojećih šumskih ekosustava što će dovesti do promjena strukture samih ekosustava (IPCC 2023).

Crni bor i munika su vrste sa izraženom sposobnosti oporavka od šumskih požara u čemu je najvećim dijelom zaslužna ekologija ovih vrsta koje podnose ekstremne stanišne uvjete te staništa sa minimalnim količinama vode i visokim temperaturama zraka. Izražajno debela kora kod obje vrste borova igra značajnu ulogu u otpornosti na požare nižeg intenziteta (Slika 5). Borovi su kroz povijest naseljavali ekstremna staništa te je sudeći po svemu pretpostavka da ove dvije vrste imaju predispozicije da na najbolji način odgovore klimatskim promjenama i da im se kao takve prilagode.



**Slika 5.** Uzorak iz stabala crnoga bora sa korom sa lokaliteta Crna Poda (Photo: S.Mikac 2023).

Borovi su rasprostranjeni na staništima koja su podložna požarima, od okruženja koja pogoduju razvoju niskih požara koji se razvijaju na samoj površini tla i koji se u borovim šumama javljaju često do onih okruženja koja pogoduju razvoju požara koji zahvaćaju krošnje stabala, odnosno visokih požara koji se rjeđe javljaju (Keeley i Zedler, 1998).

Počevši od krede, borovi su bili prisutni na staništima podložnima požarima i tako se prilagođavali na režim povremenih požara (Keeley i Zedler, 1998). Poremećaji izazvani požarima smanjili su konkurenciju drugih vrsta te su borovi dominirali na takvim staništima. Pogrešno bi bilo smatrati

borove prilagodljivim požarima i vatri, nego bi se moglo reći da su borovi kroz povijest prilagođeni određenom požarnom režimu. Iako ne postoje dva krajolika koja imaju potpuno isti požarni režim (Keeley i sur., 2009) dva su prepoznatljiva režima požara i to režim niskih, površinskih požara i režim visokih, krunskih požara. Crni bor i munika se mogu svrstati u vrste drveća koje su prilagođene režimu niskih požara. Obje vrste razvijaju krošnju na dovoljnoj visini iznad šumskog tla te tako sprječavaju vatri da dopre do krošnji. Drugi važan čimbenik je debela kora koja štiti kambijalno tkivo od prodiranja vatre i šoka koji izaziva visoka temperatura. Efikasno čišćenje od odumrlih grana stvara značajan prostor između površine tla i krošnje što sprječava širenje vatre u krošnje stabala. Dendrokronološke studije koje proučavaju ožiljke od požara pokazuju da su borovi u prošlosti bili izloženi požarima koji su se ponavljali i pružaju nam podatke o frekvencijama tih požara kao i činjenicu da su bili dovoljno niskog intenziteta da je drveće moglo preživjeti ponovljene požare.

Požari su važan ekološki čimbenik u razvoju crnog bora i munike i povremena pojava požara u ovim šumama pogoduje obnovi ovih vrsta. Nakon niskog požara tlo ostaje čisto od konkurentske vegetacije kao i šumske prostirke sastavljene pretežno od borovih iglica koje se nekad natalože u debelom sloju i tako onemogućavaju dospijevanje sjemena do zemljišta. U istraživanjima obnove crnog bora koja su vršena na jugoistoku Grčke na površinama neposredno poslije visokih požara zaključeno je da je broj požara koji je zadesio istraživano područje negativno utjecao na gustoću obnove dok je prisutnost paprati koja se obnovila nakon požara imala pozitivan učinak na brojnost pomlatka. Najvažnija u obnovi crnog bora nakon požara bila je udaljenost neizgorjelih površina šume sa kojih će potencijalno sjeme dospjeti na opožarenu površinu (Christopoulou i sur., 2014). Dendrokronološka istraživanja rađena u istočnoj Španjolskoj u sastojinama crnog bora pokazuju da stabla bilježe 11 ožiljaka u godinama požara u 176 godina gdje je najkraći interval između dva uzastopna požara dvije godine, dok je najduži pedeset sedam godina. Godine u kojima su zabilježeni požari nisu povezane sa sušnim periodima već vjerojatno sa tradicijom paljenja površina zbog ispaše. Istraživana šuma u Španjolskoj pruža dokaze o raznodobnoj strukturi šume kao posljedici brojnih površinskih požara tijekom nekoliko stoljeća (Fulé i sur., 2008). Povijest režima požara u šumama crnog bora u Turskoj oblasti Anatolija pokazuje da su požari povezani sa sušnim godinama što se pokazalo na dva od ukupno tri istraživana lokaliteta te da se učestalost požara u Turskoj smanjila od početka dvadesetog stoljeća što se povezuje sa zakonskom regulativom ove zemlje o suzbijanju požara (Şahan i sur., 2021). U sjeveroistočnoj Španjolskoj

vršeno je istraživanje obrazaca obnove između ostalih vrsta i crnog bora nakon visokih požara velikih razmjera. Uočeno je da oporavak borova poslije velikih požara nije uvijek uspješan te da crni bor gotovo nestaje sa površine koja je bila zahvaćena požarom. Modeli simulacije pokazuju da trideset godina nakon požara površine kojima su dominirali borovi u 77–93% mijenjaju se nakon požara u zajednice u kojima dominiraju hrastovi (*Quercus ilex*, *Quercus cerrioides*). Također postoji znatan broj parcela koje kasnije obrasta grmlje (7–16%). Ovi pokazatelji govore da veliki požari koji su se znatno povećali u mediteranskoj regiji u zadnjim desetljećima mogu ugroziti opstanak borova (Retana i sur., 2002).

Prirodna povijest i dinamika obnavljanja šuma munike te kako na obnovu utječe režim prirodnih poremećaja, nisu dovoljno razjašnjeni. Ožiljci od požara koji se datiraju dendrokronološkim istraživanjima pokazuju da požari imaju važnu ulogu u dinamici i obnovi šuma munike. Međutim vrlo mali broj istraživanja je proveden na ovu temu. Istraživanje rađeno na planini Pirin u Bugarskoj pokazuje da su na skoro 30% uzorkovanih stabala zabilježeni ožiljci od požara i datirane godine u kojima se dogodio požar te da je do 83% stabala nakon požara imalo suzbijen rast. Na istom lokalitetu utvrđena su dominantna stabla starosti oko 250 godina i pojedinačna stabla od 500 godina starosti, dok se pomladak pojavljuje na raspadnutim ostacima stabala (Vasileva i sur., 2013). U istraživanju u Bazilikati u jugoistočnoj Italiji utvrđena je pojava generacija munike i to skoro na svakih 200 godina što implicira da se u većem obujmu munika obnavlja nakon dužih vremenskih intervala. Ovaj podatak se povezuje i sa ispašom na tom području koja je kroz povijest mogla ugroziti opstanak pomlatka (Todaro i sur., 2007).

Osim požara na drugom mjestu možemo staviti štetne kukce kao pokretače prirodnih poremećaja. Gradacije potkornjaka, defolijatora pogađaju šume širom Europe u kojima dominiraju smreka, borovi, jela, hrast i druge vrste. Potkornjaci su najrašireniji uzročnik sušenja šuma izazvanih kukcima i to onih koji napadaju smreku (Anderegg i sur., 2013). Na Balkanu, a i širom kontinenta značajna vrsta koja napada borove i javlja se u gradacijama izazivajući prirodne poremećaje jest *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Ustaljeno pravilo je da se gradacija kukaca događa nakon suše ili neke druge klimatske nepogode kada uslijed djelovanja klimatskog čimbenika šuma oslabi fiziološki i kao takva postaje pogodna sredina za napad kukaca i drugih biotičkih čimbenika. Značajni prirodni poremećaji izazvani napadom kukaca zabilježeni su na planinskim masivima širom Europe gdje se smatra da bi niske temperature i slab sklop šume trebao spriječiti pojavu ovakvih događaja (Stadelmann i sur., 2013) (Thom i Seidl 2016) (Holeksa i sur., 2016). Ovakvi

navodi ukazuju da su napadi kukaca usko povezani sa djelovanjem vjetra na planinskim masivima (Kulakowski i sur., 2017a) (Seidl i sur., 2016). Postoji jasan trend u zadnjih nekoliko desetljeća sve većih i učestalijih pojava gradacije kukaca što se u najvećoj mjeri može povezati sa klimatskim promjenama i stvaranjem povoljnih uvjeta za razvoj kukaca na većim nadmorskim visinama.

Prirodni poremećaji izazvani vjetrom unazad nekoliko stoljeća predstavljaju najučestalije i sveprisutne pojave. Vjetar izaziva vjetrolome i vjetroizvale koji se uglavnom javljaju ciklički, u određenim vremenskim periodima. Poremećaji izazvani vjetrom naročito su izraženi u planinskim predjelima među kojima postoje razlike u intenzitetu i jačini vjetra kao i progalama koje nastaju nakon udara vjetra. Na području Dinarida izražene su česte ljetne oluje praćene vjetrom nakon kojih nastaju manje progale. Za razliku od ljetnih, zimske oluje praćene vjetrom u planinskim predjelima Centralne i Sjeverozapadne Europe pogađaju veće površine šuma nego ijedan poremećaj izazvan nekim drugim prirodnim čimbenikom (Nagel i sur., 2017a; Panayotov i sur., 2017). Analiza mjerenja godova pokazuje da su česti poremećaji velikih razmjera izazvani vjetrom postojali unazad nekoliko stoljeća u svakom planinskom području širom Europe (Holeksa i sur., 2016; Panayotov i sur., 2017).

Značajne štete u šumama pričinjavaju snijeg i led koji izazivaju snjegolome i ledolome, a značajna pojava je i pokretanje velikih količina snijega s uzvišenih planinskih vrhova poznata kao lavina. Sve ove pojave stvaraju progale u šumama na manjim ili značajnijim površinama. Značajne štete izazivaju snjegolomi širom Europe pogotovu kada drveće nije adaptirano na vlažan i težak snježni pokrivač (Kulakowski i sur., 2017a; Hlásny i sur., 2011). Također padavine u obliku ledene kiše izazivaju značajne štete širom Europe (Nagel i sur., 2017b). Lavine su primarno kontrolirane topografskim uvjetima i klimom. U zadnjih nekoliko desetljeća kada se temperatura povećala na globalnoj razini svjedoci smo sve manjeg snježnog pokrivača koji je uzročnik pojave lavina.

Jačina i intenzitet prirodnih poremećaja varira u svim šumskim ekosustavima širom Europe. Pojava prirodnih poremećaja nije izvan prirodnog procesa varijabilnosti šumskih ekosustava, niti se može reći da prijeti postojanju i širenju šumskih ekosustava. Ovaj navod potkrjepljuje činjenica da se nakon neke prirodne katastrofe šumski ekosustavi intenzivnije obnavljaju na progalama nastalim djelovanjem nekog prirodnog klimatskog čimbenika (Kulakowski i sur., 2017b) što je dokaz prirodne dinamike šuma.

### 2.3. Klimatske promjene

Globalne promjene klime utječu na rast i rasprostranjenost svih vrsta drveća pa tako i crnog bora i munike. Pod pojmom klimatske promjene podrazumijevamo statistički značajne promjene srednjeg stanja ili varijabilnosti pojava koje traju desetljećima i duže. Varijabilnost klime može biti uzrokovana prirodnim čimbenicima unutar klimatskog sustava, te vanjskim čimbenicima kao što su prisustvo čestica izbačenih vulkanskim erupcijama, prisustvom pijeska iz pustinja ili ljudskim aktivnostima posredstvom kojih su u atmosferi prisutni staklenički plinovi u povećanim vrijednostima koji imaju glavnu ulogu u povećanju zagrijavanja atmosfere (Cindrić i sur., 2018). Klimatske promjene na direktan ili indirektan način utječu na ljudsku populaciju i sve ekosustave na planetu Zemlji. To su promjene koje se manifestiraju sveukupnim porastom razine temperature zraka i značajnom promjenom rasporeda i količine oborina (IPCC 2023; Gao i Giorgi 2008). Pored navedenog, klimatske promjene praćene su povećanom frekvencijom ekstremnih događaja (poplave, suše, razorni vjetrovi, mega požari koji su glavni uzročnik prirodnih nepogoda ( Beniston i sur., 2007 ; Lenderink i van Meijgaard 2008). Skorašnje globalno zagrijavanje sa tendencijom povećanja vrijednosti prijeteći ugrožavanju hidrološkog režima koje implicira kasnije ekološke promjene. Klimatske promjene i ekstremni događaji imat će sve veći i izražajniiji utjecaj na područjima osjetljivim na sušu i gusto naseljenim područjima. Jedan od takvih je svakako područje Mediterana gdje su borovi široko zastupljene vrste drveća (Büntgen i sur., 2011; IPCC 2023). Mediteranska regija bit će posebno osjetljiva na predviđeno povećanje temperature i smanjenje oborina, što će vjerojatno rezultirati pojačanim sušnim ekstremima koje će se manifestirati u epizodama (Gao i Giorgi 2008). Sve veća učestalost ekstremnih požara u prošlim desetljećima posljedica su klimatskih promjena. Karakter i intenzitet takvih požara prijeteći opstanku crnog bora i munike na pojedinim staništima. Iako je dokazano da ove vrste borova u svom životnom dobu mogu preživjeti veliki broj požara te da se takvi događaji ne odražavaju bitnije na rast i razvoj ovih vrsta ipak ekstremni požari koji zahvaćaju krošnje stabala i javljaju se na velikim površinama dovode do pustošenja i nestajanja ovih vrsta. Požari u borovim šumama imaju značajnu ulogu u dinamici i razvoju ovih vrsta, međutim radi se o adaptiranosti crnog bora i munike na pojedine režime požara (prizemne – niske požare) koji su sastavni ekološki čimbenik i zabilježeni su kroz povijest. Treba razlikovati ovu vrstu i režim požara koji je sastavni dio ekologije ovih vrsta drveća

te rasta i razvoja borova od ekstremnih događaja koje izazivaju ekstremni požari koji se povezuju s klimatskim promjenama.

## **2.4. Dosadašnja istraživanja**

Malo je znanstvenoistraživačkih studija istraživalo dinamiku prirodnih sastojina crnog bora i munike na području Dinarida. Rijetka istraživanja na crnom boru i munici u Europi su se u najvećem broju temeljila na istraživanjima odgovora na klimu odnosno klimatskog signala koji je naročito izražen kod obje vrste. Ova istraživanja su svakako značajno doprinijela poboljšanju razumijevanja i povezivanja varijabilnosti klimatskih čimbenika na regionalnoj i globalnoj razini.

### **2.4.1. Dendrokronološka istraživanja**

Rekonstrukcija ljetnih temperatura za područje Mediterana rađena je na osnovi analiza gustoće kasnog drva crnoga bora za period 1675.–1980. godine koja pokazuje ekstremne događaje u prošlosti kao što su najhladnija godina (1740.) i najtoplija (1945.). Ekstremno hladan period (1810. godina) odražava stanje klime u Europi kao i na globalnoj razini što se može povezati sa aktivnostima vulkanskih erupcija i solarnom aktivnosti (Trouet 2014).

Na području Rumunjske do sličnih rezultata došli su (Levanič i sur., 2013) na osnovu analize širine godova crnoga bora gdje su utvrdili ekstremno sušne godine (1725. i 1782. kao i 1946.). Period od 1800.–1900. godine zabilježen je kao period blage klime sa neznatnim ekstremima, dok je period 1900.–2009. godine prikazan kao nestabilan period sa velikim brojem kišnih i sušnih ekstrema. Generalno govoreći u istraživanjima rađenim na području Balkanskog poluotoka utvrđena je značajna osjetljivost munike o ljetnim oborinama, kao i to da je munika u drugoj polovini dvadesetog stoljeća pokazala veću osjetljivost na ljetnu sušu, što se može povezati sa povećanjem temperature i smanjenjem zimskih oborina koje se bilježe od druge polovine dvadesetog stoljeća (Panayotov i sur., 2010). Istraživanje provedeno u Španjolskoj ukazuje na prilagodbu crnoga bora na uvjete nedostatka vode i ekstremnih stanišnih prilika u odnosu na druge vrste (Martín-Benito, i sur., 2010). Na području Slovenije, u ispitivanjima koristeći metodu refleksije plavog spektra (BI) na crnom boru pokazalo se da crni bor pokazuje značajan klimatski signal na oborine u periodu svibnja i lipnja u korelaciji sa ranim drvom te prosječnom mjesečnom temperaturom za period od lipnja do kolovoza u korelaciji sa kasnim drvom (Poljanšek i sur., 2012). Koristeći se izračunom širine godova i odnosa ugljikovog izotopa  $\delta^{13}\text{C}$  u godovima munike na području istočne Crne Gore



(Levanič i sur., 2020) došlo se do rezultata da munika ima veliki potencijal za razvijanje dugih kronologija iz živih stabala te da je klimatski signal slab. Razvijena je kronologija koja pokriva period od 1571.–2013. godine. Mjerenja širine godova su pokazala da je signal koji se odnosi na temperaturu zraka slab, dok signal za oborine ne postoji. Kompozitna kronologija dobivena koristeći se ugljikovim izotopom  $\delta^{13}\text{C}$  pokazuje jak signal povezan sa prosječnim mjesečnim temperaturama zraka za mjesec lipanj, srpanj i kolovoz. Klimatski signal se poboljšava kada se lipanj, srpanj i kolovoz spoje u sezonsku varijablu. Klimatski signal za temperaturu, oborine i oblačnost koristeći se ugljikovim izotopom  $\delta^{13}\text{C}$  je stabilan. Kada je u pitanju obnova, rast i razvoj sastojina crnoga bora, rezultati istraživanja na području zapadne Bosne pokazuju da je obnova najzastupljenija u ciklusima te da se javlja na točkama gdje prosječna krivulja sunčane aktivnosti pokazuje najmanje vrijednosti, dok u isto vrijeme prosječna krivulja prirasta pokazuje najveće vrijednosti. Prirodni požari koji su se javljali u prošlosti nisu utjecali na dinamiku i razvoj sastojina crnoga bora. Različita dinamika rasta koja se ogleda u prilično različitim visinama i promjerima stabala u sastojini ukazuje na veliku individualnu i populacijsku raznolikost crnoga bora (Accetto 1979). Na području Basilikate u jugoistočnoj Italiji rađena su dendrokronološka istraživanja na munici gdje je ispitivana širina godova odvojeno za rano i kasno drvo te gustoća smolnih vrećica na cijeloj širini goda. Razvijena je kronologija od 1464.–2003. godine. Uočen je pad u širini godova nakon 1950. godine koji se povećao do 1981. godine. Također od 1953.–2000. godine čini se da je munica pogodovalo povećanje temperature zraka i smanjenje obima oborina. Tijekom dvadesetog stoljeća radijalni rast godova ne pokazuje pouzdan klimatski signal (Todaro i sur., 2007).

#### **2.4.2. Istraživanja strukture i pomlađivanja**

Istraživanja u prašumskim sastojinama crnoga bora na dva lokaliteta u Sloveniji i Bosni i Hercegovini pokazala su da je u sastojinama zastupljena nepravilna raznodobna struktura sa nekoliko perioda intenzivnog pomlađivanja za koje autori pretpostavljaju da su posljedica prirodnih požara. Datirani su požari na obje lokacije 1947. i 1969. godine, a postojali su i dokazi o pomlađivanju nakon požara (Nagel i Cerioni 2023). Ipak ne postoje čvrsti dokazi da su svi lokaliteti u borovim sastojinama bili izloženi učestalim prirodnim požarima. Raznodobna stablimična i grupimična struktura takvih reliktnih borovih sastojina možebitno je rezultat požara ali za to još uvijek nema čvrstih dokaza.

Neizostavno je da su šumski požari imali ulogu u pomlađivanju sastojina crnoga bora (Accetto 1979), no još uvijek nije jasno u kojem intenzitetu i mjeri. Istraživanje provedeno na jugu Španjolske potvrđuje raznodobnu strukturu starih sastojina crnoga bora sa zastupljenim dominantnim stablima velikih dimenzija te pomlađivanjem u razdobljima koja koincidiraju sa povoljnim klimatskim čimbenicima (Tíscar i Lucas-Borja, 2016; Fulé i sur., 2008).

U Hrvatskoj crni bor pridolazi u području epimediteranske i submediteranske vegetacijske zone. U području epimediteranske vegetacijske zone nalaze se prirodne sastojine crnoga bora dok su submediteranskoj vegetacijskoj zoni uglavnom umjetno podignute sastojine (pošumljavanjem). Takve sastojine su danas uglavnom starije do 100 godina te se nalaze u prijelaznom silvidinamičkom karakteru (Miklič i ostali, 2021). Prirodni požari manjeg intenziteta (prizemni požari) uglavnom ne oštećuju stabla crnoga bora već sprečavaju pridolazak autohtone, klimatogene vegetacije tako da se ove sastojine nalaze u određenom trajnom stadiju.

### **2.4.3. Istraživanja gospodarenja crnoga bora i munike**

U povijesti u Bosni i Hercegovini borove sastojine su se iskorištavale na način pojedinačnog prebiranja, poznato pod nazivom „stablimični prebor” iako sa prebornim gospodarenjem nema ništa zajedničko, Alikalfić (1971). Na žalost ovaj način iskorištavanja i obnove u nekim krajevima Bosne i Hercegovine se zadržao i do danas. S obzirom na značaj ovih šuma i na težnju da se površine pod crnim borom prošire i izvan prirodnog areala težnja je da se sa ovim vrstama drveća gospodari na način koji bi najbolje odgovarao njihovim ekološkim i biološkim karakteristikama (Pintarić i sur., 1978).

Ovisno o stanišnim prilikama sastojine crnog bora se obnavljaju čistim sječama na malim površinama, čistim sječama sa pričuvcima, oplodnim sječama i rubnim sječama.

Crni bor se obnavlja čistim sječama na malim površinama kada se sječa obavlja u godini punog uroda sjemena, odnosno nakon otvaranja češera (1–3 mjeseca). Obično se ove sječe vrše u krugovima gdje je promjer kruga jednak dvostrukoj visini dominantnog stabla (u praksi do 60 m), Pintarić (1991).

Čiste sječe na velikim površinama („velikim“ = površina čitave sastojine) ne dolaze u obzir jer nisu garancija da će se sastojina prirodno obnoviti, ukoliko se ipak odabere čista sječa na velikim površinama tada u sastojini treba ostaviti 40–50 stabala  $ha^{-1}$  (pričuvaka) ravnomjerno raspoređenih koje će osigurati dovoljne količine sjemena za naplodnju.

Oplodne sječe kod obnove crnog bora mogu se primjenjivati na velikim površinama, u prugama i na malim površinama. S obzirom na to da je crni bor izraziti heliofit ne provodi se pripremni sijek nego se u godini punog uroda izvrši naplodni sijek, a nakon što se pomladak pojavi i dostigne visinu od najviše 0,3 m vrši se dovršni sijek. Rubne sječe u obnovi crnog bora daju dobre rezultate ako širina pruge nije vrlo uska. Širina pruge je potrebna da iznosi dvije visine zrelog stabla (50–60 m), (Pintarić 1991).

Gospodarenje sastojinama crnog bora u Hrvatskoj zasniva se na pionirskoj ulozi crnoga bora u progresivnoj sukcesiji šumske vegetacije. Borovi su pionirske vrste drveća koje su se naselile na degradirana staništa hrasta medunca u hrvatskom Sredozemlju te imaju meliorativnu ulogu koja u konačnici vodi do povratka klimatogenih šumskih zajednica (Matić i sur., 2011). Obnovu borovih šuma potrebno je vršiti oplodnim sječama na malim površinama. Tamo gdje borova sastojina nije stvorila povoljne stanišne uvjete za povratak elemenata klimatogene zajednice (uglavnom hrasta medunca) potrebno je obnoviti matičnu, zrelu borovu sastojinu (Matić i sur., 2011).

Sastojinama munike u Bosni i Hercegovini i Crnoj Gori se ne gospodari. Uloga ovih sastojina je isključivo zaštitnog karaktera te su područja i lokaliteti gdje raste ova vrsta bora strogo zaštićeni.

### 3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Glavni cilj istraživanja je analizirati silvidinamiku i prilagodbu prašuma crnoga bora i munike na klimatske promjene na području jugoistočnih Dinarida.

Specifični ciljevi istraživanja su:

**1) analizirati i usporediti strukturne značajke i prirodnu dinamiku prašuma i sekundarnih prašuma crnoga bora i bora munike**

*(H0: sastojine su raznodobne strukture, grupimičnog i stablimičnog prostornog rasporeda stabala nastale sukcesijom nakon prirodnih požara)*

**2) analizirati utjecaj klimatskih čimbenika (suša, temperatura zraka, oborina) na dinamiku rasta prašuma i sekundarnih prašuma crnoga bora i bora munike**

*(H0: klimatski čimbenici imaju značajan utjecaj na rast i razvoj istraživanih vrsta drveća)*

**3) analizirati klimatsku osjeltjivost i prilagodbu crnog bora i bora munike na klimatske promjene**

*(H0: vrste su dobro prilagođene uvjetima promjena klime i klimatskim ekstremima)*

## 4. MATERIJAL I METODE RADA

### 4.1. Područje istraživanja

Dinaridi su najveći planinski lanac u Mediteranskoj regiji. Pružaju se duž Balkanskog poluotoka, od rijeke Soče i Trnavskog Gozda u Sloveniji na sjeveru, preko Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Makedonije na jugu pa sve do rijeke Drim i Prokletija u sjevernoj Albaniji. Predstavljaju najveći kontinuirani i raznoliki morfološki kompleks krškog krajobraza u Europi na površini od gotovo 60 000 km<sup>2</sup> (Mihevc i Hajna 2010). Stanišne prilike Dinarida su izrazito raznolike što omogućuje pridolazak i razvoj velikog broja različitih vrsta drveća i biljnih zajednica.

Vijenac Dinarskih planina pruža se u smjeru sjeverozapad – jugoistok, prateći jadransku obalu. Dinarski kraj je najbolji primjer krasa u Europi, najznačajniji oblici reljefa nastali u ovoj vapnenačkoj regiji su strme i visoke planine bez velikog utjecaja erozije te strme i teško prohodne klisure i kanjoni. Na planinskim masivima Dinarida prevladavaju kopnene nekarbonatne stijene na kojima je razvijen fluvijalni reljef. Središnji i vanjski pojasi planina uglavnom su formirani mezozojskim i tercijskim stijenama, uglavnom vapnenca i dolomita. Ovdje se nalazi najviši reljef i prevladavaju kraški krajolici. Bliže obali reljef je uglavnom niži, između vapnenca ima i nekoliko uskih pojaseva eocenskog fliša. Tijekom hladnih razdoblja pleistocena granica vječnog snijega u dinarskom gorju bila je oko 1100 m pa je glacijacija zahvatila i više predjele. Glacijacija je djelomično i neznatno izmijenila obilježja krša. Uglavnom su se ledenjaci razvili na visoravnima u krševitim terenima punim zatvorenih depresija. Visoravni su blago zaglađene i nastale su mjestimične formacije morena. Raznolikost stanišnih prilika Dinarida uvjetovana je blizinom Jadranskog mora te svojevrsnom orografskom barijerom između maritimnog i kontinentalnog područja. Raznolikost klime naročito je izražena u količini oborina koja se kreće u rasponu od 2000 do 5317 mm/god (Orjen u Crnoj Gori s izmjerenim apsolutnim maksimumom od 8063 mm/god) (Mihevc i sur., 2010).

Geografski položaj Dinarida spada u umjerenu klimatsku zonu gdje tijekom cijele godine prevladavaju zapadni vjetrovi. Zbog deklinacije Zemlje i njezinog kretanja oko Sunca, položaj umjerenog pojasa se pomiče prema sjeveru tijekom ljeta i prema jugu tijekom zime. To znači da Dinaridi mogu biti pod jakim utjecajem subtropske klime tijekom ljeta, a pod utjecajem polarnih fronti tijekom zime. Zapadni vjetrovi stoga mogu biti vrlo suhi tijekom ljeta, a vlažni tijekom zime.

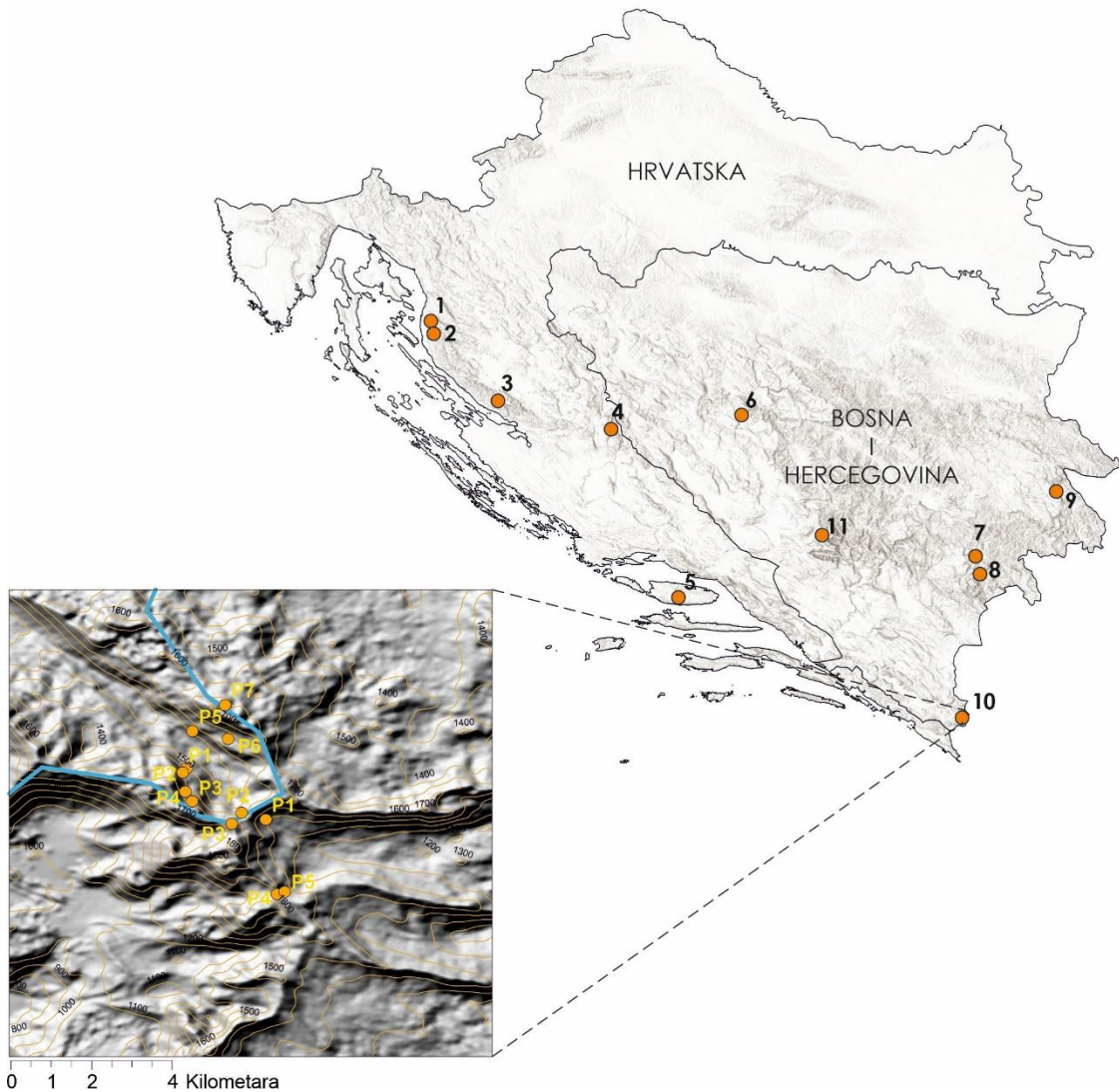
Dinaridi čine orografsku barijeru koja onemogućuje zimske prodore hladnog zraka koji struji od kontinentalnih krajeva na istoku prema Jadranskom moru. Zapadni vjetrovi pušu s Atlantskog oceana preko toplog Sredozemnog mora. Ako je tlak nad Sredozemnim morem nizak, zračne mase postaju obogaćene vlagom i kad udare na Dinaride rezultat je velika količina oborina na zapadnoj strani i znatno manja količina oborina na istočnoj strani (Paluch i sur., 2021).

Istraživanje je obavljeno na području Dinarida (slika 6). Pokusne plohe (tablica 1.) su postavljene u smjeru pružanja planina od Velebita na sjeverozapadu do Orjena na jugoistoku. Lokaliteti reprezentiraju ekološki i geografski gradijent uzimajući u obzir i izostanak direktnog antropogenog gospodarenja (prašume i sekundarne prašume).

Ukupno su postavljene 33 pokusne plohe prema lokalitetima prikazanim u tablici 1.

**Tablica 1.** Popis istraživanih lokaliteta s brojem pokusnih ploha

Red. br.	Država	Lokalitet	N	GPS koordinate	Nadmorska visina (m)	Vrsta drveća
1.	HR	Borov vrh	5	44°50'19.2"N 14°56'12.3"E	1003	Crni bor
		Budim	2	44°47'40.0"N 14°56'25.3"E	980	
		Paklenica	1	44°18'22.7"N 15°31'29.9"E	1000	
		Tavani	1	44°03'58.9"N 16°21'55.7"E	1100	
		Vidova Gora	2	43°17'31.3"N 16°37'57.0"E	700	Crni bor
2.	BIH	Šipovo	1	44°25'93,4" N 17°22'25,2" E	950	Crni bor
		Borić	2	43°19'05"N 18°37'50"E	1540	Crni bor
		Dragoš Sedlo	2	43°31'98,4"N 18°70'48,67"E	1306	Crni bor
		Višegrad	1	43°42'27" N 19°21'58" E	820	Crni bor
3.	CG/BIH	Orjen	11	42°57'54,4"N 18°55'05,8" E	1520	Munika
				42°57'69,4"N 18°54'52,1" E	1630	
				42°57'45,2"N 18°54'30,4" E	1780	
				42°55'88,4"N 18°55'31,1" E	1490	
				42°55'93,6"N 18°55'48,2" E	1530	
				42°60'09,1"N 18°54'15,1" E	1755	
				42°58'68,9"N 18°53'30,2" E	1490	
				42°58'59"N 18°53'21,3" E	1550	
				42°57'94,8"N 18°53'42,4" E	1735	
				42°58'16,7"N 18°53'26,8" E	1680	
42°59'51"N 18°53'42,5" E	1435					
4.	BIH	Čvrsnica	1	43°39'10.7"N 17°37'50.8"E	1500	Munika

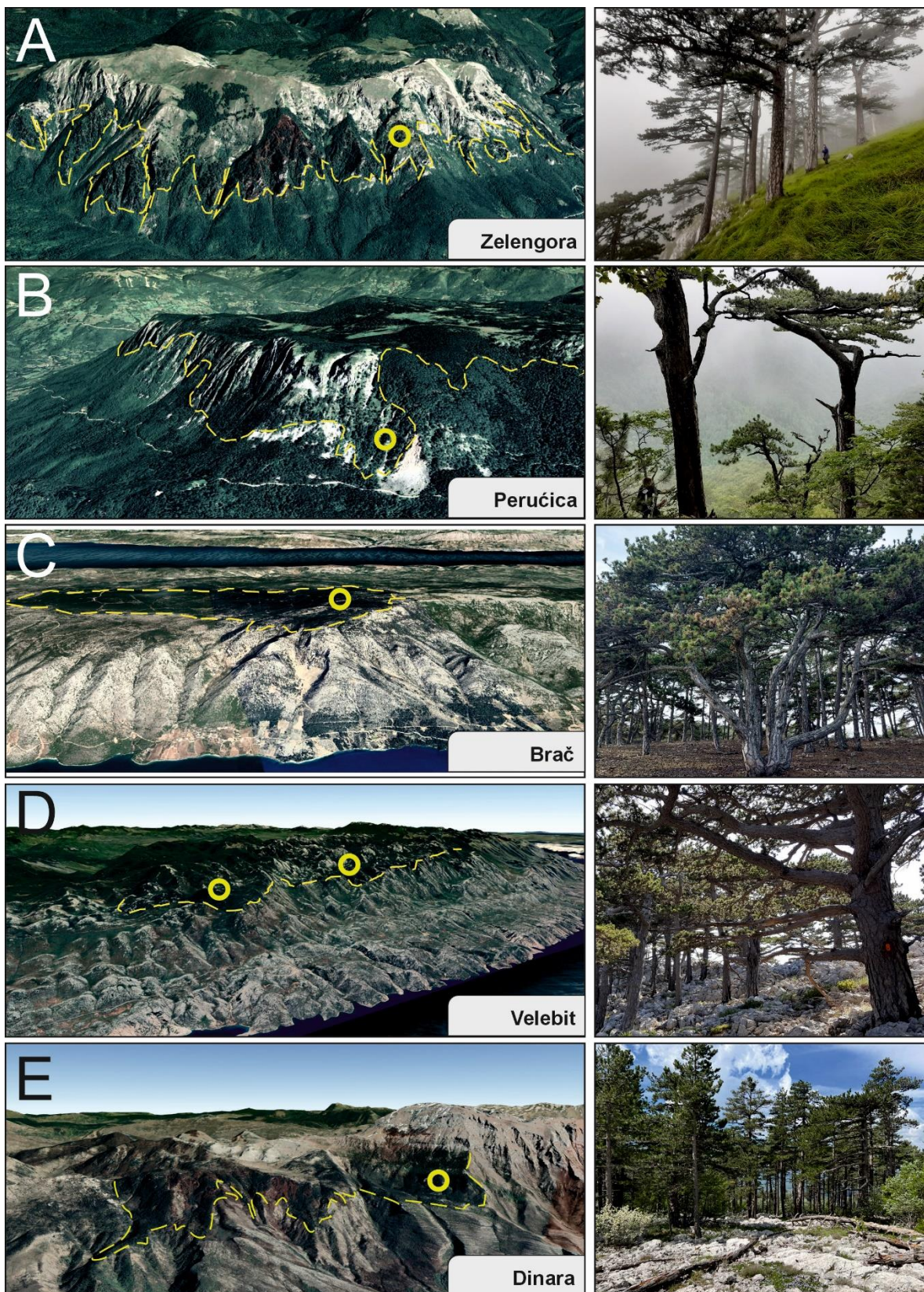


**Slika 6.** Geografski položaj istraživanih lokaliteta: 1. Borovi Vrh, 2. Budim, 3. Paklenica, 4. Dinara, 5. Brač, 6. Šipovo, 7. Zelengora, 8. Perućica, 9. Višegrad, 10. Orjen, 11. Čvrsnica

Zbog nepristupačnosti terena, strmih i stjenovitih te fizički nepristupačnih litica, odabir lokaliteta i postavljanje pokusnih ploha prilagođeni su svakom pojedinom lokalitetu.

Na odabranim lokalitetima postavljene su pokusne plohe kružnog oblika, svaka površine 1500 m<sup>2</sup> koja najbolje reprezentira istraživanu sastojinu.

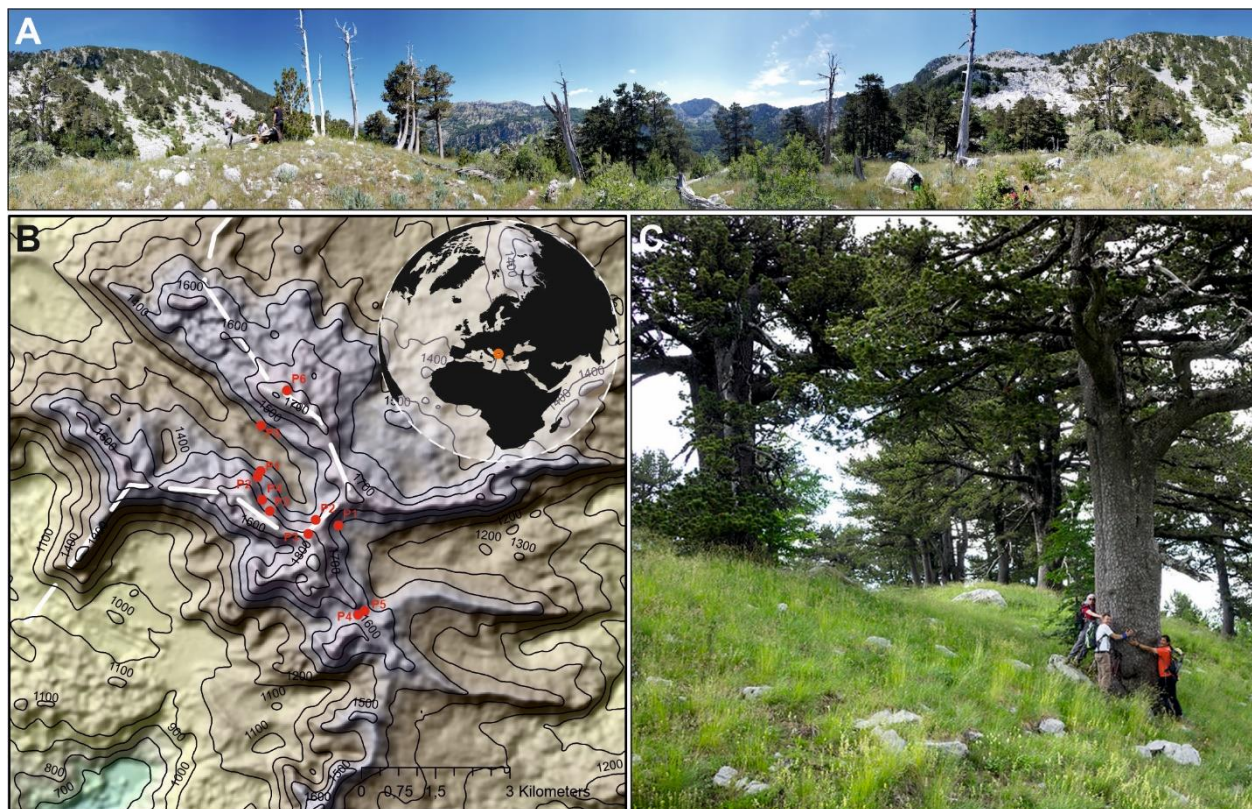




Slika 7. Prikaz položaja nekih od istraživanih lokaliteta crnoga bora.



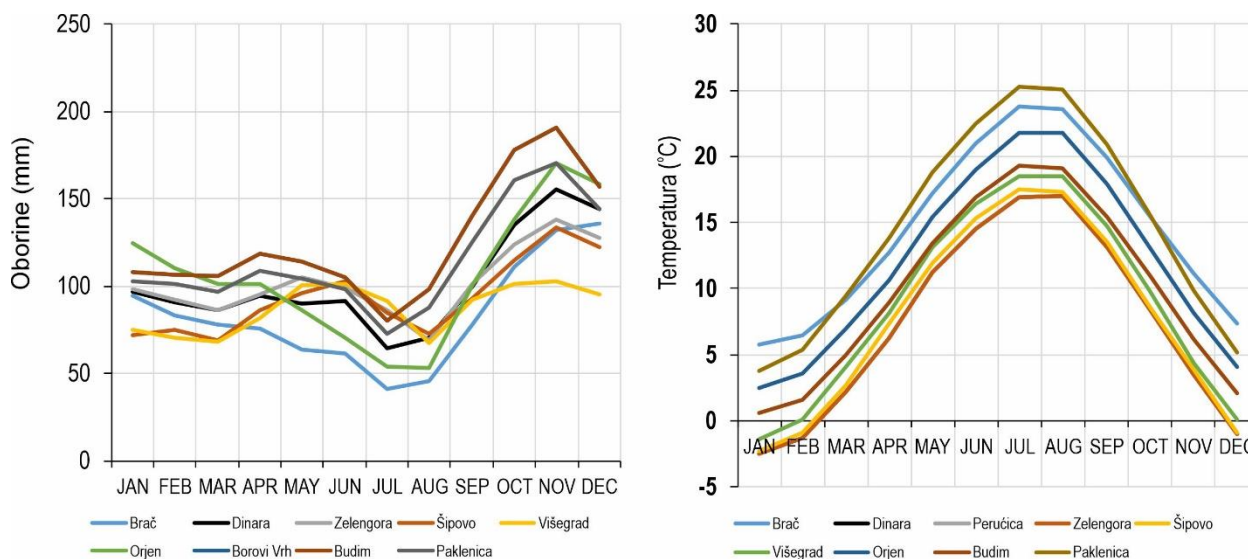
Kako su sastojine munike na Dinaridima vrlo rijetko rasprostranjene većina istraživanih ploha se postavila na najvećem kontinuiranom kompleksu ove vrste na Dinaridima, a to je masiv Orjena na granici Bosne i Hercegovine i Crne Gore. Tu je postavljeno ukupno 12 pokusnih ploha (Slika 8) te jedna pokusna ploha na planini Čvrsnica. Razlog postavljanja samo jedne plohe je miniranost terena.



**Slika 8.** Izgled šuma munike na panorami masiva Orjena **A**, Položaj pokusnih ploha **B** i izgled sastojine (primjer pokusne plohe BIH6) **C**.

## 4.2. Klimatske prilike istraživanih lokaliteta

Klimatske prilike istraživanih lokaliteta prikazane su u tablicama 2. i 3. Klimatske prilike analizirane su u tri razdoblja i to: 1901.–2021., 1901.–1959. i 1960.–2021. godine. Iz prikazanih prosjeka vidljivo je da svi istraživani lokaliteti pokazuju jednake trendove oborina tijekom godine, odnosno da se maksimumi oborina nalaze u jesenskom dijelu godine (rujan – studeni). Najmanje oborina padne u ljetnim mjesecima (lipanj, srpanj, kolovoz). Premda su trendovi razdiobe oborina po mjesecima jednaki, ipak su ukupne vrijednosti oborina značajno različite između lokaliteta. Najmanje oborina padne na otoku Braču (oko 1000 mm) dok su lokaliteti s najviše oborina Budim i Borov Vrh na Sjevernom Velebitu (>1500 mm). Lokaliteti na području Bosne i Hercegovine (Zelengora i Perućica) imaju oko 1200 mm godišnje.



**Slika 9.** Ukupne količine oborina po mjesecima i prosječne mjesečne temperature zraka prema lokalitetima za razdoblje od 1901.–2021. godine.

**Tablica 2.** Mjesečne vrijednosti količine oborina (mm) za istraživane lokalitete (<http://climexp.knmi.nl>)

Brač	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	94,7	83,0	77,9	75,7	63,6	61,7	40,7	45,7	78,2	110,8	132,0	136,0	1000,0
1901-1959	94,2	82,8	74,7	73,5	64,1	62,7	39,7	42,1	74,4	122,3	132,2	142,9	1005,5
1960-2021	95,3	83,2	80,9	77,9	63,2	60,7	41,7	49,1	81,7	99,8	131,9	129,4	994,7
Dinara	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	96,7	91,1	86,1	94,3	89,7	91,7	64,4	70,1	100,1	135,3	155,6	144,3	1219,3
1901-1959	98,3	89,8	83,4	93,7	89,0	94,9	63,5	65,1	96,3	150,6	155,9	150,4	1230,7
1960-2021	95,2	92,3	88,6	94,9	90,4	88,7	65,3	74,9	103,7	120,7	155,3	138,6	1208,5
Perućica	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	98,5	92,4	86,1	95,6	105,0	99,1	86,0	69,1	101,3	123,8	137,8	127,6	1222,3
1901-1959	96,7	89,3	81,7	94,7	105,8	101,4	82,8	66,4	98,1	136,6	139,0	128,5	1221,1
1960-2021	100,2	95,5	90,3	96,4	104,3	96,8	89,0	71,6	104,4	111,6	136,7	126,7	1223,5
Zelengora	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	98,5	92,4	86,1	95,6	105,0	99,1	86,0	69,1	101,3	123,8	137,8	127,6	1222,3
1901-1959	96,7	89,3	81,7	94,7	105,8	101,4	82,8	66,4	98,1	136,6	139,0	128,5	1221,1
1960-2021	100,2	95,5	90,3	96,4	104,3	96,8	89,0	71,6	104,4	111,6	136,7	126,7	1223,5
Šipovo	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	71,6	74,7	68,9	86,4	96,3	102,6	84,9	72,5	93,1	115,0	133,9	122,1	1122,0
1901-1959	70,7	72,4	67,5	85,9	97,0	106,0	83,0	68,6	91,2	126,0	135,4	124,9	1128,6
1960-2021	72,5	76,9	70,2	86,9	95,7	99,4	86,7	76,2	94,9	104,4	132,5	119,5	1115,8
Višegrad	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	74,6	70,4	68,2	81,4	100,9	101,4	91,3	67,5	92,1	101,2	102,8	95,0	1046,8
1901-1959	72,6	67,8	65,6	81,5	103,0	103,0	88,3	65,8	89,7	112,2	104,8	94,8	1049,0
1960-2021	76,6	73,0	70,7	81,2	98,8	99,9	94,2	69,1	94,4	90,7	100,9	95,3	1044,8
Orjen	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	124,7	110,5	101,1	101,1	86,1	70,5	53,8	53,3	100,6	138,1	170,6	158,4	1268,8
1901-1959	123,6	109,1	98,0	98,4	87,6	70,8	52,0	50,4	97,1	151,7	172,2	161,3	1272,3
1960-2021	125,8	111,9	104,1	103,7	84,6	70,3	55,5	56,0	103,8	125,1	169,1	155,7	1265,5
Borovi Vrh	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	108,0	106,2	105,7	118,7	114,2	104,7	79,9	98,4	140,2	177,7	191,1	156,9	1501,8
1901-1959	110,7	104,1	108,2	119,9	111,6	109,2	81,6	92,1	134,5	195,4	195,2	167,8	1530,4
1960-2021	105,4	108,2	103,4	117,4	116,7	100,4	78,4	104,4	145,6	161,0	187,1	146,5	1474,6
Budim	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	108,0	106,2	105,7	118,7	114,2	104,7	79,9	98,4	140,2	177,7	191,1	156,9	1501,8
1901-1959	110,7	104,1	108,2	119,9	111,6	109,2	81,6	92,1	134,5	195,4	195,2	167,8	1530,4
1960-2021	105,4	108,2	103,4	117,4	116,7	100,4	78,4	104,4	145,6	161,0	187,1	146,5	1474,6
Paklenica	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Sum
1901-2021	102,5	101,1	96,7	109,0	104,3	98,2	72,9	87,5	125,3	160,7	170,3	144,1	1372,5
1901-1959	104,6	98,6	96,3	109,5	103,3	101,0	73,4	82,1	119,7	176,8	173,6	153,8	1392,8
1960-2021	100,5	103,6	97,1	108,5	105,2	95,4	72,4	92,8	130,9	144,5	167,0	134,4	1352,3

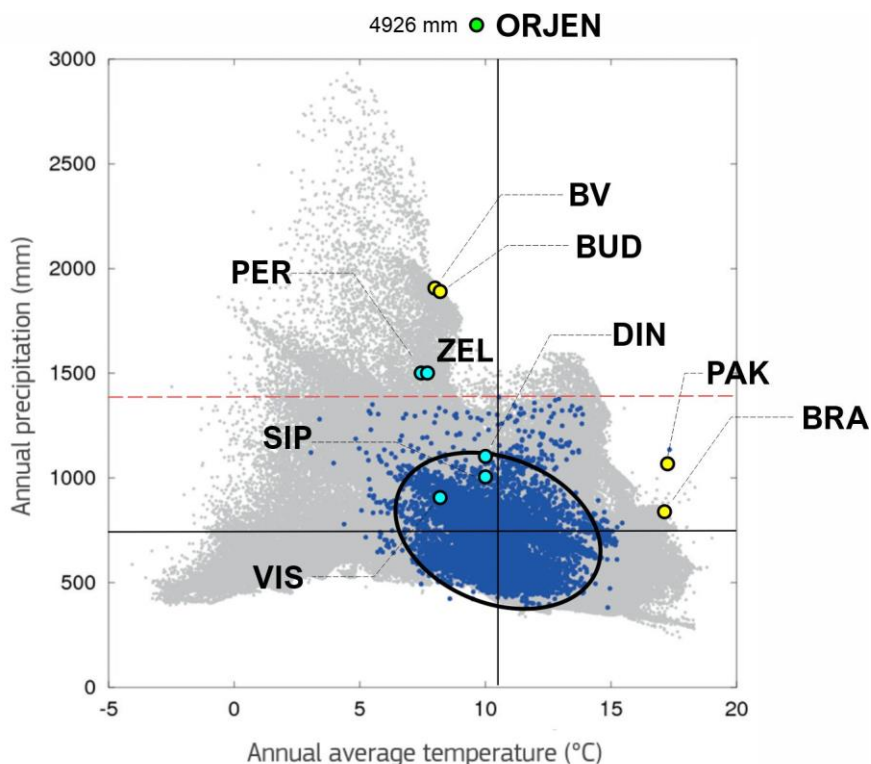
Trendovi raspodjele prosječnih mjesečnih temperatura zraka za razdoblje 1901.–2021. godine identični su za sve istraživane lokalitete (Slika 9.). Jedine razlike su u apsolutnim vrijednostima temperature zraka.

**Tablica 3.** Mjesečne vrijednosti temperature zraka (°C) za istraživane lokalitete. Avg. – srednja godišnja temperatura zraka (<http://climexp.knmi.nl>)

Brač	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	5,7	6,4	9,1	12,8	17,2	21,0	23,8	23,5	19,9	15,4	11,1	7,3	14,4
1901-1959	5,2	5,9	8,7	12,4	17,0	20,6	23,6	23,1	19,7	15,0	10,6	7,2	14,1
1960-2021	6,2	7,0	9,4	13,1	17,4	21,3	24,1	23,9	20,0	15,8	11,6	7,5	14,8
Dinara	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	-2,5	-1,3	2,2	6,3	11,2	14,5	16,9	17,0	13,1	8,4	3,4	-1,0	7,3
1901-1959	-3,0	-1,8	1,9	6,0	11,0	14,2	16,7	16,6	13,0	8,1	3,1	-1,0	7,1
1960-2021	-2,1	-0,7	2,5	6,6	11,4	14,8	17,0	17,3	13,2	8,7	3,8	-0,9	7,6
Perućica	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	-2,5	-1,3	2,2	6,3	11,2	14,5	16,9	17,0	13,1	8,4	3,4	-1,0	7,3
1901-1959	-3,0	-1,8	1,9	6,0	11,0	14,2	16,7	16,6	13,0	8,1	3,1	-1,0	7,1
1960-2021	-2,1	-0,7	2,5	6,6	11,4	14,8	17,0	17,3	13,2	8,7	3,8	-0,9	7,6
Zelengora	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	-2,5	-1,3	2,2	6,3	11,2	14,5	16,9	17,0	13,1	8,4	3,4	-1,0	7,3
1901-1959	-3,0	-1,8	1,9	6,0	11,0	14,2	16,7	16,6	13,0	8,1	3,1	-1,0	7,1
1960-2021	-2,1	-0,7	2,5	6,6	11,4	14,8	17,0	17,3	13,2	8,7	3,8	-0,9	7,6
Šipovo	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	-2,3	-0,9	2,7	7,4	11,9	15,3	17,5	17,3	13,5	8,5	3,8	-0,9	7,8
1901-1959	-2,9	-1,5	2,3	7,0	11,7	14,9	17,2	16,8	13,3	8,1	3,4	-1,0	7,4
1960-2021	-1,8	-0,3	3,1	7,7	12,2	15,7	17,7	17,7	13,7	8,9	4,2	-0,9	8,2
Višegrad	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	-1,4	0,1	4,0	8,2	13,1	16,4	18,5	18,5	14,7	9,7	4,4	0,1	8,9
1901-1959	-1,8	-0,5	3,7	7,9	12,9	16,1	18,4	18,2	14,6	9,4	4,0	0,1	8,6
1960-2021	-1,0	0,7	4,3	8,5	13,3	16,7	18,7	18,8	14,8	9,9	4,7	0,1	9,1
Orjen	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	2,5	3,6	6,9	10,7	15,4	19,0	21,8	21,8	17,9	13,0	8,2	4,1	12,1
1901-1959	2,1	3,0	6,6	10,4	15,2	18,8	21,7	21,4	17,8	12,7	7,8	4,0	11,8
1960-2021	3,0	4,1	7,2	10,9	15,6	19,3	21,9	22,1	18,0	13,3	8,5	4,2	12,3
Budim	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	0,6	1,6	4,9	9,0	13,4	17,0	19,3	19,1	15,4	10,9	6,2	2,1	9,9
1901-1959	0,1	1,1	4,5	8,5	13,1	16,5	18,9	18,6	15,1	10,5	5,8	2,1	9,6
1960-2021	1,0	2,1	5,3	9,4	13,7	17,4	19,6	19,5	15,6	11,3	6,6	2,2	10,3
Borovi Vrh	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	0,6	1,6	4,9	9,0	13,4	17,0	19,3	19,1	15,4	10,9	6,2	2,1	9,9
1901-1959	0,1	1,1	4,5	8,5	13,1	16,5	18,9	18,6	15,1	10,5	5,8	2,1	9,6
1960-2021	1,0	2,1	5,3	9,4	13,7	17,4	19,6	19,5	15,6	11,3	6,6	2,2	10,3
Paklenica	SIJ	VELJ	OŽU	TRA	SVI	LIP	SRP	KOL	RUJ	LIS	STU	PRO	Avg.
1901-2021	3,8	5,4	9,4	13,9	18,8	22,5	25,3	25,0	20,9	15,5	9,8	5,2	14,6
1901-1959	3,3	4,8	9,1	13,4	18,6	22,1	24,9	24,6	20,7	15,1	9,4	5,1	14,2
1960-2021	4,3	5,9	9,8	14,3	19,0	22,9	25,6	25,5	21,2	15,9	10,3	5,2	15,0

Najtopliji lokalitet je Paklenica, a najhladniji lokaliteti su Zelengora, Perućica i Dinara.

Usporedba istraživanih lokaliteta u odnosu na europsku populaciju crnoga bora prikazana je na Slici 10. Vidljivo je da su istraživani lokaliteti ekstremnog položaja s obzirom na odnos ukupne godišnje količine oborina i prosječne temperature zraka u odnosu na čitavu europsku populaciju crnoga bora.



**Slika 10.** Ekodiagram prikazuje odnos između prosječne godišnje temperature zraka i ukupne godišnje količine oborine za Europu. Sivom bojom je označeno područje cijelog kontinenta, a plavom bojom područje na kojem se pojavljuje crni bor. Elipsa predstavlja 95% populacije crnoga bora, istraživani lokaliteti su prikazani kraticama: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borovi vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač i PAK – Paklenica, ORJEN – Masiv Orjena.



### 4.3. Prikupljanje podataka

Na svakoj pokusnoj plohi (Slika 11) sva stabla (promjera većeg od 3 cm) su obrojčana rednim brojevima te se izvršilo prikupljanje osnovnih strukturnih elemenata, a svim stablima su izmjerene visine (h) pomoću visinomjera VERTEX (Haglöf Sweden AB) u metrima.

Osim promjera i visina na stablima su zabilježena oštećenja od požara, udara groma, lavine ili oštećenje od udara kamena, ali i oštećenja uzrokovana antropogenim utjecajem (tragovi smolarenja i prikupljanja luči prilikom čega se stablo zasjeca u pridanku). Veličina plohe određivana je s obzirom na stanje sastojine, tj. gustoću i vitalitet stabala. Pri tome je na svakoj plohi uzorkovano minimalno 15 dominantnih i zdravih stabala. Vodeći se tim kriterijem neke su plohe zadovoljavale površinom 1500 m<sup>2</sup> a neke su bile i veće odnosno do 3000 m<sup>2</sup>.



**Slika 11.** Prikupljanje uzoraka na pokusnoj plohi na lokalitetu Borovi vrh sa označenim pojedinačnim stablima (Photo: S.Mikac, 2019.)

Na plohama su se pomoću sustava FieldMap pozicionirala sva stabla prsnog promjera većeg od 3 cm te su im se izmjerili sljedeći parametri: prsni promjer (na 1.30 m od razine tla ) okomito na prevladavajući nagib terena u cm prema vrsti drveća, određivan je status (0 – panjevi ispod 1.3 m, 1 – živo, 2 – živo s oštećenom krošnjom, 3 – živo s prelomljenim deblom (više od 1.3 m), 4 – živo izvaljeno stablo, 10 – potpuno mrtvo stablo, 11 – mrtvo s polomljenom krošnjom, 12 – mrtvo s

prelomljenim deblom (visine veće od 1.3 m), 13 – mrtvo izvaljeno, 20 – nedavno odumrlo od veće prirodne nepogode (požar, vjetar, snijeg), 21 –nedavno odumrlo dubeće prijelomom, obilježje rasta (R – Oslobođeno, S – Zastarčeno), socijalni položaj (U – Dominantno; stablo visine jednake ili više od 80% maksimalne visine, M – Srednje; stablo visine jednake ili više od 50% maksimalne visine, L – Donji sloj), klasa raspada (dubeća stabla): 1 – nedavno odumrlo, postoje tanke grančice sa suhim lišćem, 2 – nedavno odumrlo, ne postoje tanke grančice sa suhim lišćem, 3 – manje grančice nisu vidljive, veće grane prisutne, 4 – često slomljeno drvo, ili samo nekoliko većih grana prisutno, 5 – „snag" ispod 2 m visine, visoki stupanj raspada, 6 – panj, Visinske klase– visinske klase dubećih mrtvih stabala i ostataka: 0 – 0.0– 9.9 m, 1 – 10.0– 19.9 m, 2 – 20.0–29.9 m, 3 – 30.0–39.0 m, 4 – 40.0–49.0 m.

Za potrebe dendroklimatološke analize prikupljeni su uzorci sa svih stabala koja su se nalazila na plohi. Uzorkovanje je obavljeno pomoću Presslerovog svrdla (Haglof Sweden), promjera 5,1 mm, različitih duljina prema potrebi i veličini stabala (od 30 do 80 cm) montirano na prijenosnu električnu bušilicu (Slika 12).





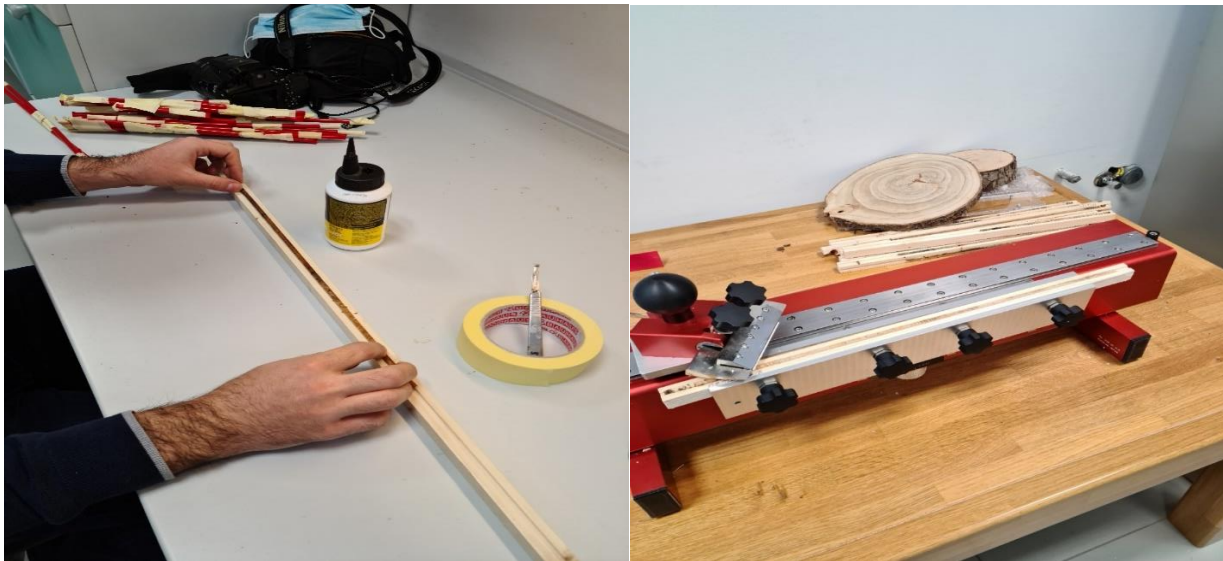
**Slika 12.** Prikupljanje uzoraka pomoću električne bušilice sa stabala munike i crnoga bora



## 4.4. Priprema uzoraka

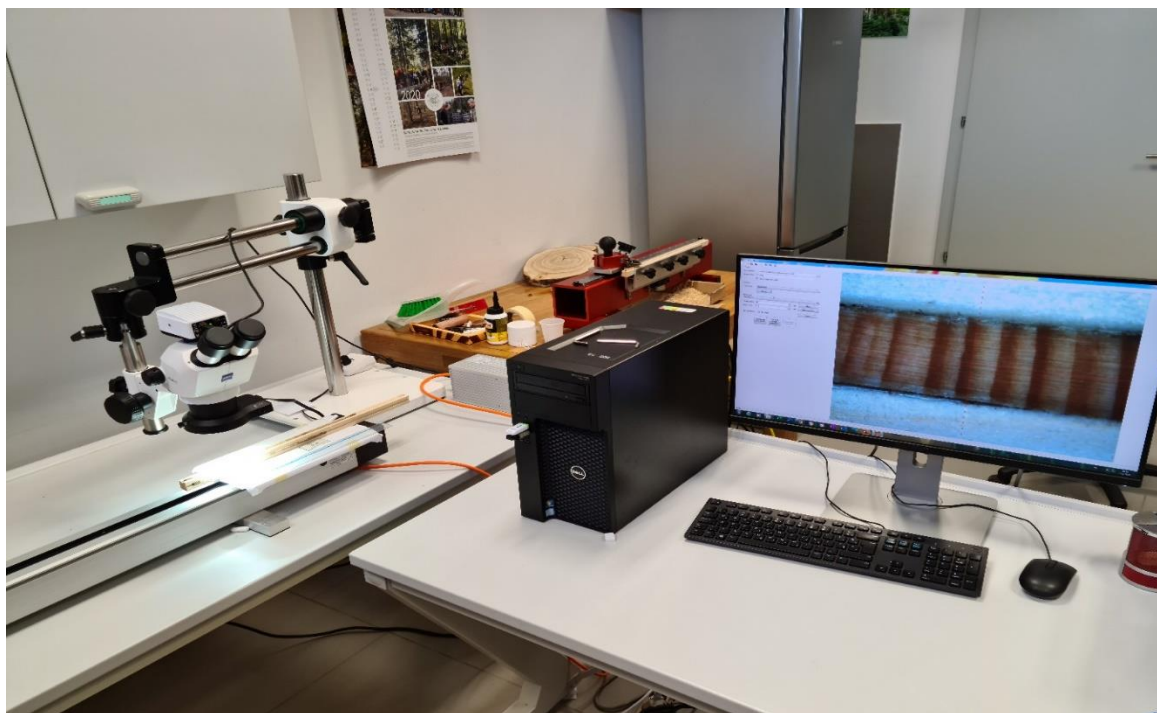
### 4.4.1. Laboratorijska priprema i obrada uzoraka

Priprema izvrtaka za dendrokronološke analize obavljena je u Laboratoriju za dendroekologiju Zavoda za ekologiju i uzgajanje šuma Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Izvrtci se izvade iz transportnih plastičnih slamki te se stavljaju na sušenje 24 sata na sobnoj temperaturi (Slika 13). Nakon toga slijedi lijepljenje izvrtaka na drvene podloške pomoću običnog ljepila za drvo. Nakon sušenja uzoraka pristupi se finoj mehaničkoj obradi uzoraka pomoću Core Microtome (WSL).



**Slika 13.** Lijepljene uzoraka na drvene predloške (lijevo) i priprema uzoraka pomoću mirkotoma (desno)

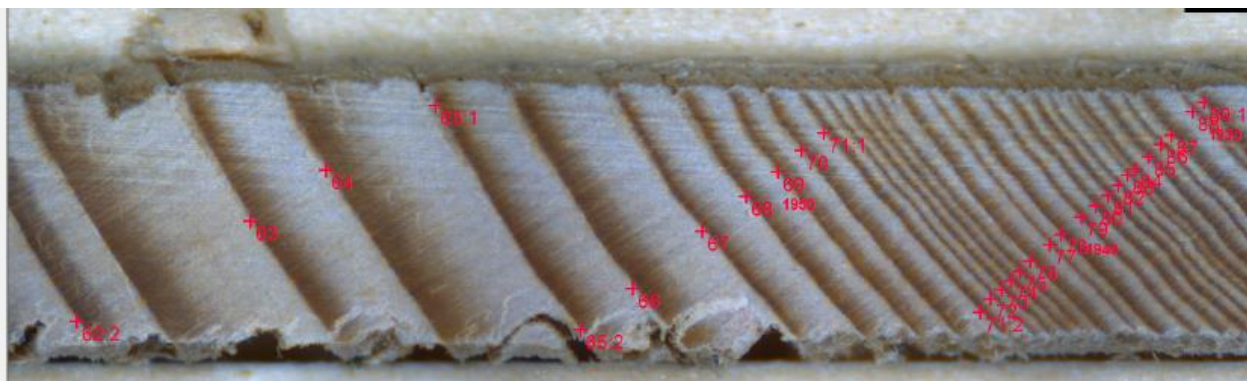
Tako pripremljeni uzorci su skenirani i digitalizirani pomoću sustava ATRICS (*Advanced Tree Ring Image Capturing System*) (Slika 14.) koji se sastoji od automatiziranog mjernog stola (Isel MS200HT), binokulara (Zeiss Stemi 305) i digitalne kamere (Infinity Lumenera 1) povezanih s računalom (Levanič 2007).



**Slika 14.** Snimanje uzoraka pomoću sustava ATRICS

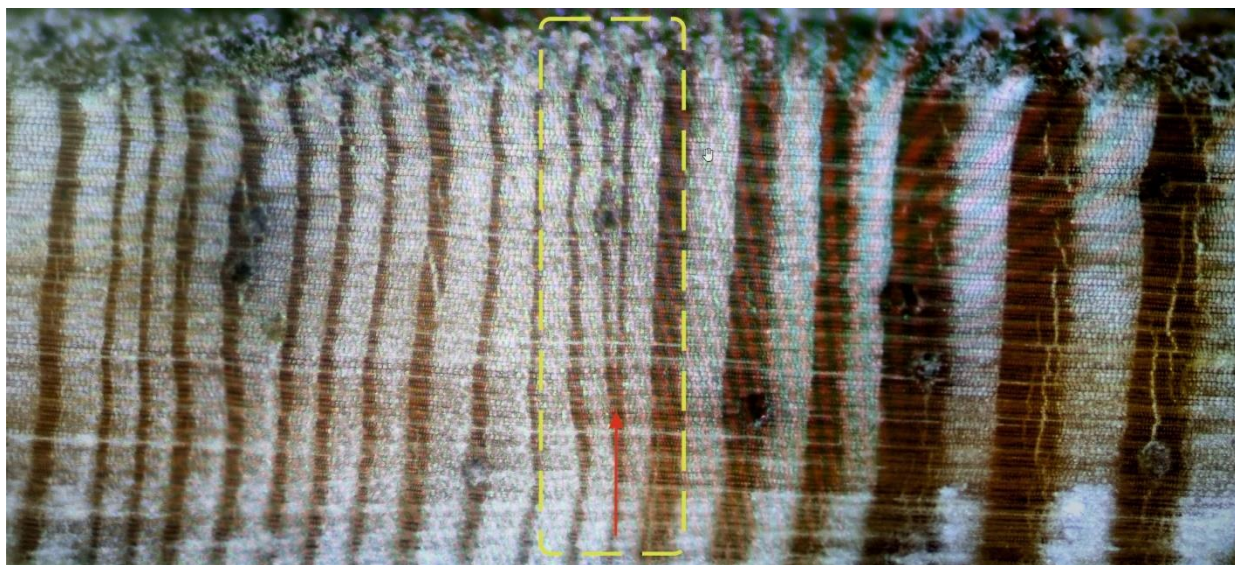
#### 4.4.2. Izmjera širina godova

Izmjera širina godova (eng. *Tree-ring width*) na izvrcima je obavljena na digitalnim fotografijama pomoću računalnih programa CooRecorder i Cdendro specijaliziranih za potrebe dendrokronologije. Fotografije nastale pomicanjem izvrtka po automatskom mjernom stolu se spajaju u jedinstveni digitalni snimak izvrtka (Slika 15. i 16.). Na svakom izvrtku je prilikom snimanja postavljano kalibracijsko staklo kako bi se nakon očitavanja širina godova dobivene vrijednosti iz piksela mogle pretvoriti u stotinke milimetra (Levanič 2007).



**Slika 15.** Očitavanje uzoraka pomoću programa CooRECORDER





**Slika 16.** Problem kod očitavanja godova na crnom boru gdje je vidljivo spajanje dva goda u jedna (crvena strelica).

#### 4.4.3. Procjena dobi stabala

Za svaki uzorak se utvrđuje i starost uzorka odnosno stabla. Često je teško prilikom vađenja uzorka pogoditi geometrijsku os stabla odnosno sam položaj centra stabla. U takvim slučajevima se starost svakog pojedinog uzorka procjenjuje pomoću položaja geometrijskog centra uzimajući u obzir širine godova zadnjih 5–10 godina (Slika 17.). Na ovaj način svakom uzorku (stablu) se odredi dob na prsnoj visini, odnosno u našem slučaju na visini uzorkovanja.



**Slika 17.** Procjena starosti svakog pojedinog uzorka pomoću programa CooRecorder

#### 4.4.4. Priprema izvrtaka za analizu ugljikovih i kisikovih stabilnih izotopa

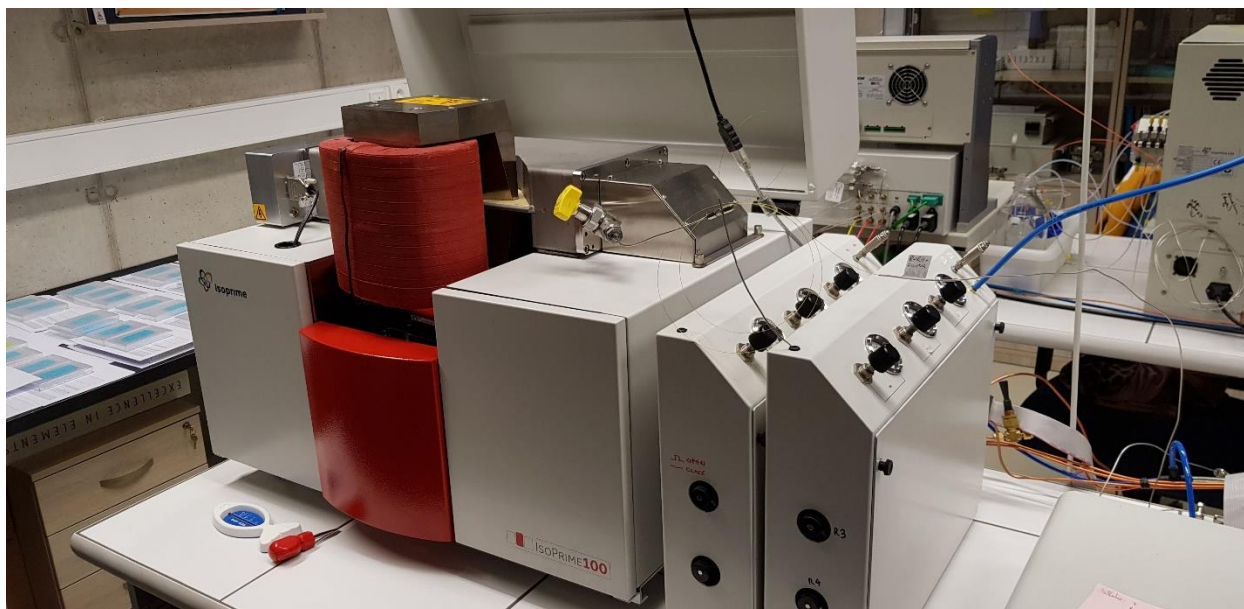
Za analizu stabilnih ugljikovih i kisikovih izotopa odabrana su četiri izvrtka stabla munike sa lokacije Orjen. Svaki od precizno datiranih uzoraka odnosno svaki god na pojedinom uzorku je odvojen skalpelom pod stereomikroskopom i stavljen u teflonske filter vrećice (Slika 18.) (F57; Ankom Technology, Macedon, NY, SAD). Alfa-celuloza je zatim ekstrahirana modificiranom Jayme-Wise metodom izolacije (Boettger i ostali 2007). Teflonske filter vrećice su isprane dva puta po dva sata korištenjem 5% otopine NaOH na 60°C nakon čega je slijedilo pranje sa 7% otopine NaClO<sub>2</sub> (pH 4-5) tijekom 30 sati na 60°C. Uzorci su zatim sušeni na 50°C 24h, zatvoreni u Eppendorf mikroeprovete i pohranjeni u mraku na sobnoj temperaturi (21°C) prije analize. Uzorci alfa-celuloze (0,2–1,0 mg) izvagani su u limene čamce i srebrne kapsule (Elementar Analysensysteme, Langenselbold, Njemačka) za određivanje izotopa ugljika i kisika.



**Slika 18.** Srebrne kapsule za određivanje izotopa ugljika i kisika (Elementar Analysensysteme, Langenselbold, Njemačka).

Za mjerenja  $\delta^{13}\text{C}$  uzorci su spaljeni do CO<sub>2</sub> na 960°C. Uzorci  $\delta^{18}\text{O}$  pirolizirani su u CO na 1450°C pomoću visoko temperaturene ćelije izgaranja elementarnog analizatora (AE) (Slika 19.) varioPYRO kocke (Elementar Analysensysteme, Langenselbold, Njemačka). Stabilni izotopi u plinovima CO<sub>2</sub> i CO zatim su određeni masenim spektrometrom s kontinuiranim protokom omjera izotopa (irMS), ISOPRIME100 (Isoprime, Manchester, UK).





**Slika 19.** Elementarni analizator (AE)

Za analize ugljikovog i kisikovog stabilnog izotopa mjerenja širine godova su vršena pomoću VIAS mjernog sustava (SCIEM; Beč, Austrija) mjerne duljine 78 cm i rezolucije 1/100 mm.

Širina godova (TRW) izmjerena je sa točnošću od 0,01 mm, a svaka serija je unakrsno datirana pomoću programa PAST4, Knibbe (2004), a statistička kontrola svake serije izvršena je korištenjem programa COFECHA Grissino-Mayer (2001). Sve analize stabilnih izotopa su napravljene u laboratoriju međunarodnog instituta ChezhGlobe (Global Change Research Institute) Češke akademije znanosti.

## 4.5. Analiza i obrada podataka

### 4.5.1. Analiza i obrada podataka o strukturi sastojina

Na osnovu izmjere prsnog promjera  $d_{1.30}$  (cm) stabala te na osnovu izmjerenih visina  $h$  (m) stabala konstruirane su lokalne visinske krivulje pomoću Mihajlove funkcije za svaku pokusnu plohu. Za izračun volumena stabala (tarifa) korištena je Schumacher-Halova jednadžba izraza:

$$1. \quad v_i = a \times d_{1.30}^b \times h^c \times f$$

gdje je  $v_i$  volumen stabla pojedinog debljinskog stupnja sredine  $i$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  parametri,  $f$  redukcijski koeficijent te  $h$  visina izjednačena pomoću Mihajlovljeve funkcije

$$2. \quad h = b_0 \times e^{-b_1/d_{1.30}} + 1.30$$

gdje su  $b_0$  i  $b_1$  parametri procijenjeni metodom najmanjih kvadrata,  $e$  baza prirodnog logaritma,  $d_{1.30}$  srednji promjer  $i$ -tog debljinskog stupnja.

Distribuciju volumena po debljinskim stupnjevima dobili smo množenjem opažanog broja stabala ( $N$ ) u svakom debljinskom stupnju sa srednjim volumenom svakog debljinskog stupnja širine 2 cm. Na osnovu dobivenih podataka izrađene su tablice strukture sastojina po istraživanim lokalitetima u kojima su prikazani elementi strukture i to: gustoća sastojine ( $N$ , kom/ha), temeljnica ( $G$ , m<sup>2</sup>/ha) i volumen ( $V$ , m<sup>3</sup>/ha).

### 4.5.2. Analiza i obrada uzoraka širina godova

Nakon pripreme, obrade i očitavanja izvrtaka stabala crnoga bora i munike slijedi statistička analiza dobivenih podataka kako bi se izradile kronologije za istraživane lokalitete i međusobno usporedile. Nakon izrada kronologija pristupa se izračunu korelacija s lokalnim i regionalnim klimatskim čimbenicima kako bi se utvrdio utjecaj klimatskih čimbenika na radijalni rast drva te odgovor stabala na klimatske promjene u prošlosti.

#### - **Datiranje izmjerenih serija širina godova**

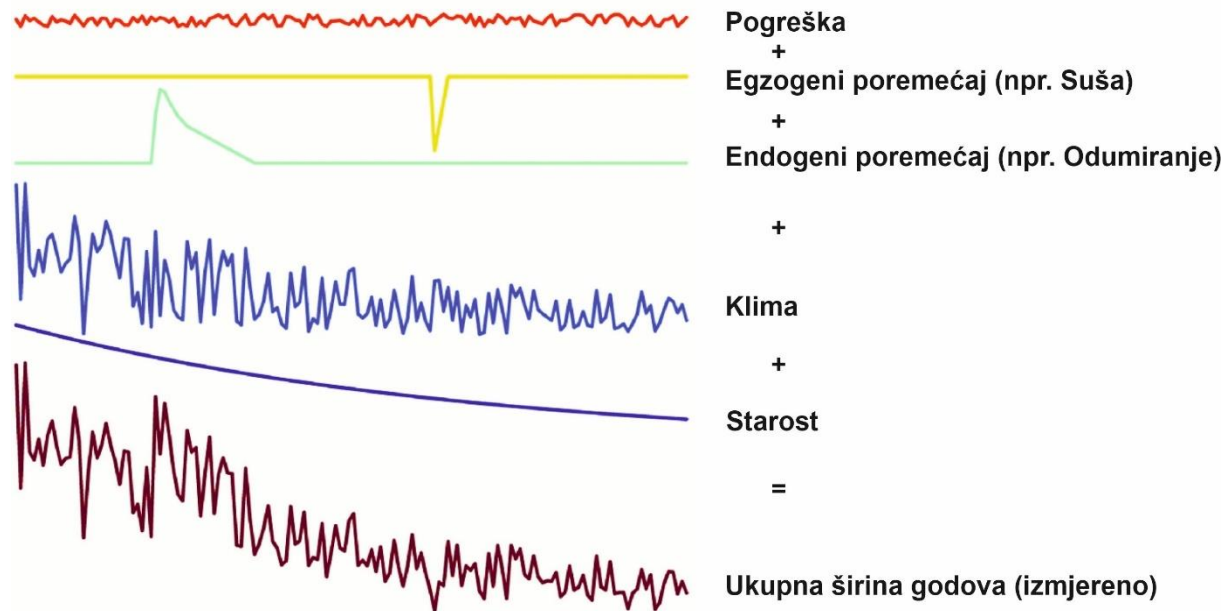
Uklapanje dobivenih serija širina godova (očitanja pojedinih izvrtaka) u valjani vremenski okvir (eng. *Cross-date*) započinje datiranjem svake pojedine serije (izvrtka), odnosno određivanjem posljednje godine rasta uzorkovanog stabla. Datiranje izmjerenih serija širina godova provedeno je pomoću programa TSAP-Win™ (<http://www.rinntech.de>).

Datiranje izmjerenih uzoraka u individualnu kronologiju napravljeno korištenjem  $t$ -vrijednosti koeficijenta korelacije Pilcher (1973) i *Gleichläufigkeit* (GLK) koeficijent, Schweingruber (1978). Kontrola kvalitete datiranih serija širina godova provedena je pomoću programa COFECHA Holmes (1983). Datiranje izmjerenih serija širina godova napravljeno je prvo za parove uzoraka s istog stabla te na razini pokusne plohe. Nakon uspješnog kvalitetnog datiranja individualnih serija uzoraka svi parovi su uprosječeni na razini pojedinog stabla.

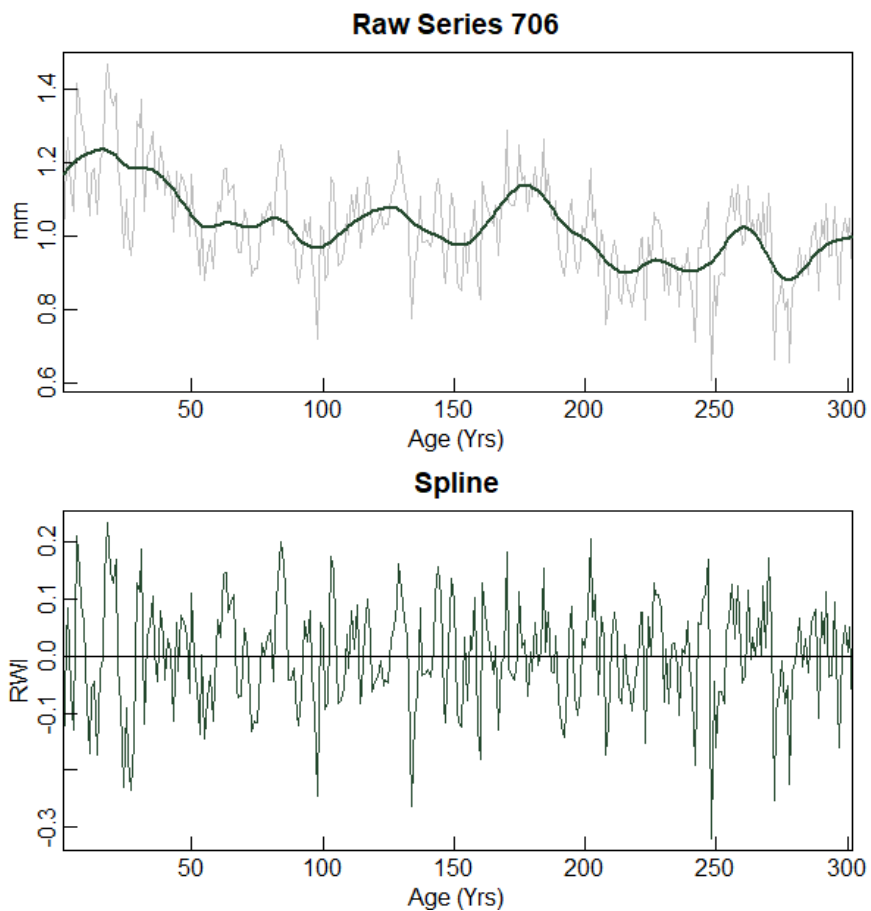
#### - **Standardizacija serija širina godova**

Kako bi se u podacima maksimalno zadržao klimatski signal potrebno je ukloniti varijabilnosti koje su posljedica biološkog trenda rasta stabla ili antropogenog utjecaja i/ili prirodnih nepogoda (Slika 20). Biološki trend rasta najočitiji je u mlađim stadijima razvoja kada stablo prirodno raste brže i ostvaruje veći radijalni prirast – širina goda (juvenilno drvo). Takav podatak o prirastu najčešće nije pouzdan za usporedbu s vrijednostima klimatskih čimbenika kao ni godine s neobično velikim prirastima uzrokovanim promjenom u strukturi sastojine.

Standardizacija, odnosno uklanjanje varijabilnosti niske frekvencije provedena je koristeći paket „dplR” u R-u, Bunn (2008). Standardizacija individualnih serija je napravljena pomoću metode Spline ( $n=32$  godine, odziv frekvencije=0.50) (Slika 21.) nakon što su sve serije stabilizirane pomoću *power* transformacije (Cook i Peters 1997).



**Slika 20.** Teoretski prikaz sadržaja informacija u uzorku širina godova i standardizacije (preuzeto iz (Siegwolf i sur., 2022))

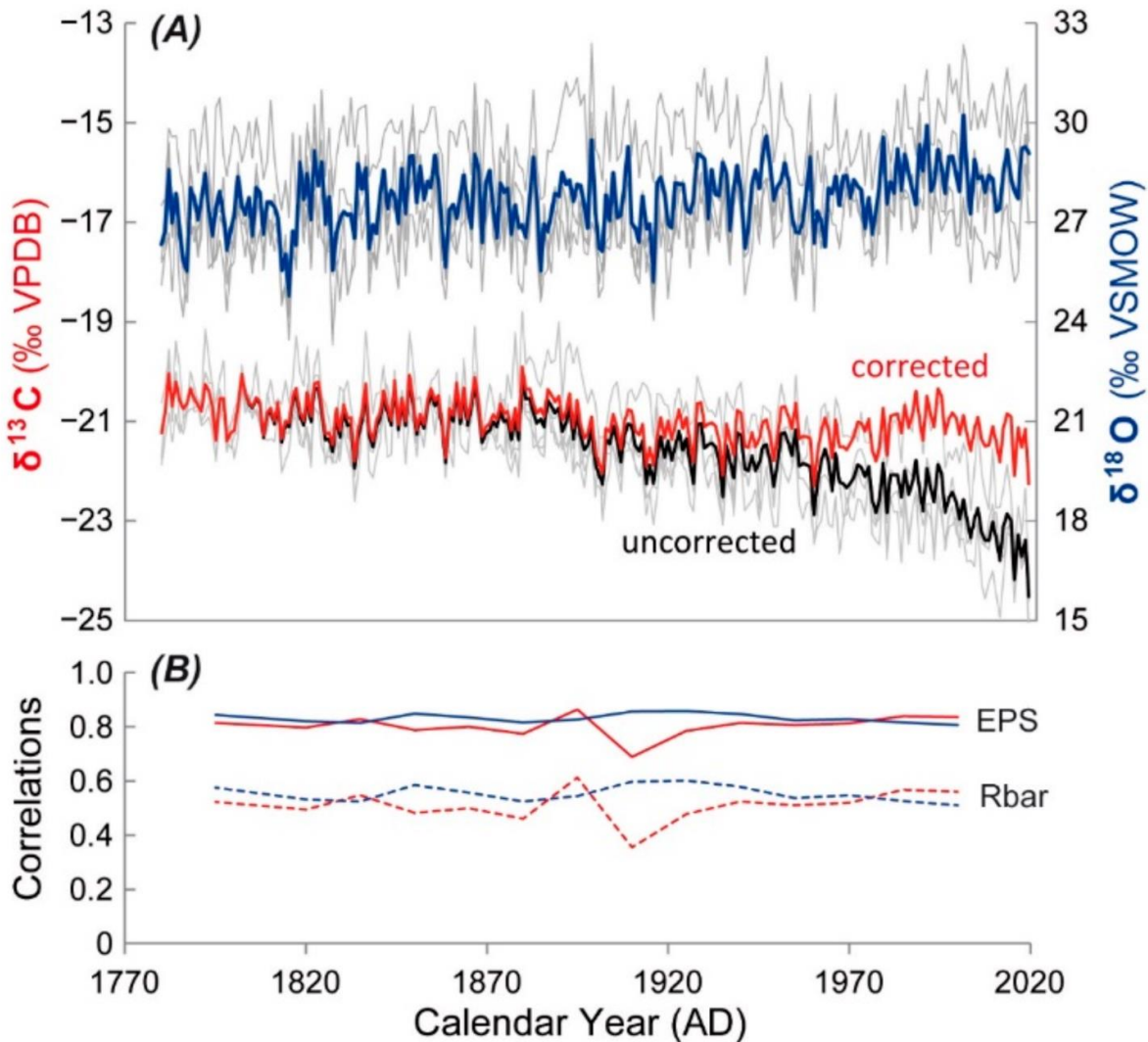


**Slika 21.** Prikaz standardizacija jedne serije širine godova koristeći se metodom „Spline“.



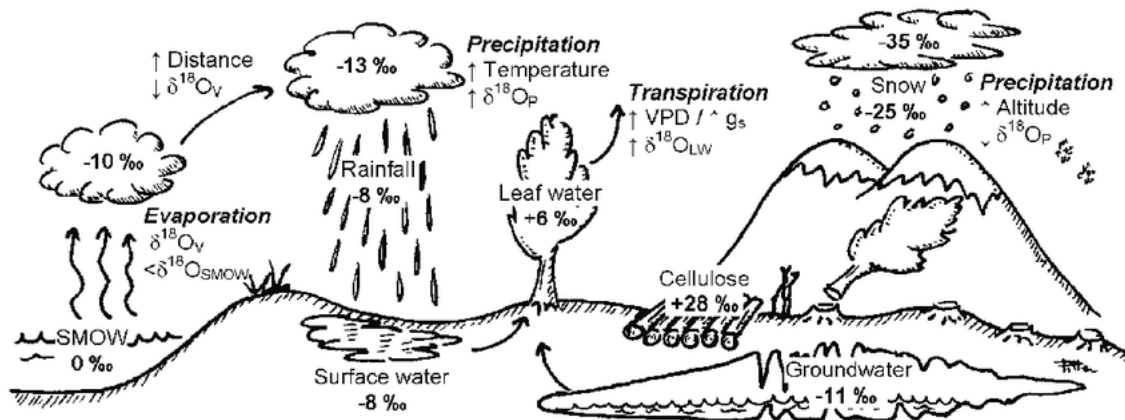
- **Analiza i korekcija vrijednosti stabilnih izotopa u celulozi drva**

Za analizu stabilnih izotopa sustav je kalibriran korištenjem certificiranih referentnih materijala sa poznatim omjerima izotopa Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA, Beč, Austrija ). Vrijednosti  $\delta^{13}\text{C}$  se odnose na kofein (IAEA-600) i grafit (USGS24). Vrijednosti  $\delta^{18}\text{O}$  se odnose na benzojevu kiselinu (IAEA-601 i IAEA-602). Vrijednosti  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) dane su s obzirom na odstupanje od standarda Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) i Bečke standardne srednje oceanske vode (VSMOW). Dugoročna ponovljivost ovih standarda, ocijenjena kao standardna devijacija, bila je  $\leq 0,05$  (IAEA600 i USGS24),  $\leq 0,08\text{‰}$  (IAEA-601) i  $\leq 0,11$  (IAEA-602). Standardne devijacije bile su  $\leq 0,04\text{‰}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) i  $\leq 0,09\text{‰}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) za pet uzastopnih mjerenja homogeniziranog uzorka alfa celuloze (Urban i sur., 2021). Vremenske serije  $\delta^{13}\text{C}$  korigirane su za smanjenje  $\delta^{13}\text{C}$  u atmosferi (McCarroll i Loader, 2004) (slika 22). Korekcija za smanjenje atmosferskog  $\delta^{13}\text{C}$  temelji se na kompilaciji ledene jezgre i izravnim mjerenjima iz Mauna Loe (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/>). Nisu primijenjene dodatne fiziološke korekcije  $\delta^{13}\text{C}$  (Treydte i sur., 2009).



**Slika 22.** **(A)** Neobrađene (sive linije) i prosječne vremenske serije (1780–2018) stabilnih izotopskih omjera ugljika ( $\delta^{13}\text{C}$ ) i kisika ( $\delta^{18}\text{O}$ ) u godovima munike. Vremenske serije podataka  $\delta^{13}\text{C}$  prikazane su i kao nekorigirane (crna linija) i kao korigirane za antropogeno povećanje koncentracije  $\text{CO}_2$  u atmosferi (crvena linija). **(B)** Prikazani su izraženi populacijski signal (EPS; pune linije) i korelacija među serijama (Rbar; isprekidane linije) neobrađenih serija  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$ . EPS i Rbar statistike izračunate su za 30-godišnje prozore s kašnjenjem od 25 godina. Prosječne vrijednosti Rbar i EPS za oba izotopa su  $>0,5$  odnosno  $>0,8$ .

Budući da nedavni rezultati pokazuju da se stabilni izotopi ogledaju kao konstantno širenje u odnosu na razine širenja trendom rasta stabla tijekom životnog vijeka (Harris i ostali 2014) (slika 23.) samo su TRW skupovi podataka standardizirani za suzbijanje neklimatskih čimbenika. Odnosno standardizacija serija stabilnih izotopa nije provedena nego su korištene prosječne vrijednosti korigiranih izmjera.



**Slika 23.** Glavni koraci frakcioniranja i tipične vrijednosti sastava izotopa kisika ( $\delta^{18}\text{O}$ ) u umjerenoj klimi.  $\delta^{18}\text{O}$  SMOW, standardna srednja vrijednost  $\delta^{18}\text{O}$  u oceanskoj vodi;  $\delta^{18}\text{O}$  V,  $\delta^{18}\text{O}$  P,  $\delta^{18}\text{O}$  LW,  $\delta^{18}\text{O}$  u vodenoj pari, oborini (bilo kiši ili snijegu) i vodi iz lista; VPD, deficit tlaka pare; g<sub>s</sub>, stomatalna vodljivost. Izvorni podaci IAEA/WMO (2001.) i (Saurer i sur., 1997)

### - Izrada kronologije

Standardizirane serije (Indeksne vrijednosti) su uprosječene u jednu jedinstvenu kronologiju (RWI), izračunati su kao ostaci iz procijenjenih krivulja rasta nakon primjene snage adaptivne transformacije na sirovu mjernu seriju (Cook i sur., 1997). Na ovaj način su uklonjene ekstremne vrijednosti koje mogu imati značajan utjecaj na prosječnu vrijednost.

Osnovne statističke vrijednosti kronologija su prosječna osjetljivost (MS), standardna devijacija (SD), prosječna korelacija između serija ( $R_{bar}$ ), prosječna korelacija između stabala ( $R_{bt}$ ) te autokorelacija prvog reda (AR1). Također vrlo bitan pokazatelj je i vrijednost EPS-a.

Prosječna osjetljivost (MS) (eng. *Mean Sensitivity*) je pokazatelj koji je uveden posebno za potrebe dendrokronologije. Koristi se za mjerenje relativnih razlika između širine uspoređivanog i prethodnog goda te pokazuje zapravo varijabilnost godova utjecanu stanišnim čimbenicima. A. E. Douglass, utemeljitelj dendrokronologije kao znanosti, je srednju razinu osjetljivosti definirao kao prosječni postotak promjene između promatranog i prethodnog goda (Fritts 1976).

Standardna devijacija (SD) (eng. *Standard Deviation*) kao mjera disperzije mjerenih vrijednosti. Koristi se kao standard za mjerenje varijabilnosti niza. Ako je standardna devijacija mala, aritmetička sredina dobro predstavlja rezultate.

Prosječna korelacija između serija ( $R_{bar}$ ) (eng. *Mean correlation between cores within trees*) je odnos vrijednosti širine godova između dviju ili više serija podataka (izvrtaka) s istog stabla.

Prosječna korelacija između stabala (*Rbt*) (eng. *Mean correlation among cores between trees*) je odnos vrijednosti širine godova između serija podataka (TRW) svih stabala na istraživanom lokalitetu. Dodatno, kao što je slučaj u ovome istraživanju, to je odnos između uprosječenih serija podataka (TRWt) između stabala.

Autokorelacija prvog reda (AR1) (*the first-order autocorrelation*) još je poznata i kao serijska korelacija. Općenito, predstavlja utjecaj prethodnog niza podataka na promatrane podatke. U dendrokronologiji predstavlja ovisnost širine goda o širini iz prethodne godine, širine ranog drveta o širini kasnog drveta prethodne godine ili širine kasnog drveta o širini ranog drveta iz iste godine, Fritts (1976).

EPS (eng. *Expressed Population Signal*) je mjera za kvalitetu kronologije koja pokazuje razdoblje pogodno za korelacije s klimom. Teoretski, EPS je količina varijance populacijske kronologije objašnjena konačnim poduzorkom, a drugim riječima, EPS je približna snaga objašnjenja pri predviđanju takozvanog populacijskog signala (Buras, 2017).

Konačne kronologije iz svake od tri tehnike uklanjanja trenda izračunate su pomoću robusnih dvoponderiranih srednjih vrijednosti. Izraženi populacijski signal (EPS) (Wigley et al., 1984) i međuserijska korelacija ( $R_{bar}$ ) izračunati su za procjenu kvalitete svake kronologije.

#### - **Korelacije s klimatskim čimbenicima**

Korelacije su izračunate korištenjem R paketa „treeclim” verzije 2.0.5.1 (Zang i Biondi, 2015). Vremenske i prostorne korelacije između TRW i TRSI kronologija i sezonskih klimatskih parametara analizirane su korištenjem mjesečnih podataka mreže ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  mreže) iz baze podataka CRU TS3.24.01, dostupne putem platforme Climate Explorer Kraljevskog nizozemskog meteorološkog instituta (KNMI) (<http://climexp.knmi.nl>) (Harris i sur., 2014). Podaci lokalnog promatranja klime za područje istraživanja vrlo su rijetki i vremenski ograničeni, što je karakteristično za dinarsku regiju u cjelini. Iz tog razloga korišteni su mrežni klimatski podaci CRU TS3.24.01 za razdoblje 1901.–2018. Pearsonov koeficijent korelacije izračunat je za svaki mjesec pojedinačno i to od travnja prethodne godine do listopada tekuće godine za svaki klimatski čimbenik. Vremenska stabilnost klimatskog signala analizirana je korištenjem korelacija pokretnih prozora s intervalom od 45 godina plus 1 godinu. Analize su provedene s najznačajnijim sezonskim varijablama za razdoblje 1901.–2018. godine korištenjem klimatskih podataka CRU TS3.24.01.

## 5. REZULTATI

### 5.1. Strukturne značajke istraživanih sastojina

Na pokusnim plohama analizirana je sastojinska struktura pomoću osnovnih pokazatelja kao što su gustoća sastojina (broj stabala), temeljnica i volumen po jedinici površine. Premda su strukturni pokazatelji za istraživane sastojine indikativni jer je vrlo teško govoriti o kompleksnoj strukturi sastojine s obzirom na to da su one većinom grupimičnog i/ili stablimičnog sastojinskog oblika ipak analizirani podaci ukazuju indikativno na sastojinsku strukturu, potencijal i produktivnost istraživanih vrsta na takvim terenima.

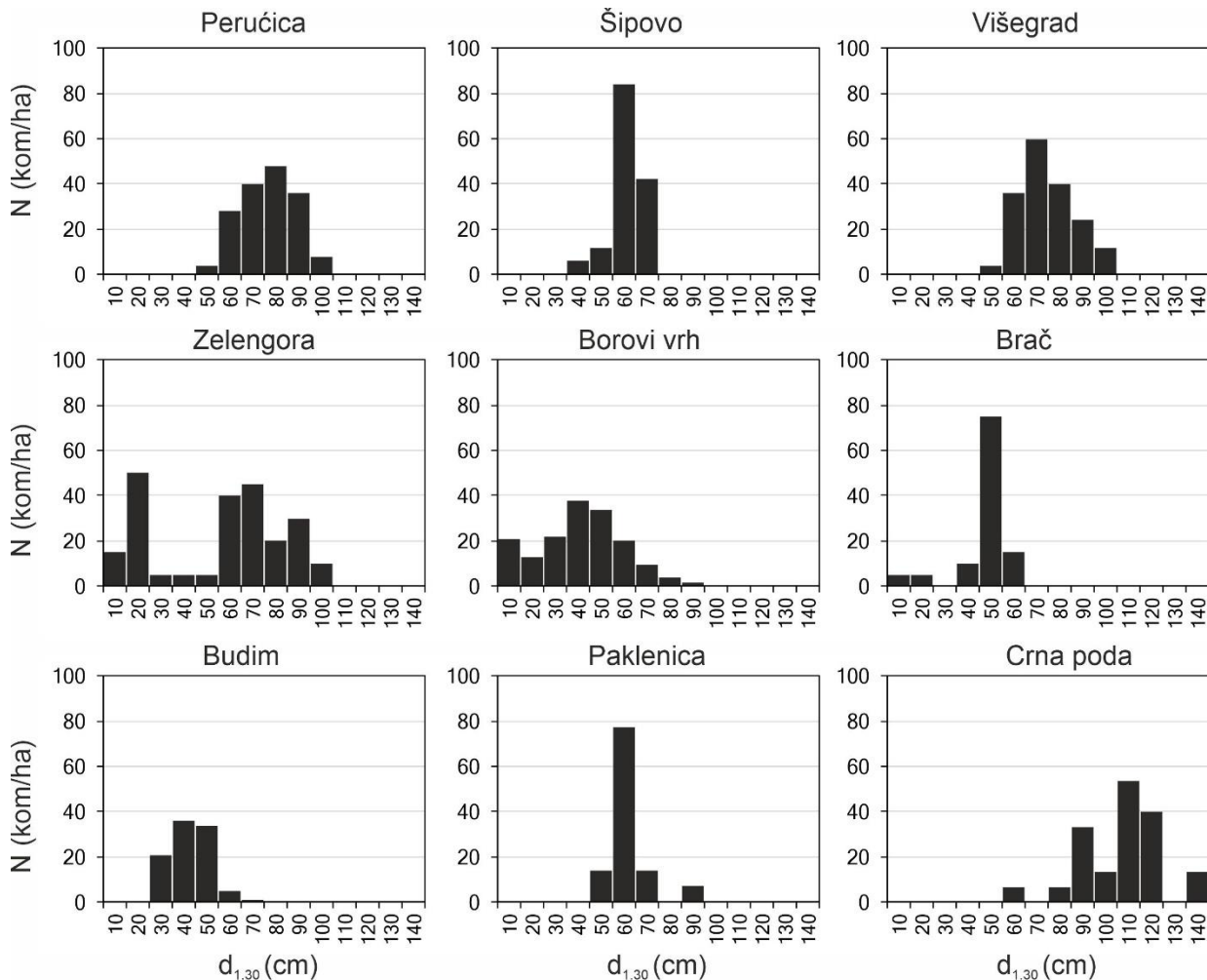
#### 5.1.1. Gustoća sastojina crnoga bora

Gustoća stabala kreće se u rasponu od 83 (Crna poda) do 225 kom/ha na Zelengori. Najveći izmjereni promjeri stabala crnoga bora iznosi 138,7 cm na visini 1,30 m od razine tla u Crnoj podi, ali i u većini sastojine redovito su utvrđena i izmjerena pojedinačna stabala i do 100 cm prsnog promjera.

**Tablica 4.** Broj stabala crnoga bora (kom/ha) prema debljinskim razredima (d1.30, širine 10 cm) za istraživane lokalitete: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borovi vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač, PAK – Paklenica i CP - Crna poda

d	PER	SIP	VIS	ZEL	BV	BRAC	BUDIM	PAK	CP
10				15	21	5			
20				50	13	5			
30				5	22	0	21		
40		6		5	38	10	36		
50	4	12	4	5	34	75	34	14	
60	28	84	36	40	20	15	5	77	3
70	40	42	60	45	9		1	14	
80	48		40	20	4				3
90	36		24	30	1			7	17
100	8		12	10					7
110									27
120									20
130									
140									7
/ha	<b>164</b>	<b>144</b>	<b>176</b>	<b>225</b>	<b>162</b>	<b>110</b>	<b>97</b>	<b>112</b>	<b>83</b>

S obzirom na oblik distribucije broja stabala po prsnim promjerima (Slika 24) sve istraživane sastojine pokazuju unimodlani oblik karakterističan za jednodobne sastojine osim na lokalitetu Zelengora koja ukazuje na bimodalni oblik.



**Slika 24.** Distribucije broja stabala crnoga bora prema debljinskim razredima i lokalitetima

### 5.1.2. Temeljnica sastojina crnoga bora

Temeljnica istraživanih sastojina crnoga bora se kreće u rasponu od minimalnih 13,86 m<sup>2</sup>/ha (Budim na Sjevernome Velebitu) do maksimalnih 69,26 m<sup>2</sup>/ha (Crna poda u Crnoj Gori).

Općenito je vidljivo da sastojine crnoga bora na zapadu Dinarida i to u priobalnom pojasu hrvatskog Sredozemlja imaju značajno manju temeljnicu od sastojina na istočnom području Dinarida (Zelengora, Perućica, Višegrad). Razlog tomu se ne može pripisati samo starosti već i površinskoj kamenitosti terena (goli krš), ali i značajnom i jakom utjecaju bure.

**Tablica 5.** Temeljnica (m<sup>2</sup>/ha) crnoga bora prema debljinskim razredima (dl.30, širine 10 cm) za istraživane lokalitete: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borovi vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač, PAK – Paklenica i CP - Crna poda.

D	PER	SIP	VIS	ZEL	BV	BRAC	BUDIM	PAK	CP
10				0,09	0,08	0,00			
20				0,54	0,21	0,05			
30				0,25	1,13		1,01		
40		0,57		0,32	3,61	1,05	3,25		
50	0,46	1,77	0,46	0,75	5,18	11,95	4,61	2,52	
60	5,27	17,17	7,07	7,89	4,66	3,45	3,98	17,64	0,80
70	10,07	11,09	15,30	11,45	3,04		1,01	4,55	
80	16,18		13,45	6,89	1,56				1,37
90	14,54		10,19	13,85	0,74			3,71	9,76
100	4,21		6,47	5,79					4,70
110									22,68
120									20,18
130									
140									9,79
<b>/ha</b>	<b>50,72</b>	<b>30,59</b>	<b>52,93</b>	<b>47,82</b>	<b>20,20</b>	<b>16,50</b>	<b>13,86</b>	<b>28,42</b>	<b>69,26</b>

### 5.1.3. Drvna zaliha sastojina crnoga bora

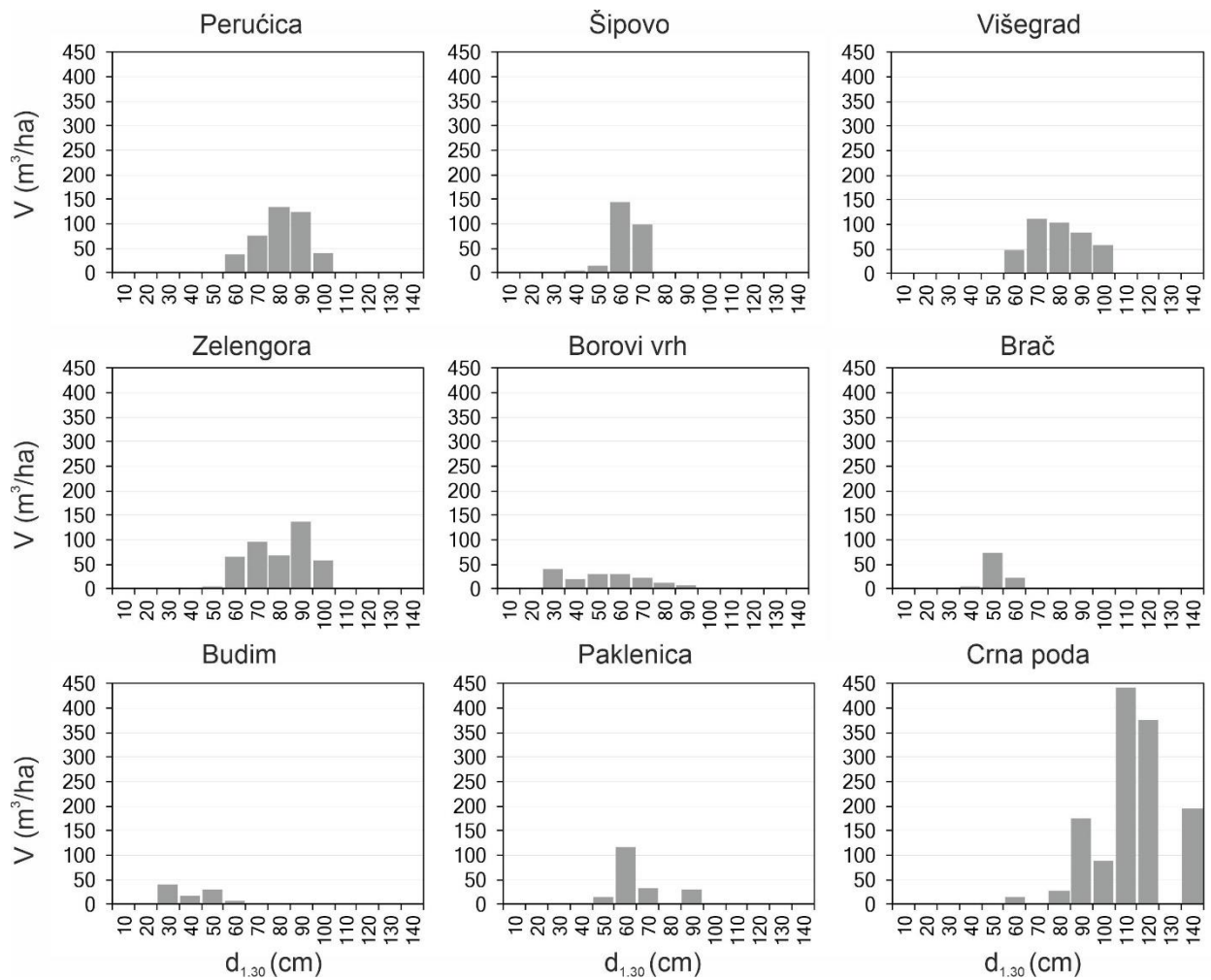
Drvna zaliha istraživanih sastojina kreće se u rasponu od minimalnih 99,19 m<sup>3</sup>/ha (Budim) do izvanrednih 1 318,58 m<sup>3</sup>/ha (Crna poda). U prosjeku svih istraživanih lokaliteta vrijedi zakonitost kao i za temeljnicu, a to je da su drvene zalihe na lokalitetima uz jadransku obalu do maksimalnih 200 m<sup>3</sup>/ha dok u subalpskim pojasevima istočnih Dinarida do 450 m<sup>3</sup>/ha izuzev naprijed spomenute Crne pode s preko 1000 m<sup>3</sup>/ha.

**Tablica 6.** Volumen (m<sup>3</sup>/ha) crnoga bora prema debljinskim razredima (d1.30, širine 10 cm) za istraživane lokalitete: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borovi vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač, PAK – Paklenica i CP - Crna poda.

d	PER	SIP	VIS	ZEL	BV	BRAC	BUDIM	PAK	CP
10				0,09	0,18	0,00			
20				0,84	0,72	0,20			
30				0,98	41,35		39,57		
40		4,16		2,07	19,33	5,60	18,56		
50	3,30	13,62	2,63	5,04	31,04	72,40	31,14	15,40	
60	36,45	143,18	48,92	64,93	30,89	22,75	7,61	116,69	15,12
70	75,87	99,60	111,99	96,83	21,88		2,31	32,48	
80	134,39		104,43	67,25	12,08				28,37
90	124,69		84,13	136,78	6,03			30,31	175,86
100	39,22		57,71	57,77					88,05
110									441,32
120									375,62
130									
140									194,24
/ha	413,94	260,57	409,82	432,59	163,50	100,95	99,19	194,88	1318,58

Distribucija frekvencija drvene zalihe prema debljinskim razredima prikazana je na Slici 25. Isto kao i u slučaju distribucije broja stabala prema debljinskim razredima i distribucija volumena pokazuje unimodalni oblik s centralnom tendencijom oko jednog debljinskog razreda.

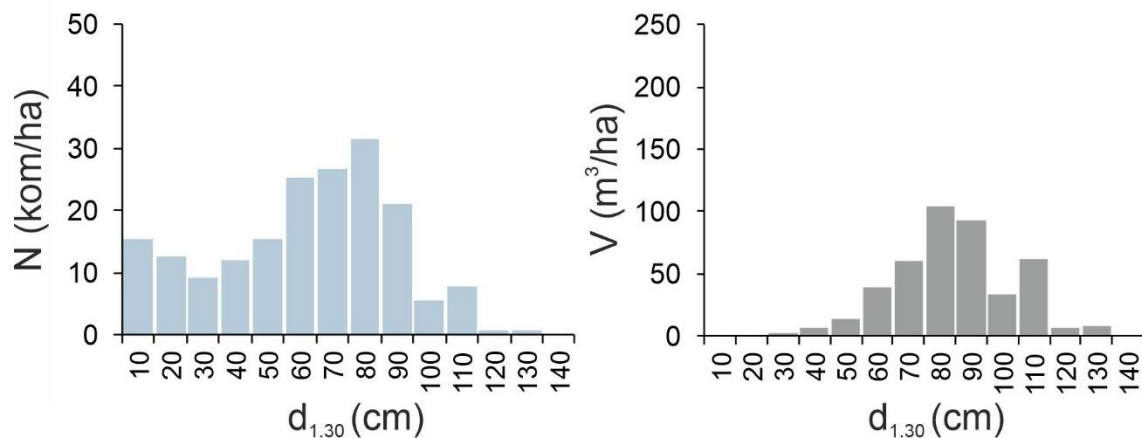




**Slika 25.** Distribucije volumena crnoga bora prema debljinskim razredima i lokalitetima

#### 5.1.4. Strukturne značajke sastojina munike

Za razliku od sastojina crnoga bora, sastojine munike imaju gustoću od 183 stabla po hektaru sa temeljnicom od 47,55 m<sup>2</sup>/ha i drvnom zalihom od 352 m<sup>3</sup>/ha. Oblik distribucije broja stabala prema debljinskim razredima ukazuje na bimodalnu distribuciju (Slika 26. i Tablica 7). Najviše stabala je utvrđeno u debljinskim razredima od 70 do 100 cm, ali i u tanjim debljinskim razredima 10 do 20 cm.



**Slika 26.** Distribucije broja stabala i volumena munike prema debljinskim razredima

**Tablica 7.** Distribucija broja stabala, temeljnice i volumena munike

d <sub>1.30</sub> (cm)	N	G	V
	(kom/ha)	(m <sup>2</sup> /ha)	(m <sup>3</sup> /ha)
10	15	0,02	0,04
20	13	0,20	0,70
30	9	0,46	2,06
40	12	1,16	6,10
50	15	2,33	13,64
60	25	5,94	38,90
70	27	8,50	60,18
80	32	13,59	103,78
90	21	11,50	93,39
100	6	3,84	33,08
110	8	6,70	61,26
120	1	0,70	6,65
130	1	0,83	8,23
140			
150			
<b>Ukupno</b>	<b>183</b>	<b>47,55</b>	<b>351,86</b>

## 5.2. Dobna struktura istraživanih sastojina

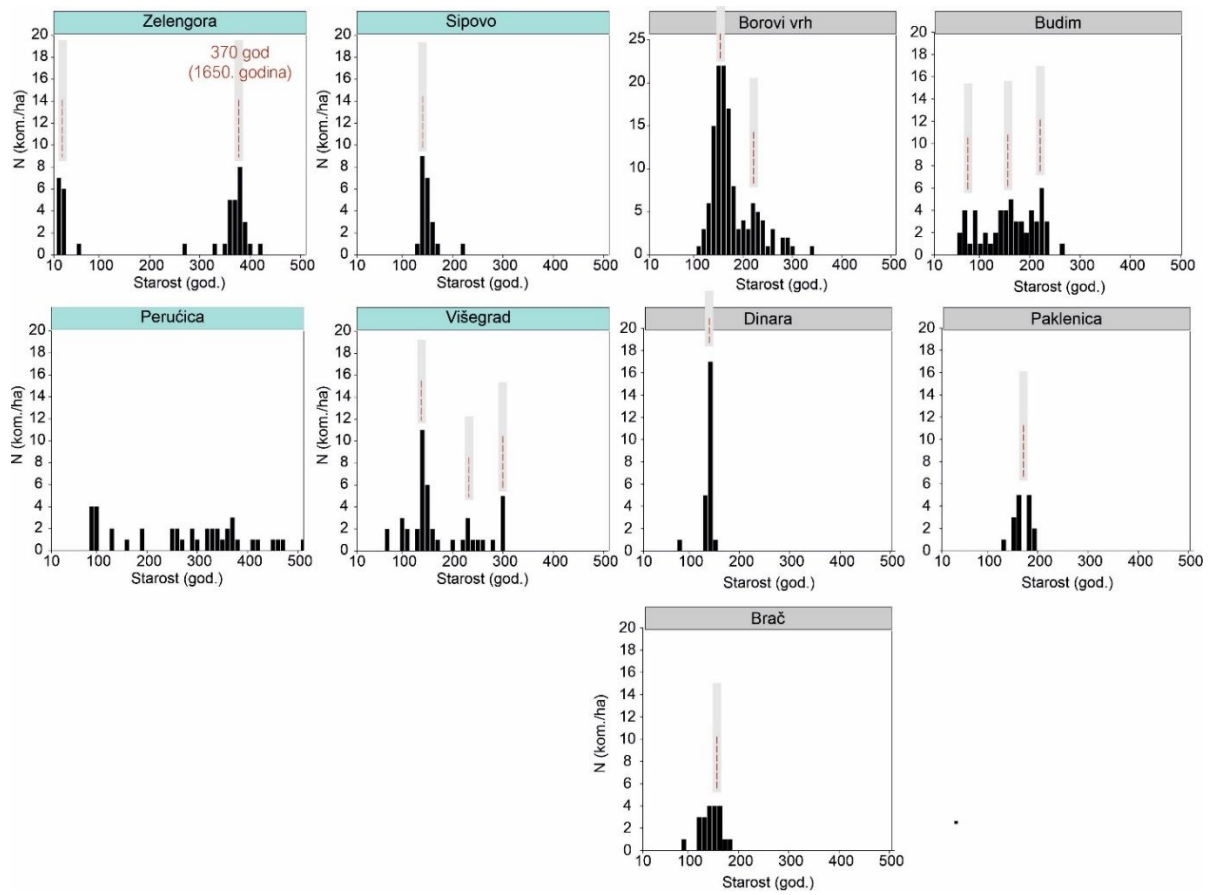
Istraživane sastojine pokazuju značajne razlike u starosti, prosječna starost se kreće u rasponu od 140 godina do 270 godina (Tablica 8). Maksimalna starost istraživanih lokaliteta crnoga bora kreće se u rasponu od 170 do 501 godine (Perućica).

**Tablica 8.** Statističke vrijednosti starosti istraživanih sastojina crnoga bora. Gdje su: N – broj uzorkovanih stabala, Min. – minimalna starost (god.), Max. – Maksimalna starost (god.), 1st & 3rd – prvi i treći kvartil

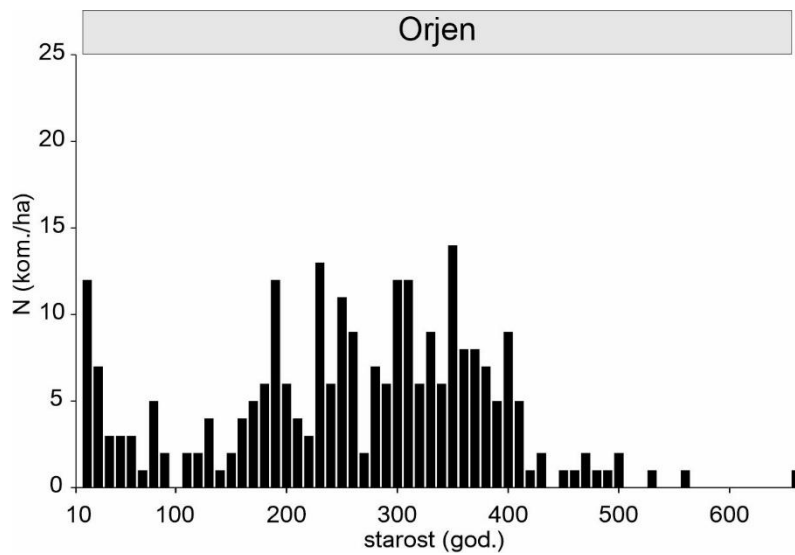
Statistic	Borovi vrh	Budim	Dinara	Paklenica	Brač	Šipovo	Perućica	Zelengora	Višegrad
N	129	55	24	16	21	22	40	40	43
Min.	109	59	76	120	86	129	85	10	68
<b>Max.</b>	<b>331</b>	<b>258</b>	<b>144</b>	<b>184</b>	<b>170</b>	<b>217</b>	<b>501</b>	<b>417</b>	<b>298</b>
1st Q.	144	111	130	150	125	135	145	20	133
Median	157	156	133	157	139	142	289	355	143
3rd Q.	187	197	135	177	150	147	355	371	225
Mean	170,9	151,4	130,6	160,8	136,9	145,3	268,7	243,8	169,3
SD (n-1)	42,6	53,9	12,4	18,1	19,4	18,3	124,7	167,8	65,9

Dobna struktura, odnosno distribucije broja stabala prema starosti istraživanih sastojina prikazana je na Slici 27. U odnosu na distribucije broja stabala prema prsnim promjerima (Slika 24) dobna struktura ukazuje višemodalni oblik distribucija. Drugim riječima ukazuje na raznodobnu strukturu istraživanih sastojina crnoga bora.

Za razliku od crnoga bora dobna struktura sastojine munike na Orjenu također ukazuje na raznodobnu strukturu, ali sa zastupljenosti svih dobi stabala (Slika 28). Maksimalna starost izmjerenih stabala munike iznosi 625 godina.



Slika 27. Distribucije broja stabala crnoga bora prema starosti i prema lokalitetima



Slika 28. Distribucija broja stabala munike po prema starosti

### 5.3. Dendrokronološke analize

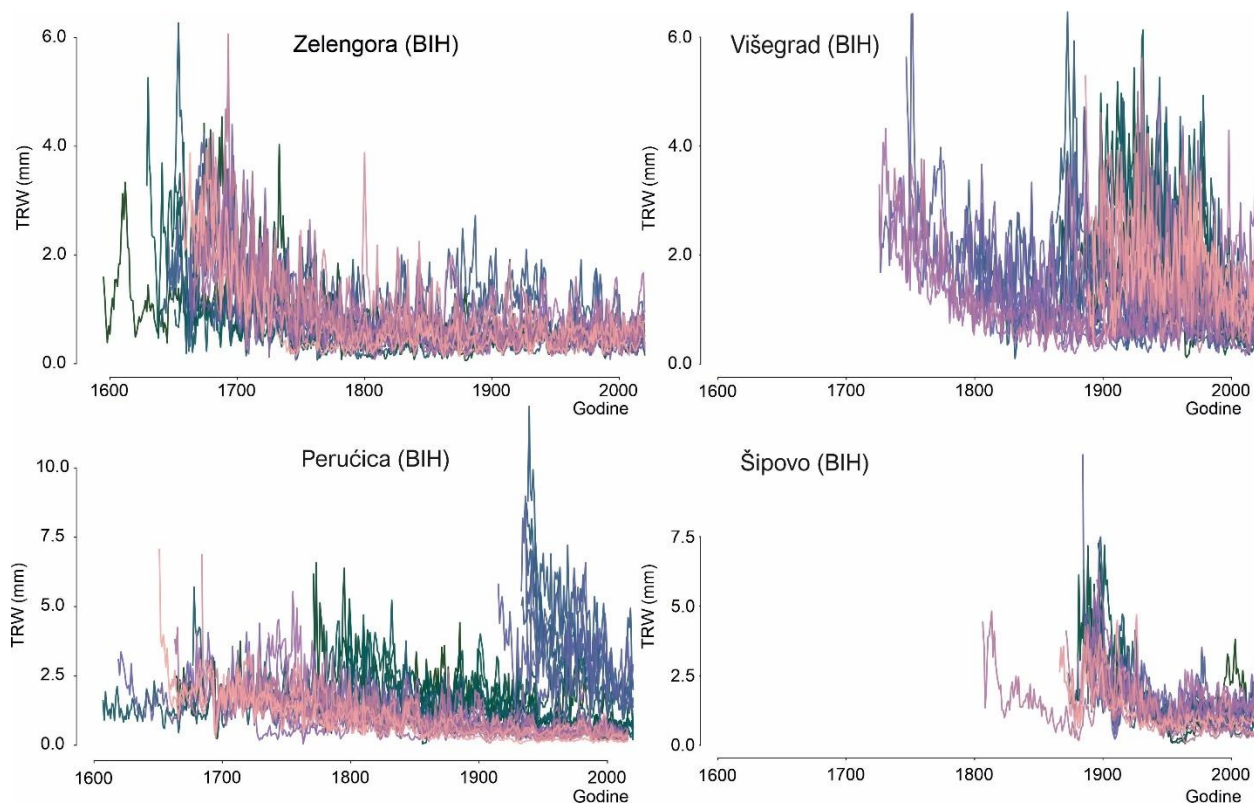
#### 5.3.1. Kronologije širina godova

Ukupno je kvalitetno datirano 9 kronologija širina godova crnoga bora. Raspon kronologija kreće se od 144 do 426 godina. Najdulje kronologije crnoga bora su utvrđene na lokalitetima Zelengora i Perućica (> 400 godina). Zatim na lokalitetima Višegrad, Borov Vrh i Budim (od 250 do 300 godina) te na lokalitetima Šipovo, Dinara, Brač i Paklenica (od 140 do 200 godina) (Tablica 9.). Analizirane kronologije crnoga bora su starosti od 144 godine (Dinara) do 426 godina (Zelengora). Kronologije širina godova munike su znatno dulje i kreću se u rasponu od 298 do 510 godina. Broj uzorkovanih i kvalitetno datiranih uzoraka kreće se od minimalnih 13 stabala (Orjen) do maksimalnih 143 na lokalitetu Borov Vrh.

**Tablica 9.** Popis broja uzorkovanih stabala na lokalitetima gdje su: nt – broj kvalitetno datiranih serija s pojedinih stabala, Span – raspon godina, Range – duljina kronologije, Species - vrsta drveća (PIHE – munika, PINI – crni bor)

Ploha	Lokalitet	Država	nt	Span	Range	Species
P1	Orjen	MNE	17	1636 - 2018	383	PIHE
P2	Orjen	MNE/BIH	13	1509 - 2018	510	PIHE
P3	Orjen	MNE	16	1582 - 2017	436	PIHE
P4	Orjen	MNE	14	1685 - 2018	334	PIHE
P5	Orjen	MNE	14	1595 - 2017	423	PIHE
P67	Orjen	BIH	30	1565 - 2018	454	PIHE
DD2	Orjen	BIH	21	1618 - 2019	402	PIHE
DD3	Orjen	BIH	22	1648 - 2019	372	PIHE
PIR1	Orjen	BIH	21	1636 - 2018	383	PIHE
PIR2	Orjen	BIH	31	1581 - 2019	439	PIHE
PIR4	Orjen	BIH	15	1722 - 2019	298	PIHE
PIR5	Orjen	BIH	21	1532 - 2019	488	PIHE
ZEL	Zelengora	BIH	27	1595 - 2020	426	PINI
PER	Perućica	BIH	35	1607 - 2020	414	PINI
SIP	Šipovo	BIH	23	1806 - 2021	216	PINI
VIS	Višegrad	BIH	32	1725 - 2020	296	PINI
BV	Borov Vrh	HR	143	1710 - 2017	308	PINI
PAK	Paklenica	HR	16	1839 - 2022	184	PINI
BUD	Budim	HR	55	1758 - 2019	262	PINI
BRAC	Brač	HR	21	1853 - 2022	170	PINI
DINARA	Dinara	HR	24	1878 - 2021	144	PINI

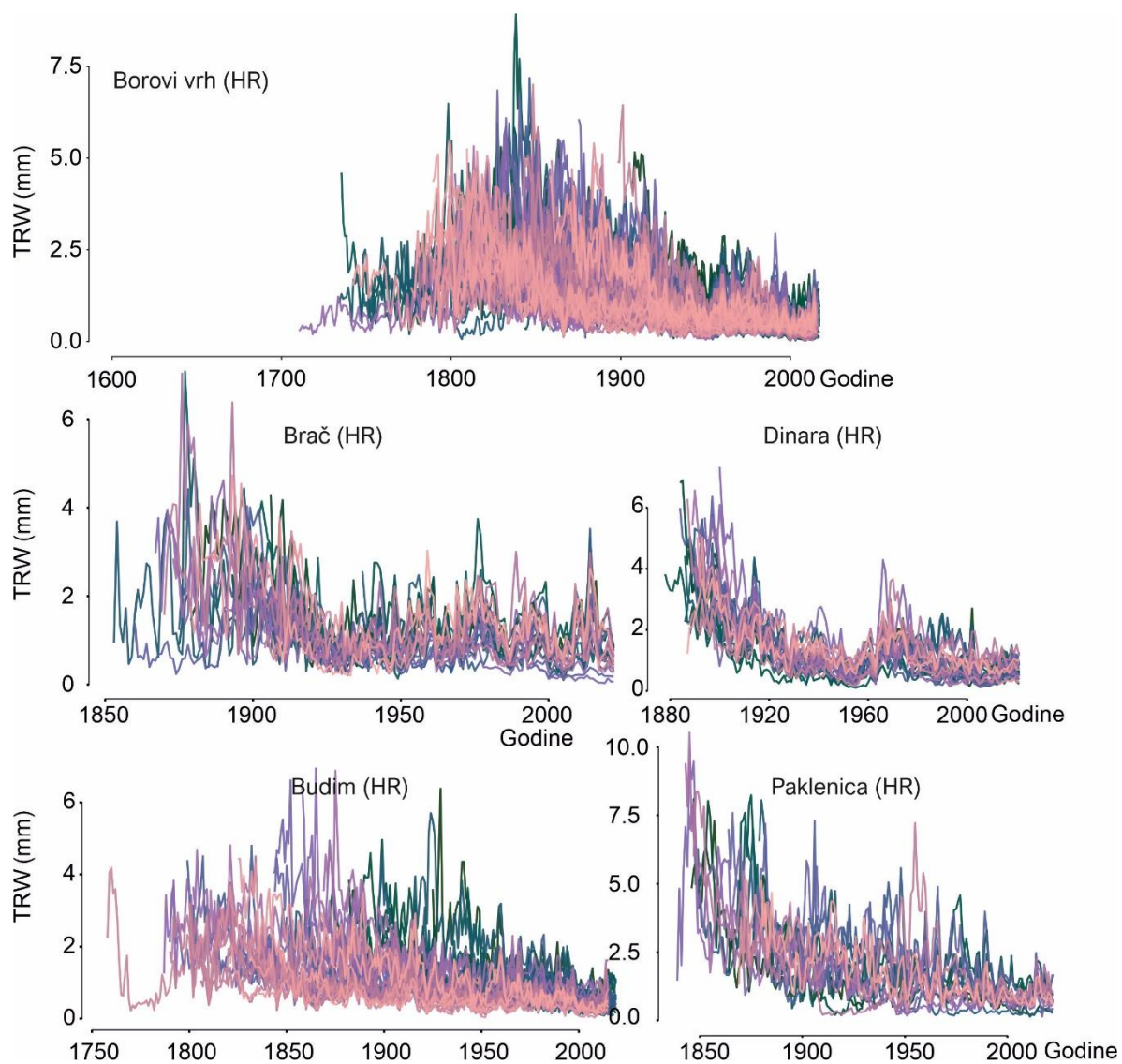
Kronologije širina godova (TRW) prikazane su po lokalitetima na Slikama 30., 31. i 32. Iz oblika navedenih kronologija vidljivo je da se obzirom na trend širina godova one međusobno razlikuju. Drugim riječima svaki lokalitet ima očigledno svojstvenu dinamiku rasta i razvoja tijekom promatranog razdoblja, odnosno tijekom životnog vijeka svake pojedine sastojine.



**Slika 29.** Serije širina godova (TRW) crnoga bora prema godinama za lokalitete iz Bosne i Hercegovine. Rasponom boja su označene starosti (duljine) svakog pojedinog stabla unutar kronologije.

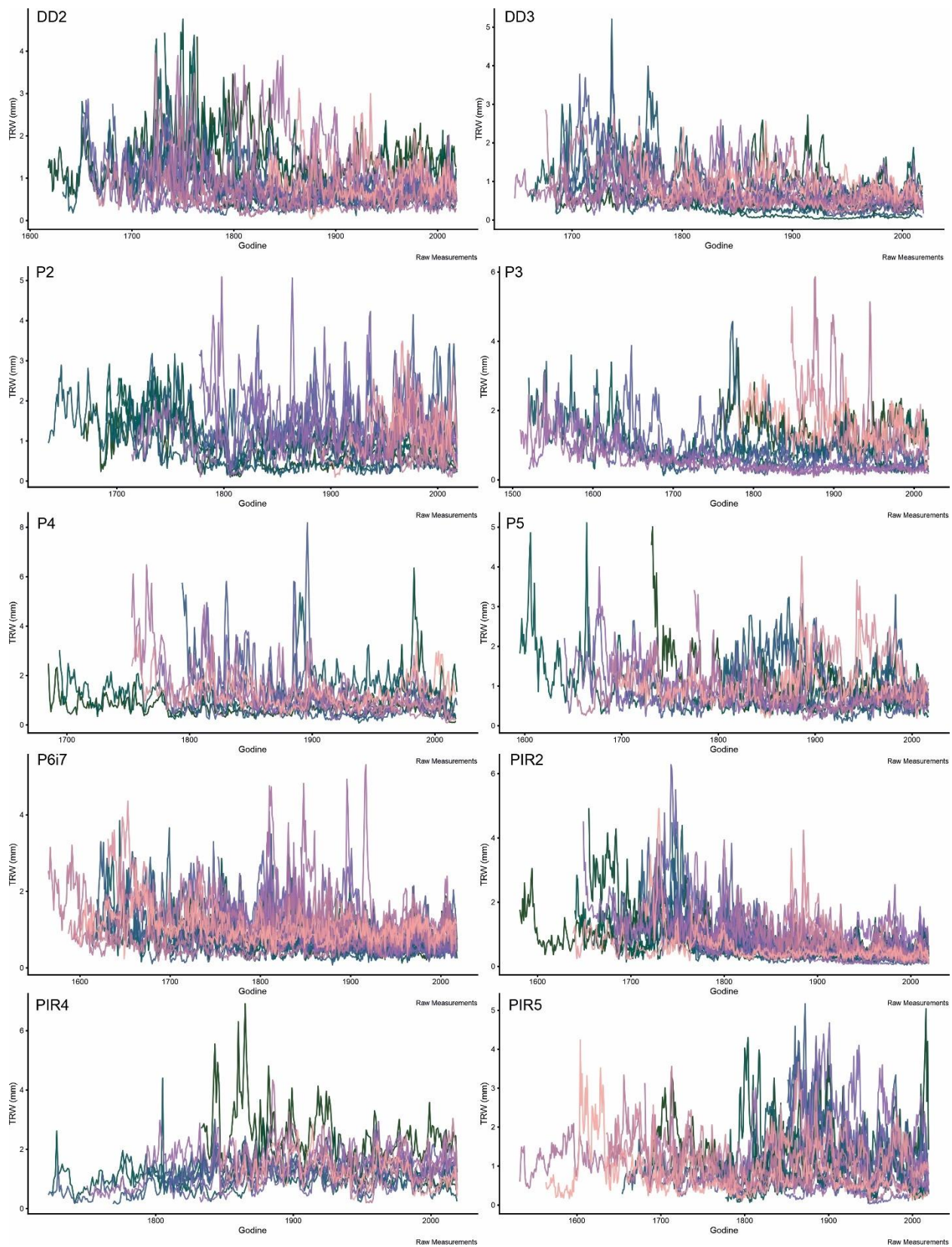
Kronologije širina godova (TRW) iz Bosne i Hercegovine pokazuju očekivani biološki trend pada vrijednosti širina godova tijekom životnog vijeka stabala i sastojine, ali su ipak neke razlike očite. Na nekim lokalitetima osim što se pojavljuje upliv nove generacije stabala (Perućica i Višegrad) zamjetan je i drugačiji trend širina godova. Ovakav trend posljedica je dinamike sastojina te na određeni način ukazuje na postanak generacije stabala koju danas promatramo. Na Zelengori je vidljivo da su stabla u mladosti (prvih sto godina) imala najveće širine godova (juvenilno drvo) te da se sa vremenom širina godova postupno smanjuje bez posebnih skokova u rastu (od 1750. godine do danas). Ovakav oblik kronologije ukazuje da su stabla najvjerojatnije nastala na otvorenoj površini gdje nije bilo konkurencije nadstojnih stabala. S druge strane na lokalitetu Perućica trend kronologije širina godova je bitno različit. U mladosti stabala crnoga bora ne pokazuju specifičan biološki trenda pada širina godova. Razlog tomu može biti da su ona nastala u prostoru sastojine gdje nije došlo do naglog prekida sklopa već su se tijekom mladosti borila sa konkurentnim nadstojnim stablima, Sličan trend kronologije je uočen i na lokalitetu Borov Vrh te Budim (Slika 30). Od svih lokaliteta crnoga bora na Dinari i Braču utvrđen je značaj skok u širini

godova nakon 1960. godine. Ovakav skok ukazuje da su stabla u jednom trenutku najvjerojatnije bila značajno oslobođena konkurencije te su reagirala značajnim povećanjem prirasta. Za razliku od crnoga bora kronologije širina godova munike pokazuju značajnu heterogenost za svaku pojedinu plohu (Slika 31). Općenito, spomenuti biološki trendovi rasta te oblici kronologija se vrlo teško mogu generalizirati kao u slučaju crnoga bora.



**Slika 30.** Serije širina godova (TRW) crnoga bora prema godinama za lokalitete iz Hrvatske. Rasponom boja su označene starosti (duljine) svakog pojedinog stabla unutar kronologije.





**Slika 31.** Serije širina godova (TRW) munike prema godinama. Rasponom boja su označene starosti (duljine) svakog pojedinog stabla unutar kronologije.

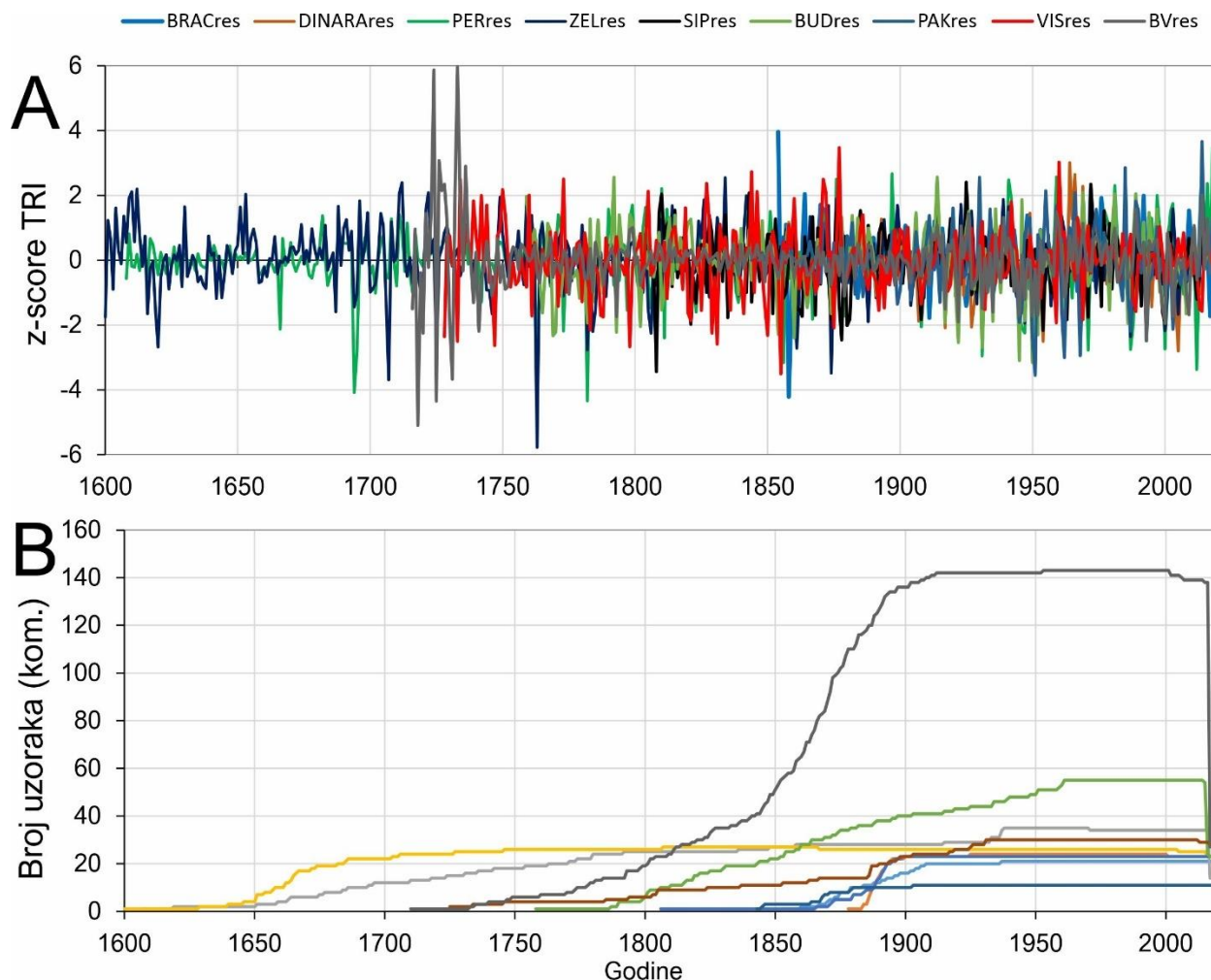
### 5.3.2. Kronologije širina godova crnoga bora

Nakon provedene standardizacije, odnosno uklanjanja svih mogućih šumova u signalima posebice onih koji su uzrokovani sa starosti stabala, mogućim unutarnjim i vanjskim prirodnim nepogodama serije izvrtaka su uprosječene u individualne kronologije na razini istraživanih lokaliteta (Slika 32A). Ukupno je uzorkovano 369 stabala crnoga bora odnosno oko 740 pojedinačnih izvrtaka koji su unakrsno datirani i korišteni za buduće analize (Tablica 10). Dio izvrtaka, njih oko 40 (koji nisu ovdje prikazani u analizama) nije uspješno datirano.

**Tablica 10.** Ukupna duljina kronologija širina godova (TRI) prema lokalitetima (l) i ukupni broj uzorkovanih stabala (N) gdje su: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borov vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač i PAK – Paklenica.

Lokalitet	BRAC	DINARA	PER	ZEL	SIP	BUD	PAK	VIS	BV
l (god.)	170	144	414	426	216	262	180	296	308
N (stabala)	21	24	35	27	23	55	11	30	143

Sve istraživane kronologije imaju izraženi populacijski signal (EPS) veći od 0.85 za razdoblje od 1900. do 2018. godine stoga su daljnje usporedbe i analize napravljene za to razdoblje. Naime, izraženi populacijski signal (EPS) kvantificira koliko dobro kronologija temeljena na konačnom broju stabala predstavlja hipotetsku savršenu ili pravu kronologiju (Wigley, T. M. L. i sur. 1984).



**Slika 32.** Rezidualne kronologije crnoga bora prema istraživanim lokalitetima **A**) i veličina uzoraka širina godova prema godinama **B**).

Iz slike 32 B je vidljivo da je najveći broj uzoraka (>360 kom.) upravo u razdoblju od 1850. do 2019. godine) a sa povećanjem vremenskog razdoblja taj broj uzoraka pada do oko 40 komada do 1650. godine.

### 5.3.3. Sličnosti između kronologija crnoga bora

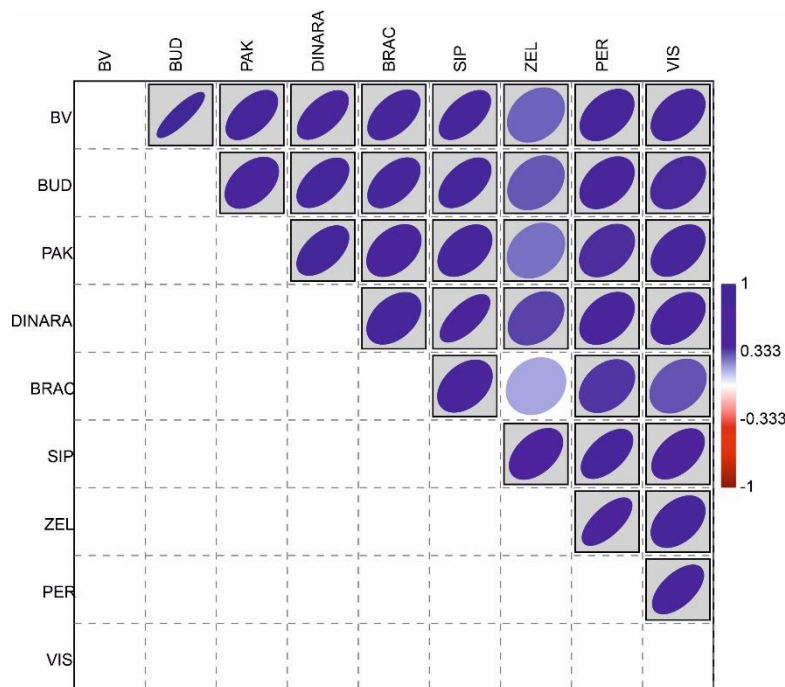
Usporedbom između rezidualnih kronologija za razdoblje od 1901. do 2017. godine prema međusobnim korelacijskim koeficijentima utvrđeno je da svi istraživani lokaliteti pozitivno i značajno koreliraju osim lokaliteta sa Zelengore (BIH) i s otoka Brača (HR). Raspon korelacijskih koeficijenata se kreće od 0.17 (Brač sa Zelenogrom) do 0.86 (Borov Vrh sa Budimom). Općenito gledano lokaliteti sa područja zapadnih Dinarida (Hrvatska) međusobno pokazuju veće korelacije

u odnosu na lokalitete sa istočnih Dinarida (Bosna i Hercegovina) te obrnuto. Zanimljivo je da od svih lokaliteta jedino crni borovi u okolini Šipova pokazuju značajnu korelaciju (od 0.39 do 0.68) sa lokalitetima iz Hrvatske (Tablica 11). Generalno govoreći lokaliteti sa područja istočnih Dinarida (BIH) međusobno su sličniji odnosno imaju veće međusobne korelacije u odnosu na lokalitete sa zapadnih Dinarida.

**Tablica 11.** Vrijednost Perasonovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija crnoga bora prema lokalitetima za razdoblje od 1900.–2017. godine.

Lokaliteti	BV	BUD	PAK	DINARA	BRAC	SIP	ZEL	PER	VIS
BV		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
BUD	0,86		0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
PAK	0,56	0,45		0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
DINARA	0,60	0,54	0,54		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BRAC	0,52	0,52	0,41	0,42		0,000	0,069	0,000	0,001
SIP	0,58	0,53	0,43	0,68	0,39		0,000	0,000	0,000
ZEL	0,28	0,30	0,26	0,34	0,17	0,47		0,000	0,000
PER	0,43	0,40	0,37	0,40	0,35	0,56	0,68		0,000
VIS	0,43	0,38	0,43	0,41	0,31	0,50	0,43	0,59	

Kako bismo analizirali sličnosti između varijabilnosti rasta stabala crnoga bora, odnosno njihovih kronologija (RWIs) te determinirali lokalitete sa sličnim obrascima korištena je metoda Hierarchical agglomerative clustering HCPC (Ward's method) pomoću euklidske udaljenosti. Wardov postupak je metoda varijance koja pokušava generirati klastere kako bi se smanjila varijanca unutar klastera. Za svaki klaster izračunavaju se srednje vrijednosti za sve varijable. Zatim se za svaki objekt izračunava kvadrat euklidske udaljenosti do srednje vrijednosti klastera. Ove se udaljenosti zbrajaju za sve objekte.



**Slika 33.** Korelacijska matrica s prikazanim vrijednostima korelacijskog koeficijenta između rezidualnih kronologija crnoga bora između istraživanih lokaliteta. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) korelacije su označene zasjenjenim poljima. Gdje su: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borov vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač i PAK – Paklenica.

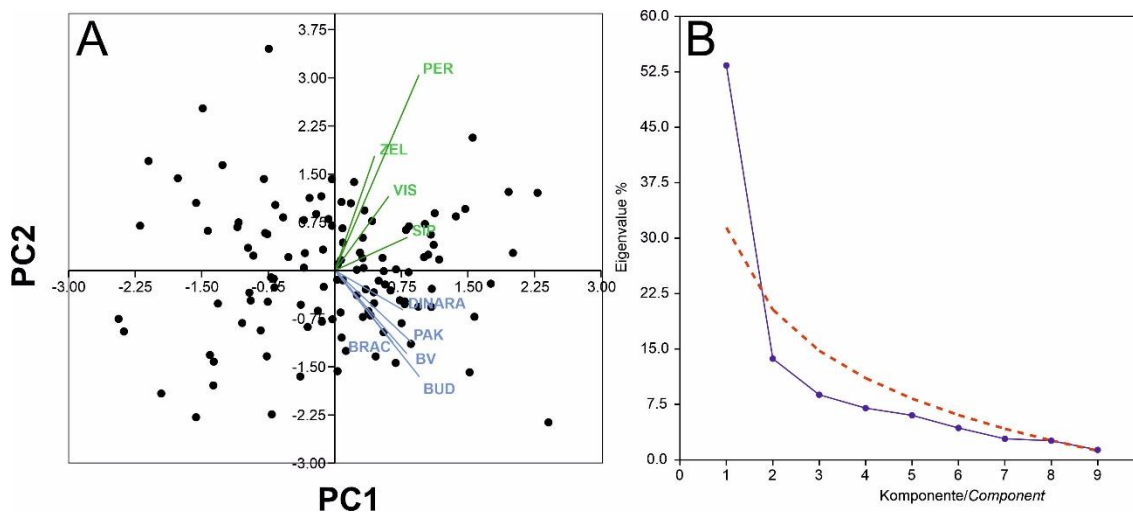
Rezultati analize prikazani su na Slici 33. Iz rezultata PC analize vidljivo je da su kronologije s područja unutrašnjih Dinarida (Bosna i Hercegovina) međusobno sličnije s obzirom na varijabilnost kronologija širina godova (RWI) u odnosu na kronologije s područja zapadnih Dinarida (Hrvatska) (Tablica 12), Posebice i kod jedne i druge metode analize sličnosti vidljivo je da borovi s područja NP Paklenica predstavljaju jedinstveni lokalitet u odnosu na sve ostale s područja zapadnih Dinarida. Generalno govoreći ako gledamo rezidualne kronologije crnoga bora tada možemo govoriti o 4 grupe s obzirom na varijabilnost kronologija na istraživanom području.

**Tablica 12.** Vrijednost Perasonovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija crnoga bora prema lokalitetima za razdoblje od 1900.–2017. godine.

od 1900 - 1959									
Lokaliteti	BV	BUD	PAK	DINARA	BRAC	SIP	ZEL	PER	VIS
BV		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
BUD	<b>0,88</b>		0,004	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
PAK	<b>0,48</b>	<b>0,37</b>		0,000	0,015	0,000	0,023	0,000	0,000
DINARA	<b>0,63</b>	<b>0,58</b>	<b>0,48</b>		0,011	0,000	0,006	0,000	0,001
BRAC	<b>0,56</b>	<b>0,56</b>	<b>0,31</b>	<b>0,32</b>		0,013	<b>0,284</b>	0,003	0,000
SIP	0,70	0,61	0,45	0,69	0,32		0,000	0,000	0,000
ZEL	0,37	0,37	0,29	0,35	0,14	0,48		0,000	0,002
PER	0,56	0,53	0,52	0,46	0,38	0,57	0,64		0,000
VIS	0,60	0,53	0,49	0,43	0,46	0,58	0,39	0,68	

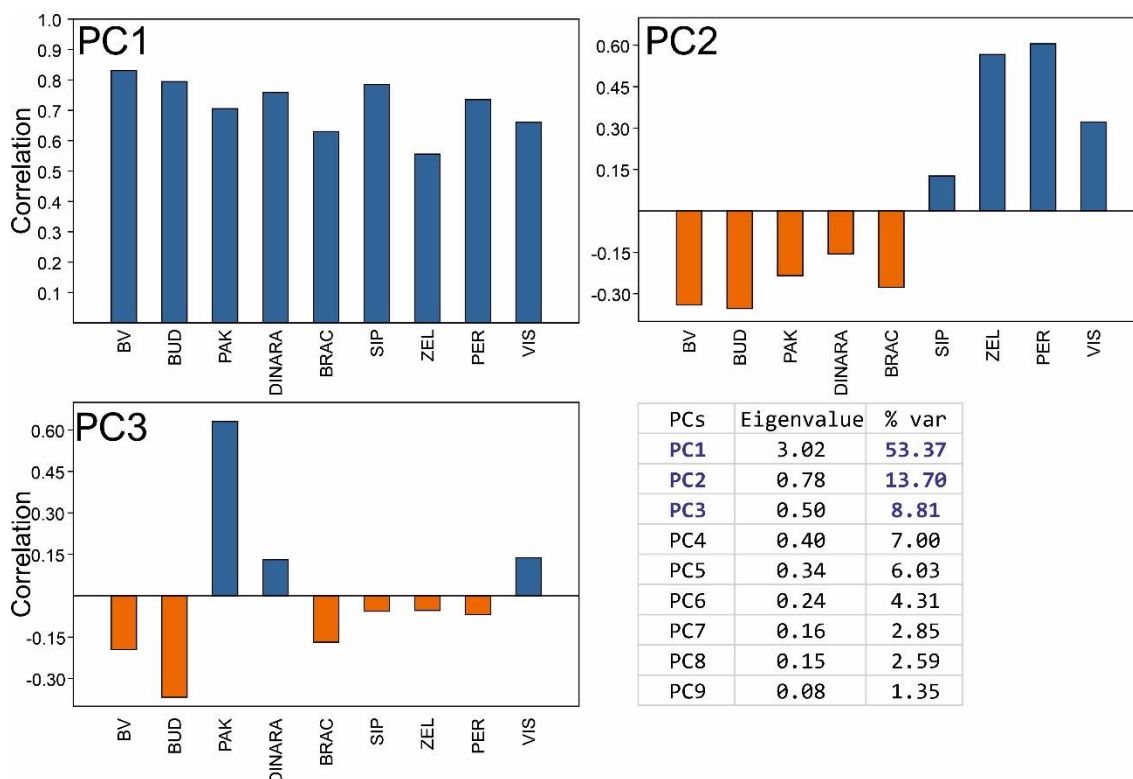
od 1960 - 2017									
	BV	BUD	PAK	DINARA	BRAC	SIP	ZEL	PER	VIS
BV		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	<b>0,169</b>	0,017	<b>0,081</b>
BUD	<b>0,86</b>		0,000	0,000	0,000	0,001	<b>0,128</b>	0,040	<b>0,287</b>
PAK	<b>0,64</b>	<b>0,57</b>		0,000	0,000	0,002	<b>0,099</b>	<b>0,058</b>	0,004
DINARA	<b>0,57</b>	<b>0,51</b>	<b>0,61</b>		0,000	0,000	0,011	0,011	0,002
BRAC	<b>0,49</b>	<b>0,51</b>	<b>0,48</b>	<b>0,48</b>		0,000	<b>0,137</b>	0,011	<b>0,187</b>
SIP	<b>0,45</b>	<b>0,43</b>	<b>0,41</b>	<b>0,67</b>	<b>0,45</b>		0,000	0,000	0,002
ZEL	0,18	0,20	0,22	0,33	0,20	0,45		0,000	0,000
PER	0,32	0,27	0,25	0,33	0,34	0,55	0,73		0,000
VIS	0,23	0,14	0,37	0,40	0,18	0,40	0,47	0,51	



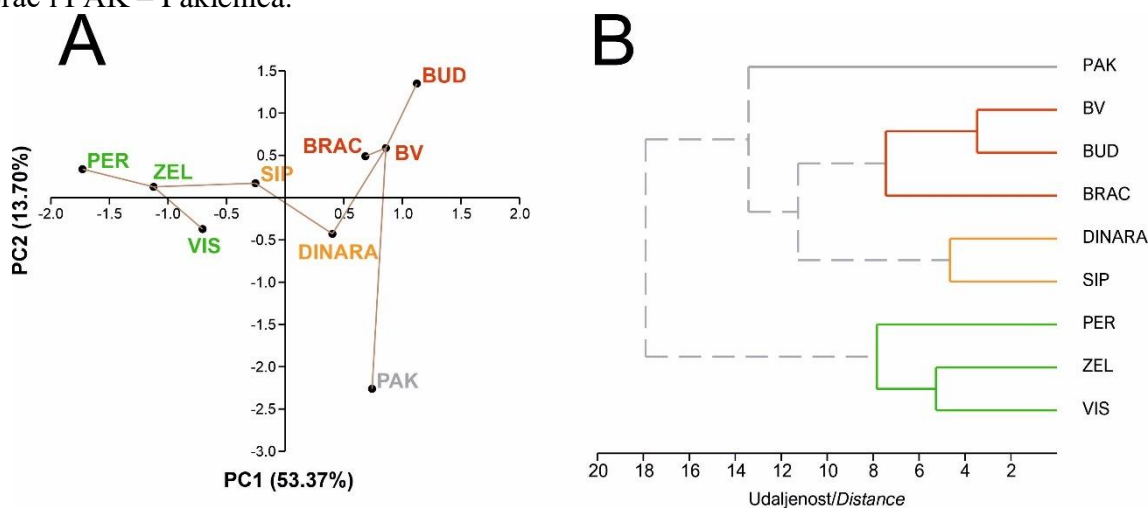
**Slika 34.** Biplot PCA analize za rezidualne kronologije crnoga bora prema lokalitetima A). Ukupna objašnjena varijabilnost komponenti PC analize B). Gdje su: ZEL – Zelengora, PER –



Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borov vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač i PAK – Paklenica.

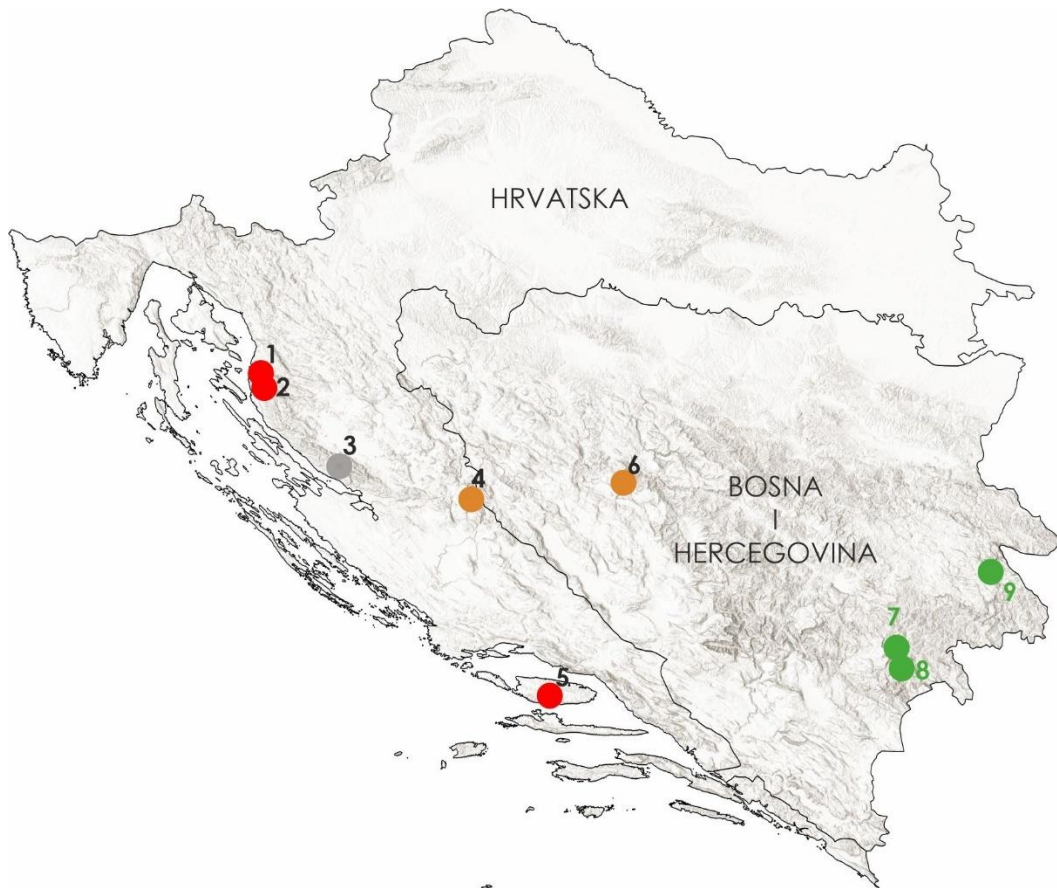


**Slika 35.** Korelacije individualnih kronologijaa u prve tre komponente PC analize. Gdje su: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borov vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač i PAK – Paklenica.



**Slika 36.** Rezultati klasterne analize sličnosti između kronologija crnoga bora prema lokalitetim A). Hijerarhijski diagram sličnosti B). Gdje su: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borov vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač i PAK – Paklenica.





**Slika 37.** Prostorni položaj klastera prema varijabilnosti rezidualnih kronologija širina godova kod crnog bora. Gdje su: 7 – Zelengora, 8 – Perućica, 9 – Višegrad, 6 – Šipovo, 1 – Borov vrh, 4 – Dinara, 5 – Brač i 4 – Paklenica, 2 – Budim. Klasteri odgovaraju rezultatima HCA (Slika 36).

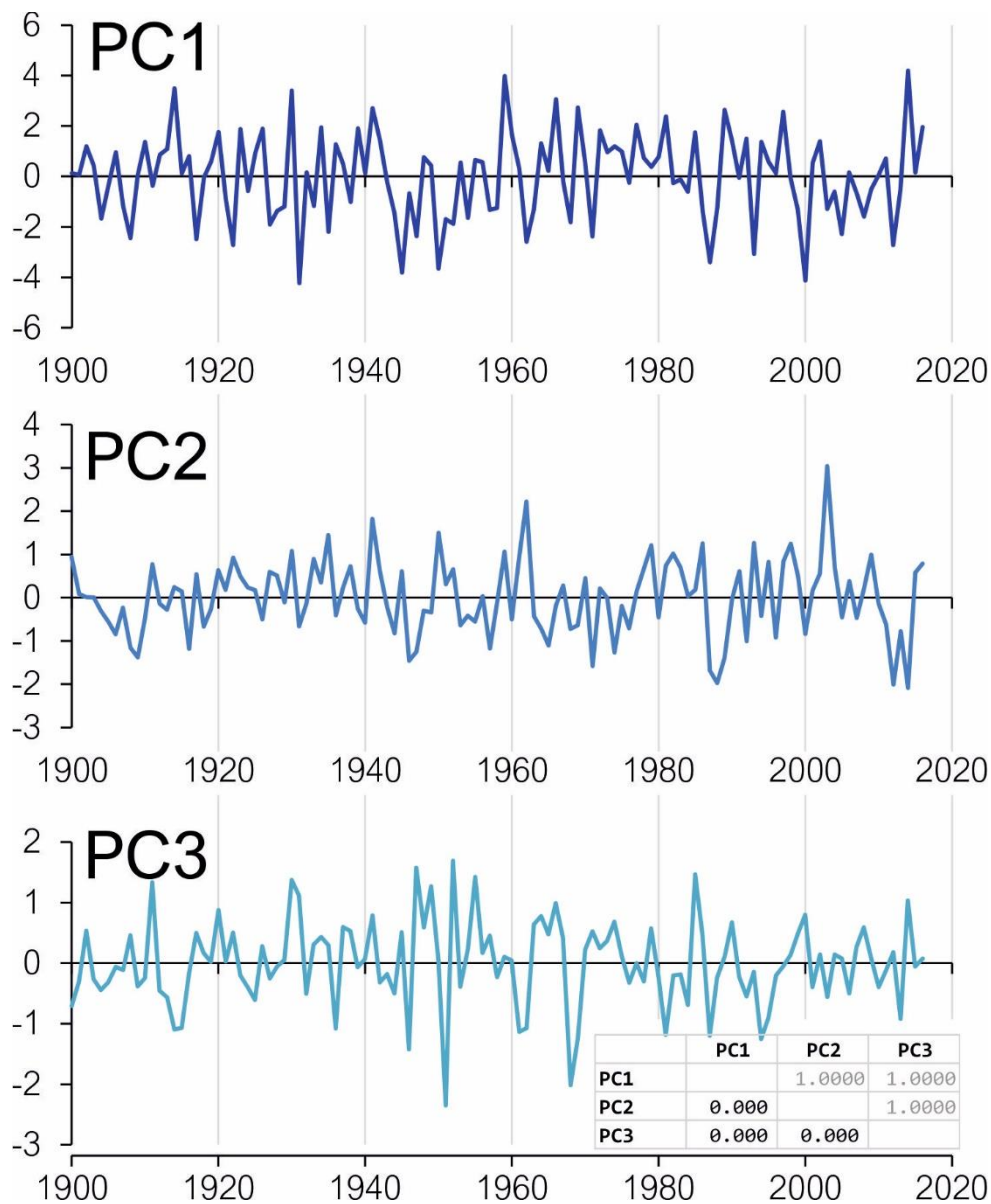
#### 5.3.4. Regionalna kronologija

Kako bismo utvrdili utjecaj klimatskih čimbenika na zajednički signal svih lokaliteta (Slika 37) napravljena je analiza glavnih komponenti (PCA) koristeći rezidualne indeksne kronologije crnoga bora za razdoblje od 1900. do 2008. godine. Analiza glavnih komponenti (engl. *Principal Component Analysis* - PCA) je statistički postupak koji koristi ortogonalnu transformaciju kako bi reducirao skup visoko koreliranih varijabli, u našem slučaju visoko koreliranih rezidualnih kronologija širina godova crnoga bora.

Transformacija je definirana na način da prva glavna komponenta PC1 ima najveću moguću varijancu (to jest, obuhvaća što je moguće više varijabilnosti podataka), a svaka sljedeća komponenta PC2, PC3... ima najveću preostalu moguću varijancu pod ograničenjem da je ortogonalna na prethodne komponente.

Analiza glavnih komponenti otkriva povezanost među varijablama i stoga dozvoljava interpretacije do kojih se inače bez ovako provedene analize ne bi došlo.

Rezultati provedene PCA analize (Slika 34., 35. i 36.) ukazuju da je ukupno objašnjena varijabilnost u prvoj glavnoj komponenti PC1 50,91%, u drugoj PC2 13,52% i u trećoj PC3 9,20%. Drugim riječima od 9 ukupno korištenih inicijalnih varijabli (kronologije širina godova crnoga bora) sa tri komponente PC1, PC2 i PC3 možemo objasniti varijabilnost od ukupno 74% s tim da samo prva glavna komponenta objašnjava gotovo 51%. Ako pogledamo kako svaka pojedina kronologija korelira sa prvom glavnom komponentom (PC1) tada vidimo da sve kronologije imaju pozitivnu i značajnu korelaciju sa glavnom komponentom PC1. Stoga se prva glavna komponenta koristila kako bismo utvrdili zajednički klimatski signal svih istraživanih kronologija zajedno (Slika 38).



**Slika 38.** PC, PC2 i PC3 kronologija rasta stabala crnoga bora. Gdje su: ZEL – Zelengora, PER – Perućica, VIS – Višegrad, SIP – Šipovo, BV – Borov vrh, DIN – Dinara, BRA – Brač i PAK – Paklenica.

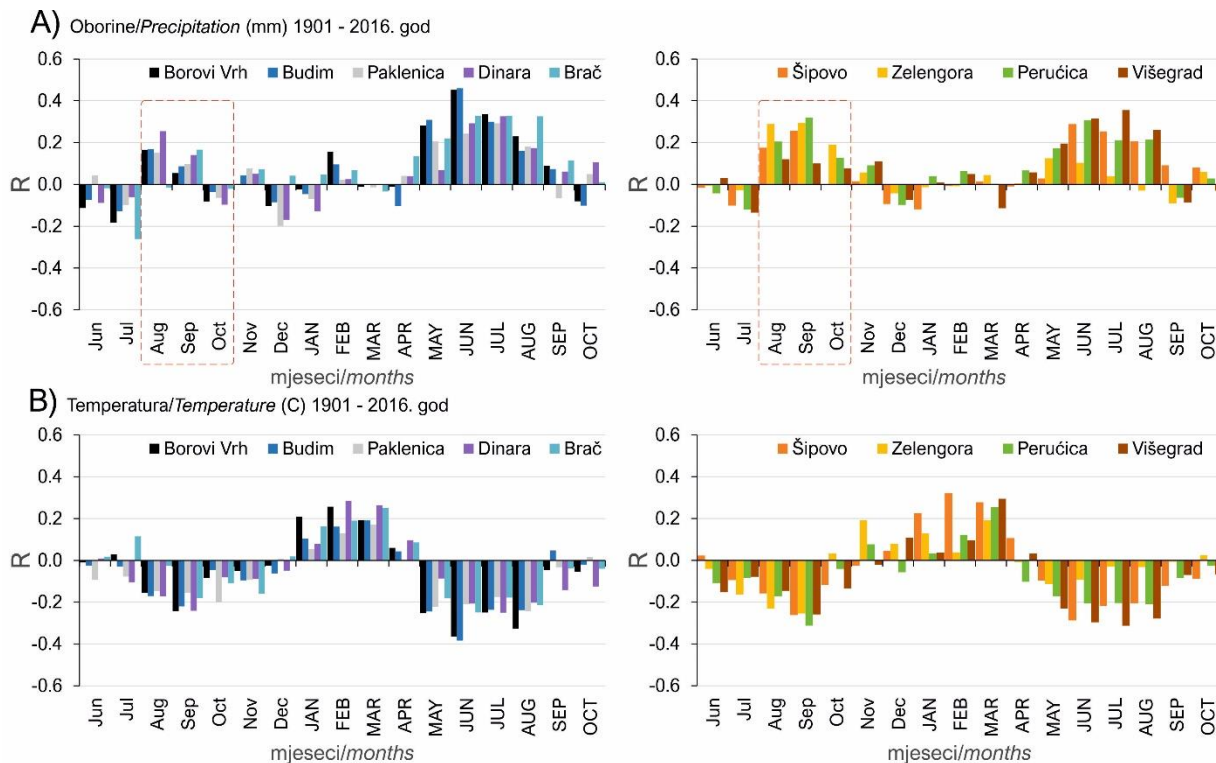
## **5.4. Klimatska osjetljivost crnoga bora**

Klimatska osjetljivost istraživanih borova, odnosno utjecaj klimatskih čimbenika na radijalni prirast stabala istraživani je na dvije razine: lokalnoj i regionalnoj. Lokalna razina obuhvaća identičnu analizu, ali svaki lokalitet reprezentira lokalna kronologija i lokalna klima. Regionalna razina obuhvaća analizu odnosa između mjesečnih i sezonskih vrijednosti klimatskih čimbenika (temperatura zraka, oborine te indeksa suše) s vrijednostima regionalne kronologije.

### **5.4.1. Lokalna klimatska osjetljivost crnoga bora**

Svaka pojedina kronologija širine (RWI) godina crnoga bora korelirana je s lokalnom klimom (sume oborina i prosječnih temperatura zraka za svaki mjesec). Korelacije su napravljene za puno razdoblje od 1901. do 2016. godine te za dva polurazdoblje: 1) od 1901. do 1959. godine i 2) od 1960. do 2016. godine kako bismo ustvrdili promjene u klimatskoj osjetljivosti.

Rezultati analiza za razdoblje od 1901. do 2016. godine ukazuju da svi lokaliteti na području istraživanja imaju pozitivne i značajne ( $p < 0.05$ ) korelacije s oborinama u ljetnim mjesecima i to od svibnja (MAY) do kolovoza (AUG) tekuće godine. Drugim riječima veće količine oborine u ljetnim mjesecima djeluju pozitivno na rast stabala crnoga bora. Vrijednosti koeficijenata korelacije kreću se u rasponu od  $R = 0.21$  do  $0.46$ . Od svih lokaliteta jedino Zelengora ne pokazuje značajne korelacije sa oborinama u ljeto tekuće godine.



**Slika 39.** Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume oborina i prosječnih temperatura zraka) sa svakom pojedinom kronologijom širina godina prema lokalitetima. Malim slovima označeni su mjeseci prethodne godine a štampanim slovima mjeseci tekuće godine nastanka goda. Korelacije su napravljene za razdoblje od 1901. do 2016. godine.

Razlika između zapadnih kronologija u odnosu na istočne jedino je vidljiva u korelacijama s oborinama prethodne godine. Kod istočnih kronologija (Zelengora, Perućica i Šipovo) utvrđene su značajne pozitivne korelacije s oborinama u jesenskim mjesecima prethodne godine i to kolovoz (Aug) i rujan (Sep) (Slika 39). Iznosi ovih korelacija nisu visoki ali su statistički značajni ( $R = 0.26 - 0.32$ ) (Tablica 13).

**Tablica 13.** Vrijednost Pearsonovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija crnoga bora i oborina prema lokalitetima za razdoblje od 1901. do 2016. godine. Malim slovima u kurzivu su označeni mjeseci prethodne godine a velikim mjeseci tekuće godine nastanka goda. Prikazane su samo statistički značajne ( $p < 0.05$ ) korelacije.

mjesec	Borovi V.	Budim	Paklenica	Dinara	Brač	Šipovo	Zelengora	Perućica	Višegrad
<i>Lip</i>									
<i>Srp</i>	-0,18				-0,26				
<i>Kol</i>				0,25		0,18	0,29	0,21	
<i>Ruj</i>						0,26	0,29	0,32	
<i>Lis</i>							0,19		
<i>Stu</i>									
<i>Pro</i>			-0,20						
SIJ									
VELJ									
OŽU									
TRA									
SVI	0,28	0,31	0,21		0,22				0,20
LIP	0,45	0,46	0,24	0,29	0,33	0,29		0,31	0,32
SRP	0,34	0,30	0,29	0,33	0,33	0,25		0,21	0,35
KOL	0,23	0,16	0,18	0,17	0,33	0,21		0,21	0,26
RUJ									
LIS									

Za razliku od oborina, temperature zraka u ljetnim mjesecima negativno koreliraju s kronologijama stabala crnoga bora. Odnosno visoke temperature zraka od svibnja (MAY) do kolovoza (AUG) limitiraju rast stabala crnoga bora na svim lokalitetima.

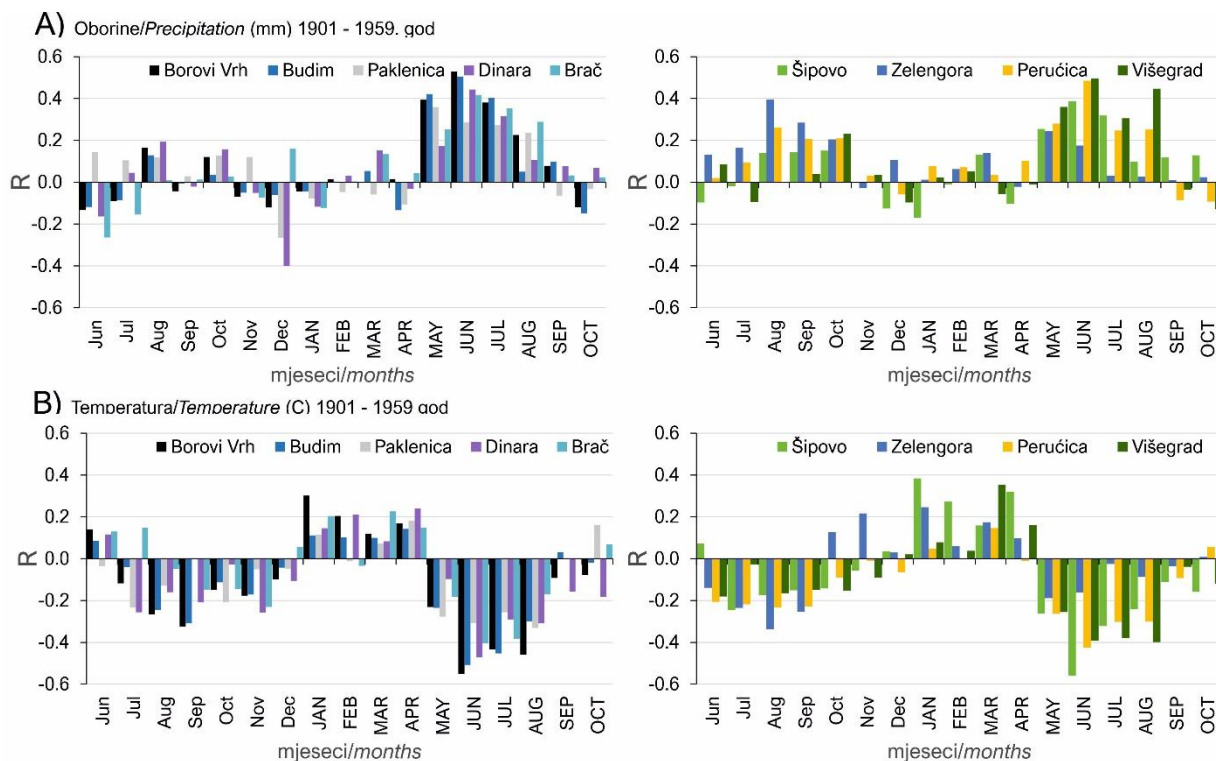
Za razliku od ljetnih temperatura zraka proljetne temperature (od siječnja do ožujka) pokazuju značajne pozitivne korelacije s kronologijama rasta stabala crnoga bora. Odnosno tople zime i visoke temperature zraka u rano proljeće pozitivno djeluju na rast stabala crnoga bora na svim lokalitetima (Tablica 14).



**Tablica 14.** Vrijednost Pearsonovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija crnoga bora i temperature zraka prema lokalitetima za razdoblje od 1901. do 2016. godine. Malim slovima u kurzivu su označeni mjeseci prethodne godine, a velikim mjeseci tekuće godine nastanka goda. Prikazane su samo statistički značajne ( $p < 0.05$ ) korelacije.

mjesec	Borov V.	Budim	Paklenica	Dinara	Brač	Šipovo	Zelengora	Perućica	Višegrad
<i>Lip</i>									
<i>Srp</i>									
<i>Kol</i>							-0,23		
<b>Ruj</b>	<b>-0,24</b>	<b>-0,22</b>	<b>-0,15</b>	<b>-0,24</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,26</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,31</b>	<b>-0,26</b>
<i>Lis</i>			<b>-0,20</b>						
<i>Stu</i>							<b>0,19</b>		
<i>Pro</i>									
<b>SIJ</b>	<b>0,21</b>				<b>0,16</b>	<b>0,23</b>			
<b>VELJ</b>	<b>0,26</b>	<b>0,16</b>		<b>0,29</b>	<b>0,19</b>	<b>0,32</b>			
<b>OŽU</b>	<b>0,19</b>	<b>0,19</b>		<b>0,26</b>	<b>0,25</b>	<b>0,28</b>		<b>0,26</b>	<b>0,29</b>
<b>TRA</b>									
<b>SVI</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,22</b>						<b>-0,23</b>
<b>LIP</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,21</b>	<b>-0,21</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,29</b>		<b>-0,21</b>	<b>-0,30</b>
<b>SRP</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,24</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,22</b>		<b>-0,20</b>	<b>-0,31</b>
<b>KOL</b>	<b>-0,33</b>	<b>-0,24</b>	<b>-0,24</b>	<b>-0,20</b>	<b>-0,21</b>	<b>-0,21</b>		<b>-0,21</b>	<b>-0,28</b>
<b>RUJ</b>									
<b>LIS</b>									

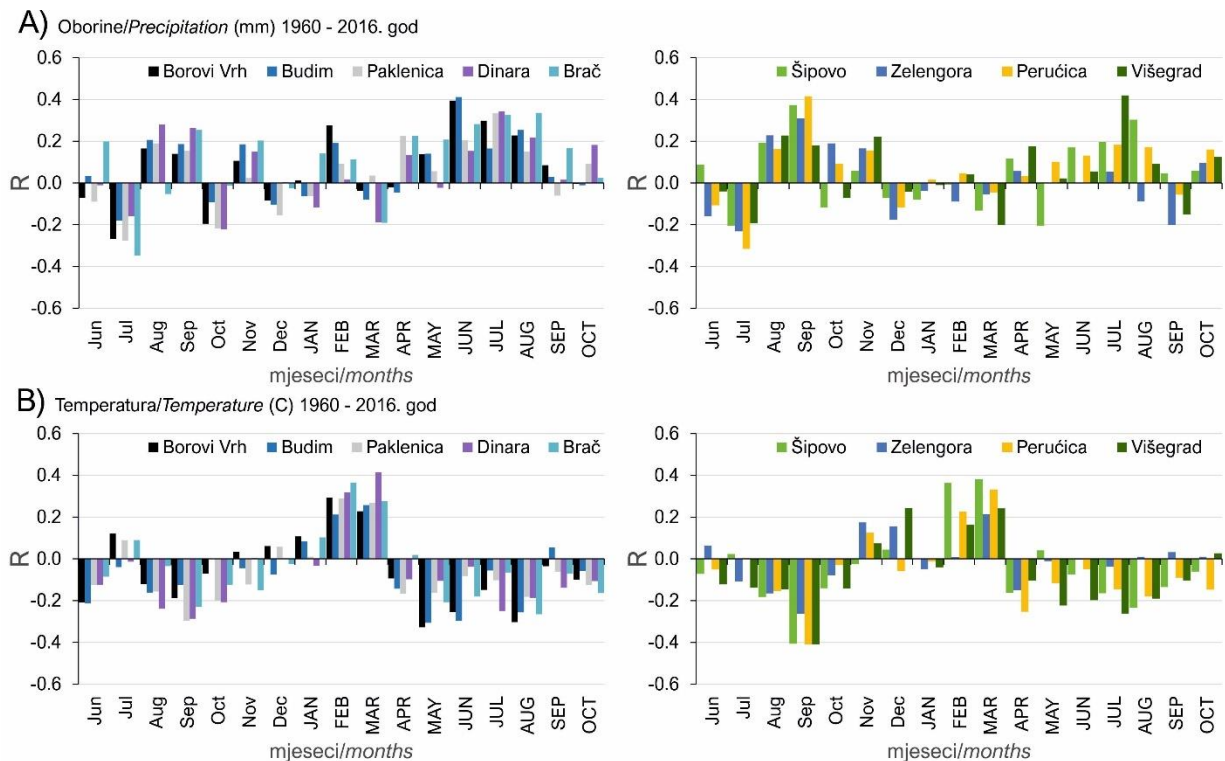
Analiza korelacija za prvo polurazdoblje (od 1901. do 1959. godine) s identičnim klimatskim varijablama pokazala je da koeficijenti korelacije imaju isti predznak kao i za puno razdoblje samo su korelacijski koeficijenti većeg iznosa. Oborine u ljetnim mjesecima djeluju pozitivno dok visoke temperature zraka limitiraju rast stabala crnoga bora gotovo na svim istraživanim lokalitetima. Najveće korelacije s oborinama utvrđene su za mjesec lipanj tekuće godine ( $R=0.30 - 0.53$ ). Obrnuto proporcionalno oborinama, visoke temperature zraka limitiraju rast stabala crnoga bora u razdoblju od 1901. do 1959. godine. Najznačajnije korelacije utvrđene su u mjesecu lipnju (JUN) u rasponu od  $R = -0.31$  do  $R = -0.56$ .



**Slika 40.** Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume oborina i prosječnih temperatura zraka) sa svakom pojedinom kronologijom širina godina prema lokalitetima. Malim slovima označeni su mjeseci prethodne godine a štampanim slovima mjeseci tekuće godine nastanka goda. Korelacije su napravljene za razdoblje od 1901. do 1959. godine.

Analiza korelacija za drugo polurazdoblje (od 1960. do 2016. godine) sa identičnim klimatskim varijablama pokazala je značajnije promjene u koeficijentima korelacije u odnosu na prvo polurazdoblje. Oborine u ljetnim mjesecima djeluju pozitivno dok visoke temperature zraka limitiraju rast stabala crnoga bora, ali s puno manjim iznosima koeficijenata nego u prethodnom polurazdoblju.

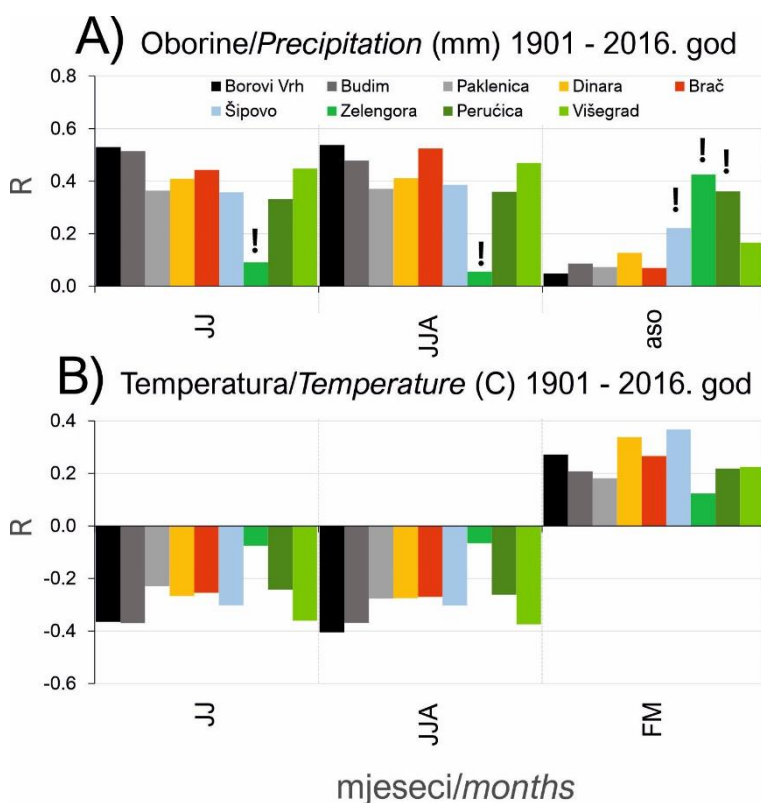
Značajne promjene utvrđene su na zapadno dinarskim lokalitetima, gdje visoke temperature zraka u proljeće tekuće godine od siječnja (JAN) do ožujka (MAR) djeluju pozitivno na rast stabala crnoga bora (Slika 40). Na istočno dinarskim populacijama, oborine prethodne godine djeluju pozitivno na rast stabala tekuće godine i to u ljetnim mjesecima (od kolovoza do listopada).



**Slika 41.** Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume oborina i prosječnih temperatura zraka) sa svakom pojedinom kronologijom širina godina prema lokalitetima. Malim slovima označeni su mjeseci prethodne godine, a štampanim slovima mjeseci tekuće godine nastanka goda. Korelacije su napravljene za razdoblje od 1960. do 2016. godine.

### 5.4.2. Lokalna klimatska osjetljivost crnoga bora – sezonske korelacije

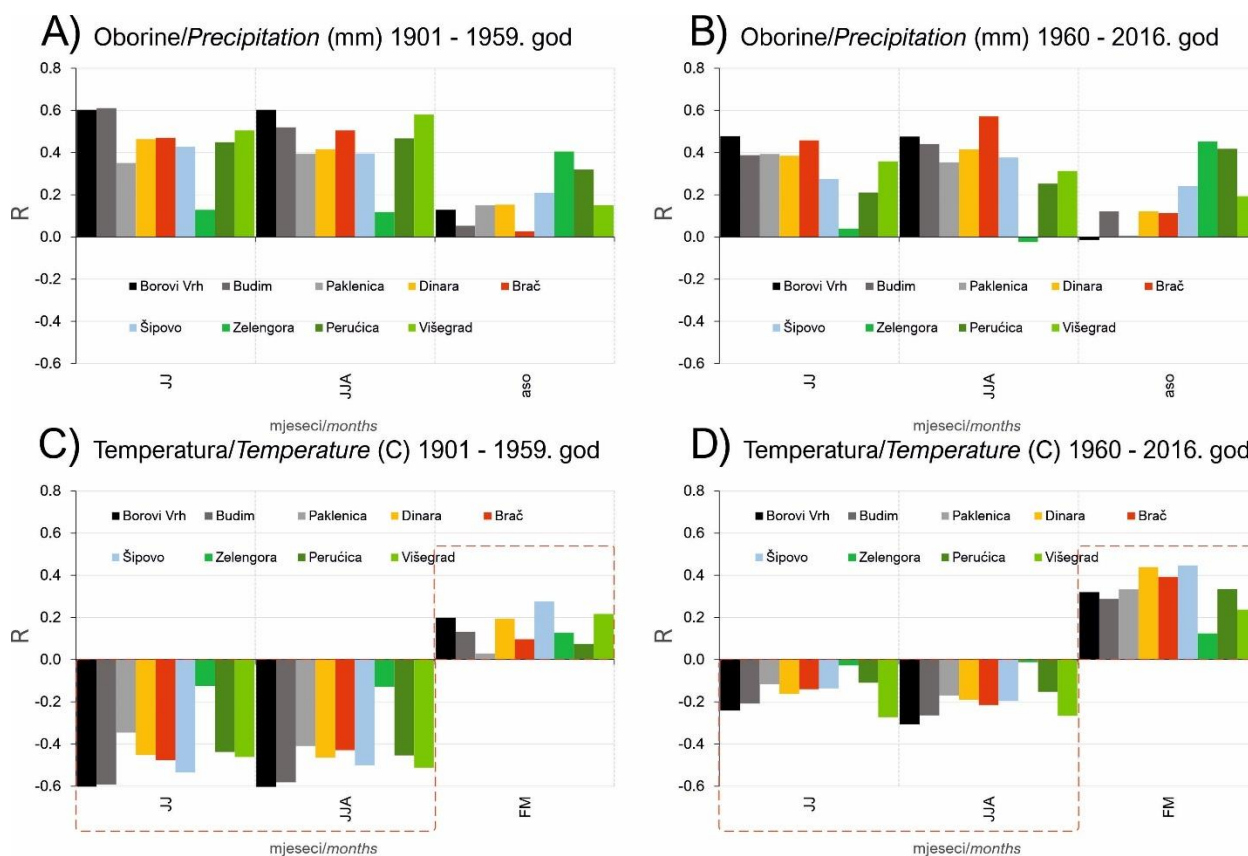
Sezonske korelacije za oborine i temperature zraka za prosjeke ljetnih sezona: lipanj-srpanj (JJ), lipanj-kolovoz (JJA) te kolovoz-listopad prethodne godine (aso) prikazane su na Slici 42. Vidljivo je da lokaliteti sa Zelengore, Perućice, Šipova i Višegrada pokazuju značajne pozitivne korelacije sa oborinama u ljeto prethodne godine (aso) za razliku od svih lokaliteta sa zapadnih Dinarida. Značajne pozitivne korelacije su utvrđene za proljetne temperature zraka (prosjeak veljača-ožujak, FM).



**Slika 42.** Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume oborina i prosječnih temperatura zraka) uprosječeni za sezonu od 2. ili 3. mjeseca. **JJ** – prosjek temperatura zraka ili suma oborina u lipnju i srpnju, **JJA** - prosjek temperatura zraka ili suma oborina od lipnja do kolovoza, **FM** - prosjek temperatura zraka u veljači i ožujku te **aso** – suma oborina od kolovoza do listopada prethodne godine.

Usporedbom sezonskih korelacija (prosjeak sezone od 2. i 3. mjeseca) utvrđene su značajne promjene u iznosu korelacijskih koeficijenata. Naročita promjena je utvrđena u korelacijama s proljetnim temperaturama zraka (prosjeak temperatura zraka od veljače do ožujka) na gotovo svim lokalitetima osim na Zelengori. Crni borovi pokazuju značajnu pozitivnu osjetljivost na više temperature zraka u proljeće tekuće godine.

Značajan pad korelacija sa ljetnim oborinama je utvrđen na svim lokalitetima između dva promatrana polurazdoblja (Slika 43).



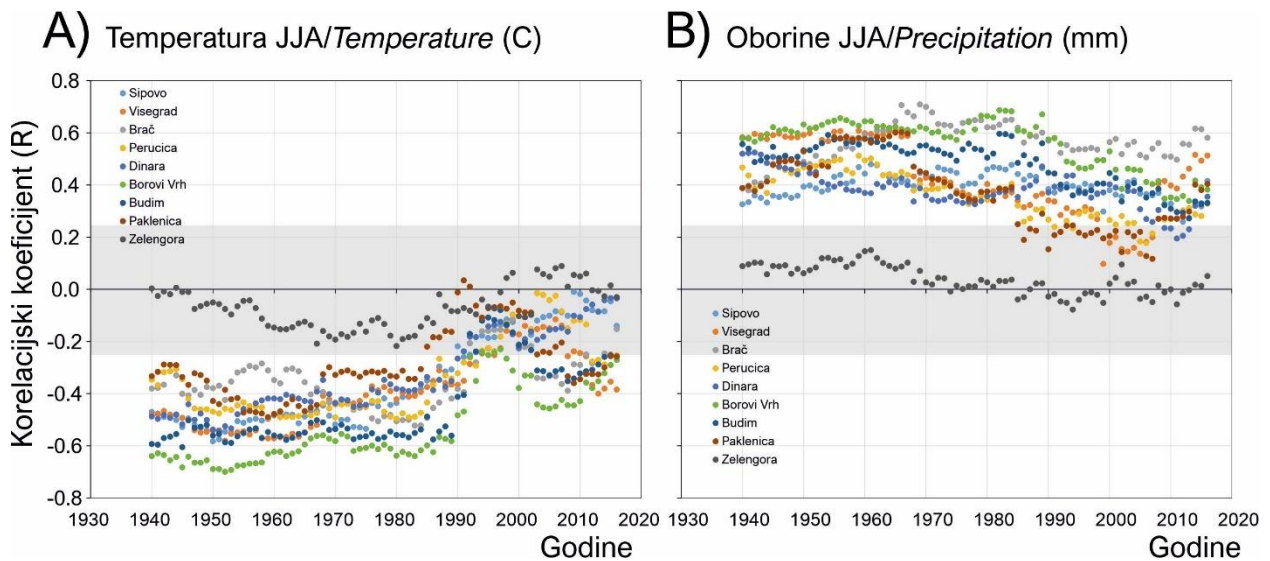
**Slika 43.** Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume oborina i prosječnih temperatura zraka) uprosječeni za sezonu od 2. ili 3. mjeseca za dva polurazdoblja. **JJ** – prosjeak temperatura zraka ili suma oborina u lipnju i srpnju, **JJA** - prosjeak temperatura zraka ili suma oborina od lipnja do kolovoza, **FM** - prosjeak temperatura zraka u veljači i ožujku te **aso** – suma oborina od kolovoza do listopada prethodne godine.

Odnosi promjena korelacijskih koeficijenata između sezonskih vrijednosti klimatskih čimbenika prikazani su pomoću pomičnih korelacija na slikama 44. i 45.

### 5.4.3. Lokalna klimatska osjetljivost crnoga bora – pomične korelacije

Pomične korelacije između rezidualnih kronologija (lokaliteta) i sezonskih vrijednosti oborina i temperature zraka su prikazane na slikama 44. i 45. Pomične korelacije ukazuju na vremensku stabilnost klimatskog signala tijekom promatranog razdoblja te indikativno pokazuju na promjene utjecaja klime na rast stabala.

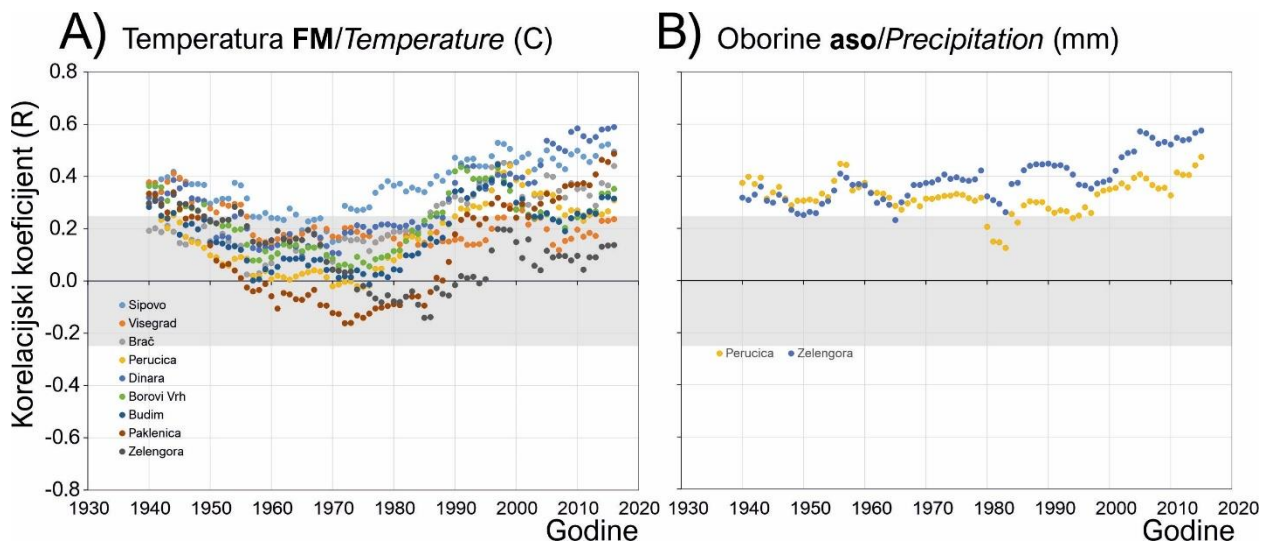
Rezultati pomičnih korelacija s temperaturom zraka u ljeto (lipanj-kolovoz) ukazuju da visoke temperature zraka u ljeto tekuće godine limitiraju rast stabala crnoga bora sve do 1990. godine a nakon toga nisu više statistički značajne (Slika 45A). Suma oborina u ljeto (lipanj-kolovoz, JJA) tijekom razdoblja od 1901. do 1990. godine djeluje pozitivno s trendom postupnog smanjenja vrijednosti korelacije.



**Slika 44.** Pomične korelacije između prosječnih temperatura zraka i sume oborina u ljeto tekuće godine (od lipnja do kolovoza, JJA) za duljinu od 40 godina + 1. godina za razdoblje do 1901. do 2016. godine prema lokalitetima



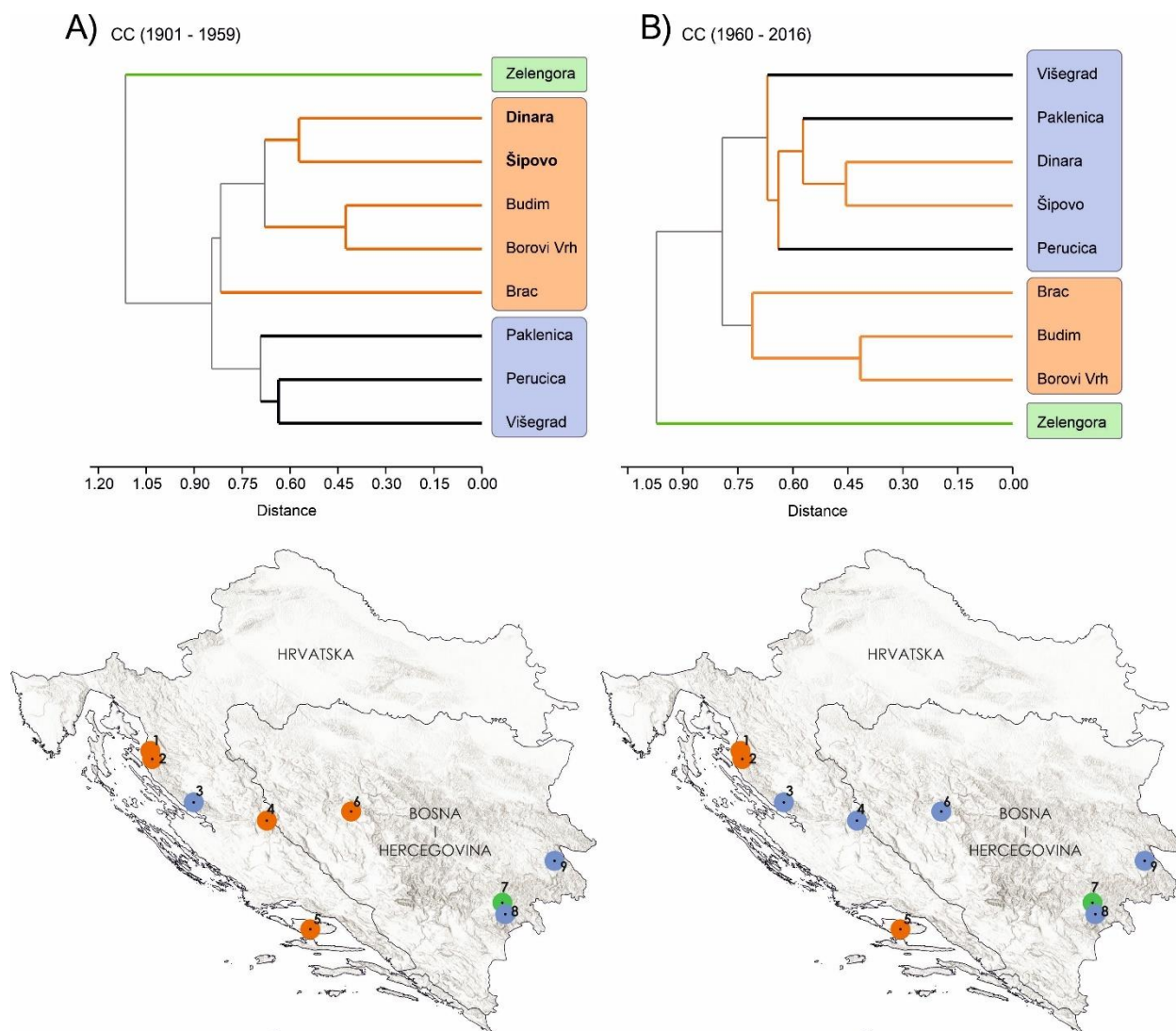
Za razliku od ljetnih temperatura zraka i oborina utvrđeno je značajno povećanje koeficijenta korelacije s temperaturama zraka u proljeće (od veljače – ožujka) gotovo na svim istraživanim lokalitetima (sastojinama). Također značajno povećanje korelacijskih koeficijenata utvrđeno je i za oborine u jesen prethodne godine (kolovoz – listopad, aso) i to posebice na Perućici i Zelengori (Slika 46B).



**Slika 45.** Pomične korelacije između prosječnih temperatura zraka u zimi (veljača i ožujak, FM) tekuće godine **A)** te sume oborina u jesen prethodne godine (kolovoz – listopad, aso) **B)** prema lokalitetima

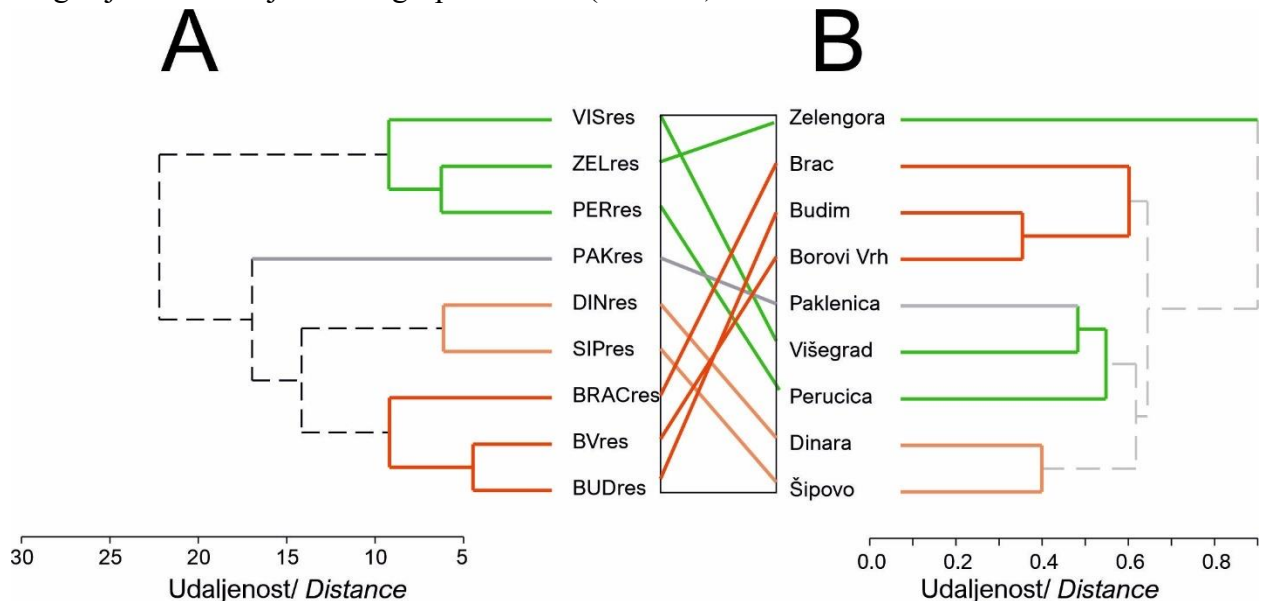
#### 5.4.4. Lokalna klimatska osjetljivost crnoga bora – usporedba između lokaliteta

Usporedbom sličnosti između klimatske osjetljivosti provedene pomoću klusterske analize za dva promatrana razdoblja utvrđene su promjene između istraživanih lokaliteta. Na Slici 46. prikazani su klasteri za razdoblje od 1901. do 1959. i od 1960. do 2016. godine. Vidljivo je da su određeni lokaliteti iz istočnog dijela Dinarida te određeni lokalitete iz zapadnih Dinarida tijekom razdoblja od 1960. do 2016. godine sličniji (sinkroniziraniji) s obzirom na korelacije s klimatskim čimbenicima usporedno s razdobljem od 1901. do 1959. godine.



**Slika 46.** Rezultati klusterske analize prema koeficijentima korelacija za dva polurazdoblja i prikaz dobivenih klastera u geografskom prostoru istraživanih lokaliteta.

Usporedba sličnosti prema klasterima napravljena je i za rezidualne kronologije širina godova te klimatsku osjetljivost s mjesečnim vrijednostima korelacijskih koeficijenata za ukupno razdoblje od 1901. do 2016. godine (slika 47). Ukupno možemo govoriti o 4 klastera ako promatramo kako varijabilnost kronologija tako i korelacije s klimatskim čimbenicima ali pojedinačni lokaliteti se drugačije distribuiraju unutar grupa sličnosti (Slika 47).



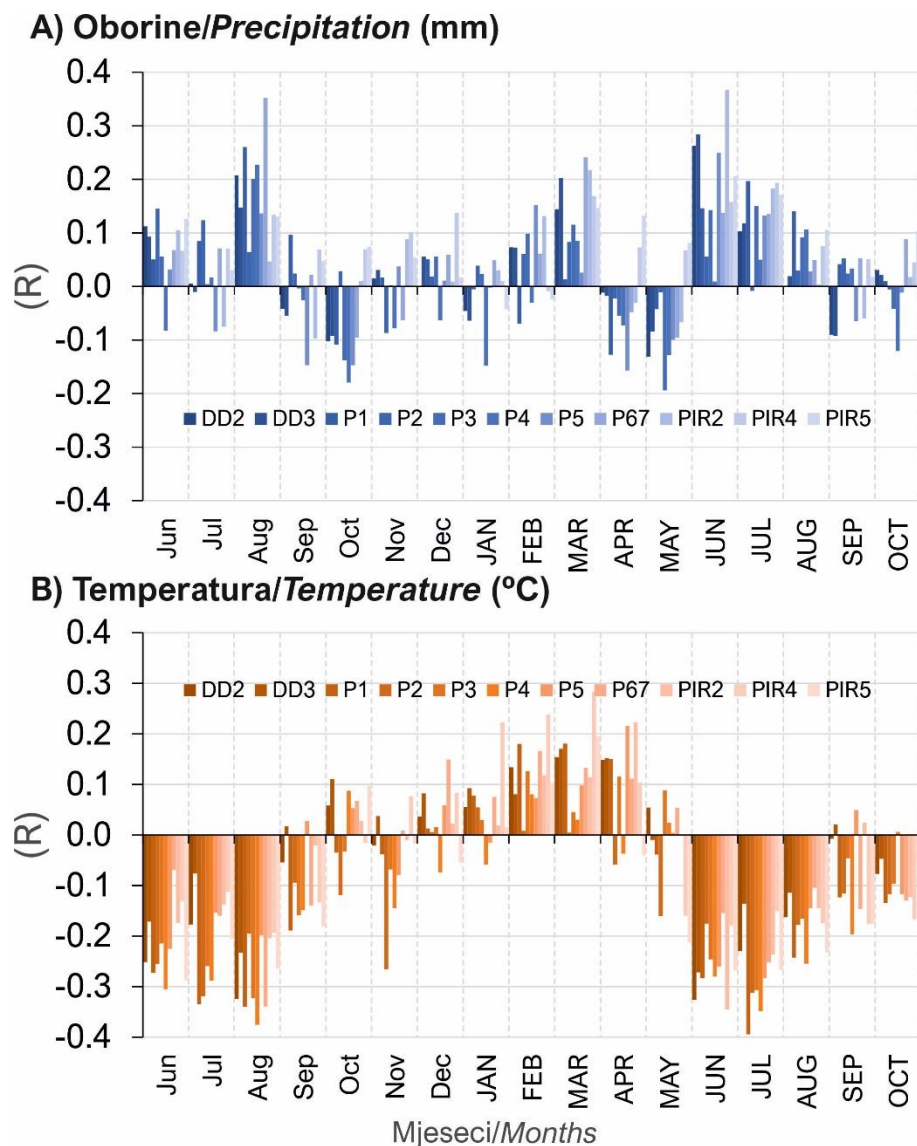
**Slika 47.** Usporedba sličnosti između klastera gdje su klasteri dobiveni pomoću rezidualnih kronologija A te klasteri dobiveni pomoću korelacijskih koeficijenata s klimatskim čimbenicima za razdoblje od 1901. do 2016. godine kod crnoga bora.

### 5.4.5. Lokalna klimatska osjetljivost munike

Svaka pojedina kronologija širine godova (RWI) munike korelirana je sa lokalnom klimom (sume oborina i prosječnih temperatura zraka za svaki mjesec). Korelacije su izračunate za razdoblje 1901.–2016. godine (Slika 48). Kao i kod crnog bora za muniku su analizirana dva razdoblja i to prvo od 1901. do 1959. godine i drugo od 1960. do 2008. godine kako bismo analizirali potencijalne promjene u klimatskoj osjetljivosti.

**Tablica 15.** Vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije između rezidualnih kronologija munike prema pokusnim ploham i klimatskih čimbenika za razdoblje od 1901. do 2016. godine. Malim slovima u kurzivu su označeni mjeseci prethodne godine, a velikim mjeseci tekuće godine nastanka goda. Prikazane su samo statistički značajne ( $p < 0.05$ ) korelacije.

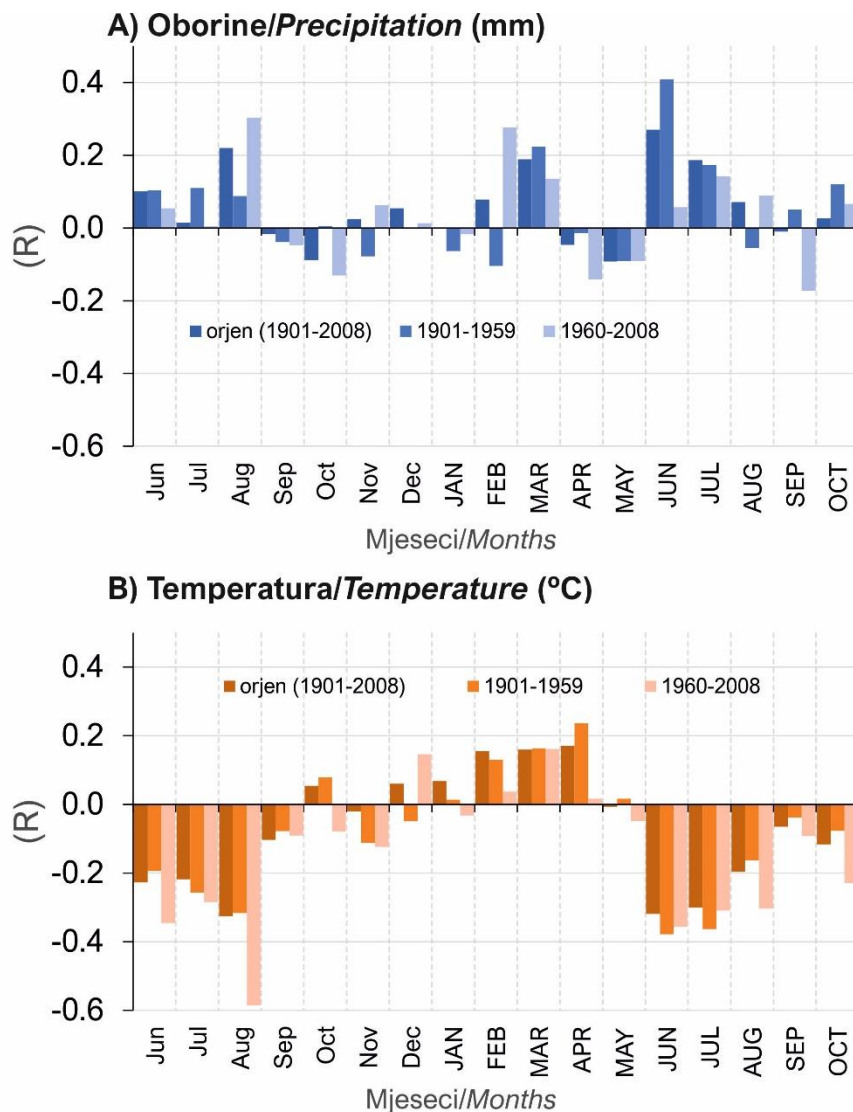
month	coef	DD2	DD3	P1	P2	P3	P4	P5	P67	PIR2	PIR4	PIR5
Prec	<i>Lip</i>											
Prec	<i>Srp</i>											
Prec	<i>Kol</i>			0,26			0,23		0,35			
Prec	<i>Ruj</i>											
Prec	<i>Lis</i>						-0,18					
Prec	<i>Stu</i>											
Prec	<i>Pro</i>											
Prec	<i>SIJ</i>											
Prec	<i>VELJ</i>											
Prec	<i>OŽU</i>		0,20						0,24	0,22		
Prec	<i>TRA</i>											
Prec	<i>SVI</i>					-0,19						
Prec	<i>LIP</i>	0,26	0,28	0,20				0,25		0,37		0,21
Prec	<i>SRP</i>										0,19	
Prec	<i>KOL</i>											
Prec	<i>RUJ</i>											
Prec	<i>LIS</i>											
Temp	<i>Lip</i>	-	-0,17	-0,27	-0,25	-0,21	-0,31	-0,23				-0,29
Temp	<i>Srp</i>			-0,33	-0,32	-0,26	-0,29					-0,21
Temp	<i>Kol</i>	-0,32	-0,23	-0,34	-0,20	-0,32	-0,38	-0,20	-0,34	-0,20	-0,19	-0,26
Temp	<i>Ruj</i>											-0,18
Temp	<i>Lis</i>											
Temp	<i>Stu</i>				-0,27							
Temp	<i>Pro</i>											
Temp	<i>SIJ</i>										0,22	
Temp	<i>VELJ</i>										0,24	
Temp	<i>OŽU</i>		0,17								0,28	0,19
Temp	<i>TRA</i>							0,22		0,22		
Temp	<i>SVI</i>											-0,21
Temp	<i>LIP</i>	-0,33	-0,27	-0,28	-0,18	-0,25	-0,28	-0,26		-0,34	-0,18	-0,27
Temp	<i>SRP</i>			-0,39	-0,31	-0,31	-0,35	-0,28	-0,25	-0,24		-0,27
Temp	<i>KOL</i>			-0,24	-0,18	-0,17	-0,25				-0,17	-0,23
Temp	<i>RUJ</i>					-	-0,20					-0,18



**Slika 48.** Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume oborina i prosječnih temperatura zraka) sa svakom pojedinom kronologijom širina godina prema lokalitetima munike. Malim slovima označeni su mjeseci prethodne godine a štampanim slovima mjeseci tekuće godine nastanka goda. Korelacije su napravljene za razdoblje od 1901. do 2016. godine

Analiza utjecaja klimatskih čimbenika na radijalni rast munike za razdoblje od 1901. do 2016. godine pokazuje da svi lokaliteti na Orjenu imaju pozitivne i značajne ( $p < 0,05$ ) korelacije sa oborinama u ljetnim mjesecima prošle godine i to od srpnja do kolovoza kao i sa oborinama u tekućoj godini i to od lipnja do srpnja (Tablica 15). Dobiveni rezultati pokazuju da oborine u ljeto

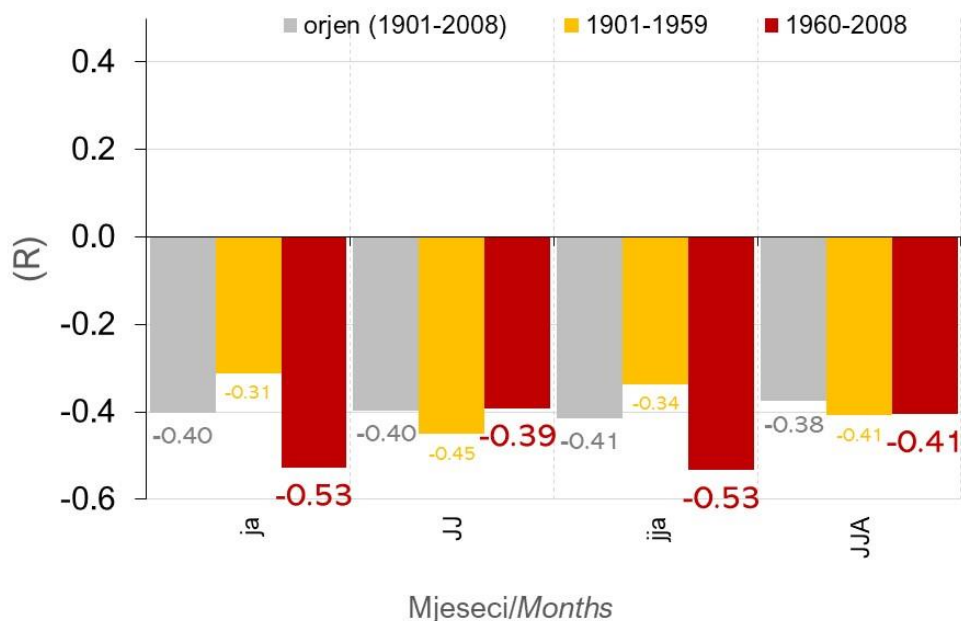
prethodne godine kao i oborine na početku ljeta tekuće godine imaju pozitivan utjecaj na rast stabala munike. Korelacije između rezidualnih kronologija stabala munike i temperature zraka, za razliku od oborina su negativne u ljetnim mjesecima prethodne godine i to od lipnja do kolovoza (jja) kao i od lipnja do kolovoza tekuće godine (JJA). Primijećeno je i to da na lokalitetima Pirina poljana temperatura ima pozitivne korelacije u zimu i rano proljeće i to od siječnja do ožujka (JFM) što implicira da porast temperature u ovim mjesecima pozitivno utječe na rast stabala munike.



**Slika 49.** Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume oborina i prosječnih temperatura zraka) sa ukupnom kronologijom širina godina munike. Ukupno i prema polurazdobljima. Malim slovima označeni su mjeseci prethodne godine, a tiskanim slovima mjeseci tekuće godine nastanka goda.

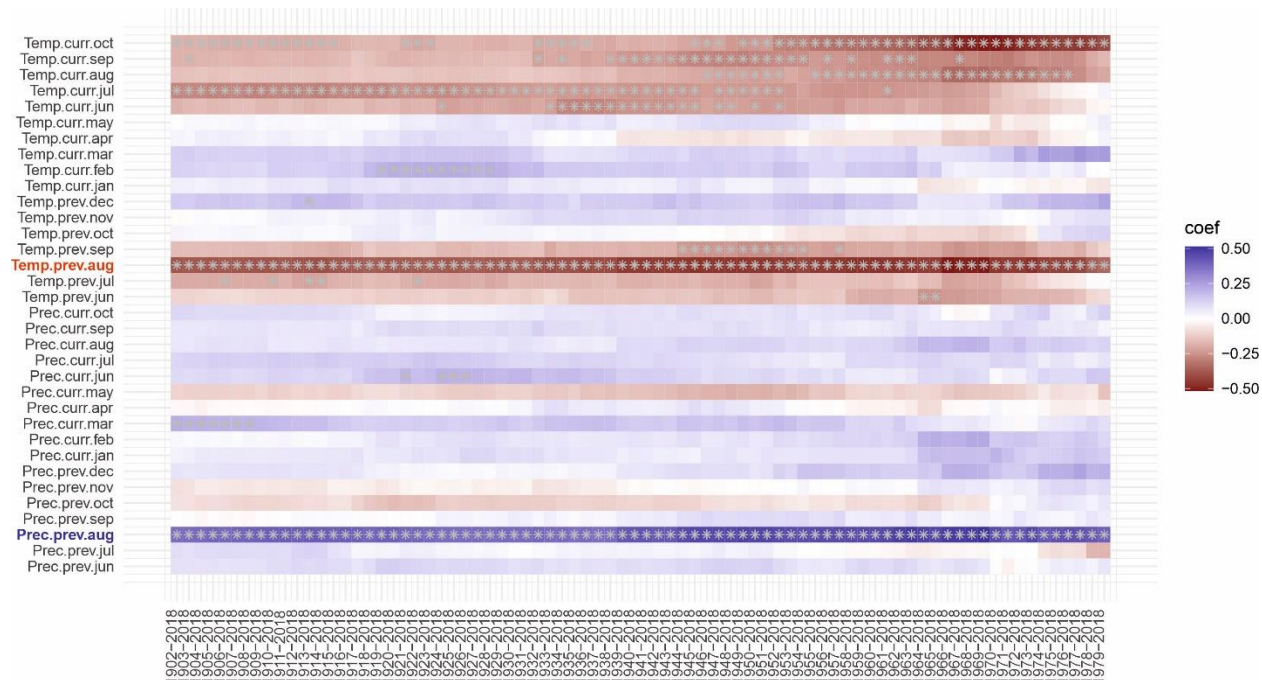


Analiza utjecaja klimatskih čimbenika na rast stabala munike u dva odvojena razdoblja (Slika 49.) pokazuje da nisu primijećene razlike utjecaja klimatskih čimbenika na rast stabala u različitim periodima kao što je to slučaj kod crnog bora. Izuzetak je utjecaj temperature u kolovozu prethodne godine koji pokazuje najveće rezultate negativnog koeficijenta korelacije (- 0,53) za period 1960.–2008. godine (Slika 50).



**Slika 50.** Korelacijski koeficijenti (R) između mjesečnih vrijednosti lokalnih klimatskih čimbenika (sume Oborina i prosječnih Temperatura zraka) uprosječeni za sezonu od 2 ili 3 mjeseca za dva polurazdoblja. **ja** - prosjek temperatura zraka u ljeto prethodne godine (srpanj-kolovoz), **jja** - prosjek temperatura zraka u ljeto prethodne godine (lipanj-kolovoz), **JJ** – prosjek temperatura zraka od srpanja-kolovoza tekuće godine i **JJA** - prosjek temperatura od lipnja do kolovoza tekuće godine.

Pomične korelacije ukazuju da je signal (utjecaj) oborina i temperatura zraka u kolovozu stabilan tijekom promatranog razdoblje (Slika 51).

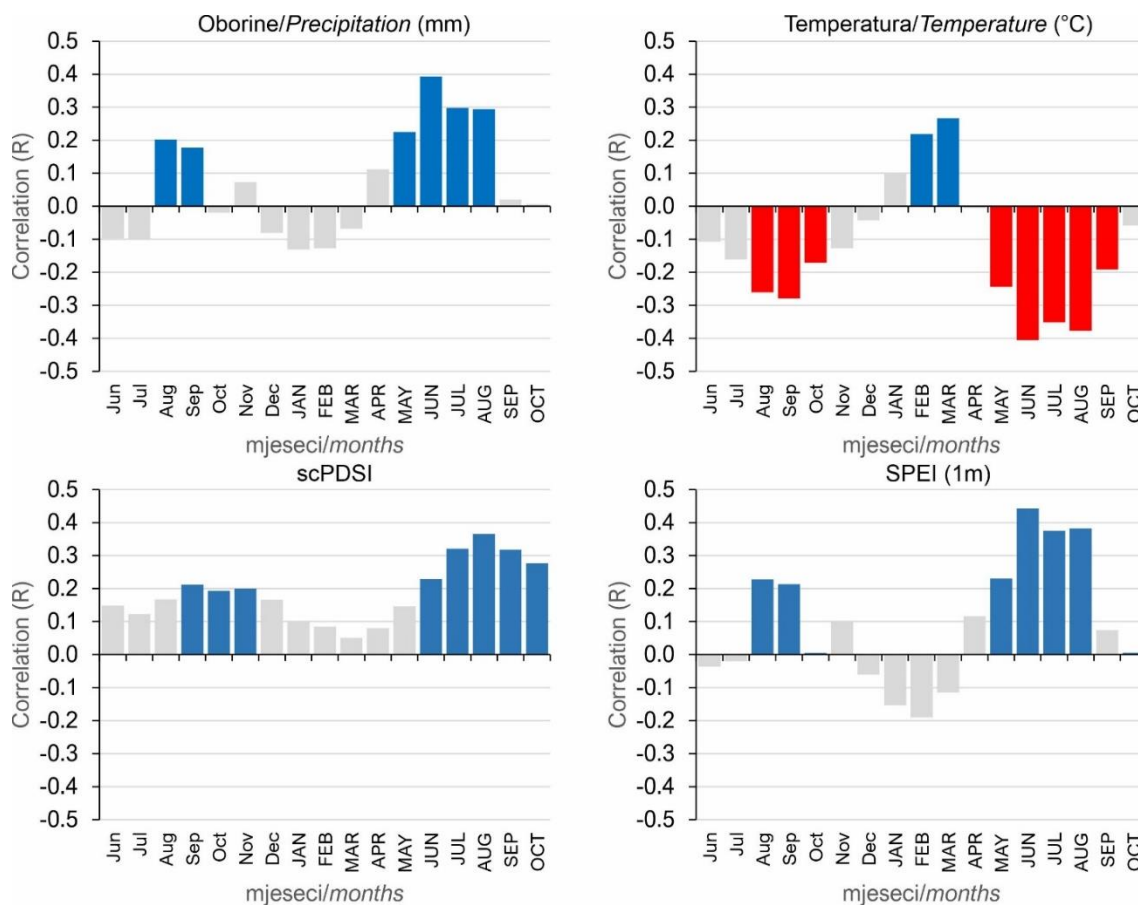


**Slika 51.** Pomične korelacije za svaki mjesec između oborina i temperature zraka te ukupne kronologije munike. Duljina korelacijskog prozora iznosi 40 godina. Zvjezdicom su označene statistički značajne korelacije.

## 5.5. Regionalna klimatska osjetljivost crnoga bora

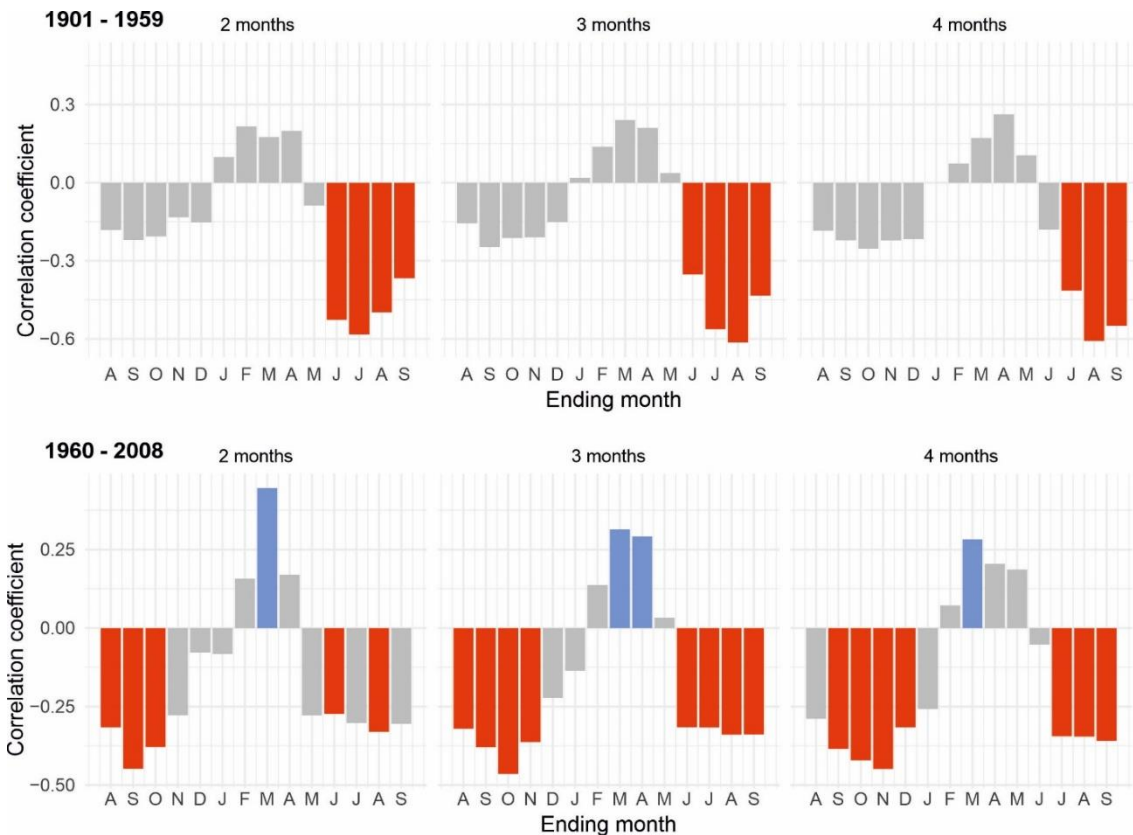
Regionalna klimatska osjetljivost napravljena je pomoću prve komponente PC analize koja objedinjuje zajednički signal svih istraživanih kronologija crnoga bora (vidi poglavlje: 5.3.4. Regionalna kronologija) i prosjeka regionalne klime.

U analizama regionalne klimatske osjetljivosti korišteni su podaci iz prostorno vremenske baze podataka CRU TS verzija 4.06. Podaci u prostornoj rezoluciji  $0.5^\circ$  su uprosječeni za regiju (N35 – N45, S15 – S25) te su u analizama korišteni prosjeci klimatskih serija za četiri klimatska čimbenika (temperaturu zraka, oborine, te indekse suše PDSI i SPEI). Provedene korelacijske analize su napravljene za razdoblje od 1901. do 2008. godine (Slika 52). Zajedničko preklapanje svih kronologija uz uvjet da je  $EPS > 0.85$ .



**Slika 52.** Koeficijenti korelacije između regionalne kronologije PC1 i odabranih klimatskih čimbenika za razdoblje od 1901. do 2008. godine. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) pozitivne korelacije (plavo), negativne (crveno)

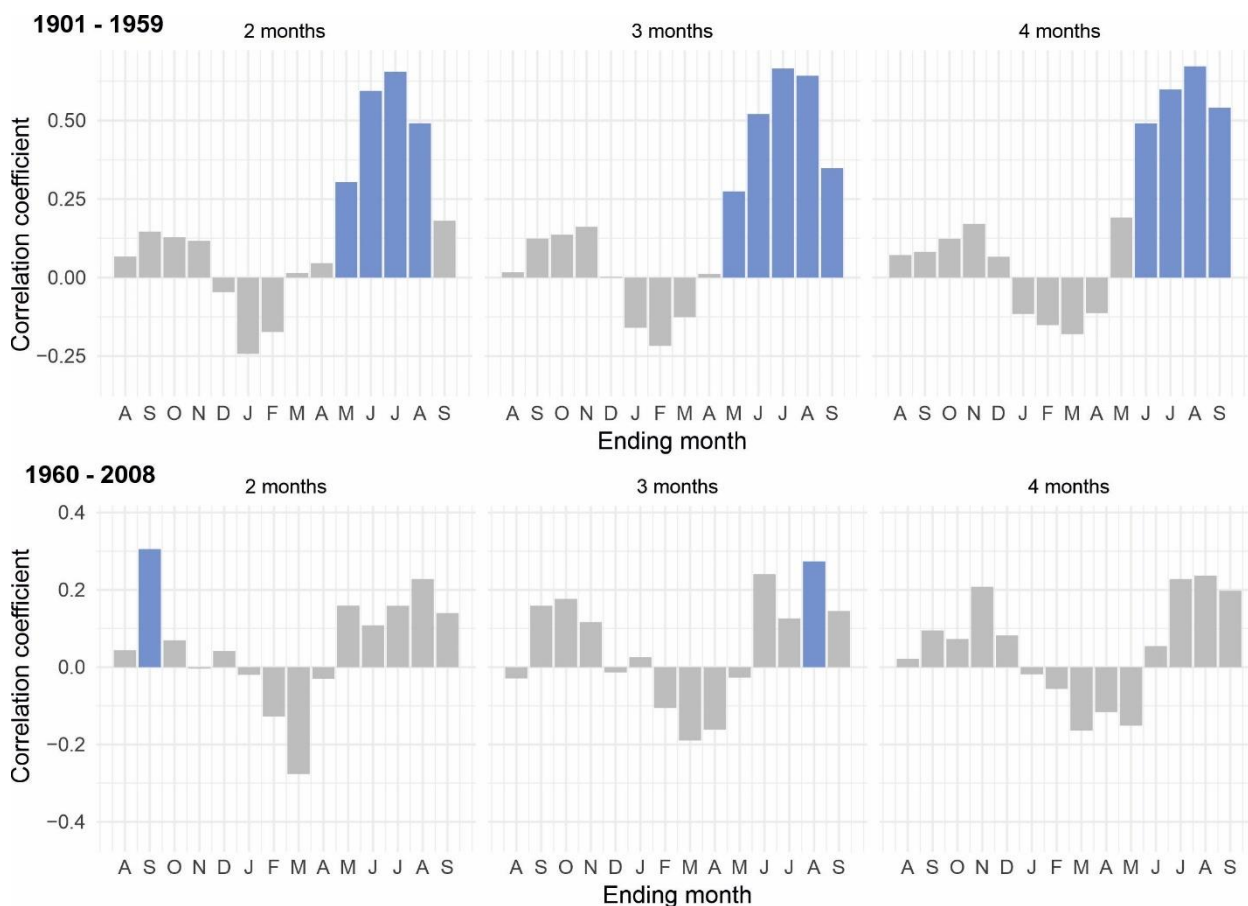
### 5.5.1. Klimatska osjetljivost na sezonske temperature zraka



**Slika 53.** Koeficijenti korelacije između regionalne kronologije PC1 i prosječnih vrijednosti temperature zraka za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja. Na apscisi su prikazani zadnji mjeseci u kojima završava prosjek sezone. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) pozitivne korelacije (plavo), negativne (crveno).

Za razdoblje od 1901. do 1959. godine utvrđene su značajne ( $p < 0.05$ ) negativne korelacije između regionalne kronologije i to za prosječnu temperaturu zraka u ljeto (lipanj – srpanj, JJ) tekuće godine ( $R = - 0.58$ ,  $p < 0.05$ ), odnosno za razdoblje od (lipnja – kolovoza, JJA) ( $R = - 0.61$ ). Za recentnije razdoblje od 1960. do 2008. godine utvrđena je značajna promjena u koeficijentima korelacije u odnosu na prvo polurazdoblje (Slika 53). Naime, korelacije s temperaturama zraka u ljeto tekuće godine su na granici signifikantnosti, ali zato su korelacije s temperaturom zraka u ljeto prethodne (kolovoz – rujn, AS) godine značajne i negativne za razdoblje ( $R = - 0.45$ ,  $p < 0.05$ ). Osim toga, značajne pozitivne korelacije su utvrđene za temperaturu zraka u proljeće (veljača – ožujak, FM) tekuće godine ( $R = 0.45$ ,  $p < 0.05$ ).

## 5.5.2. Klimatska osjetljivost na sezonske oborine

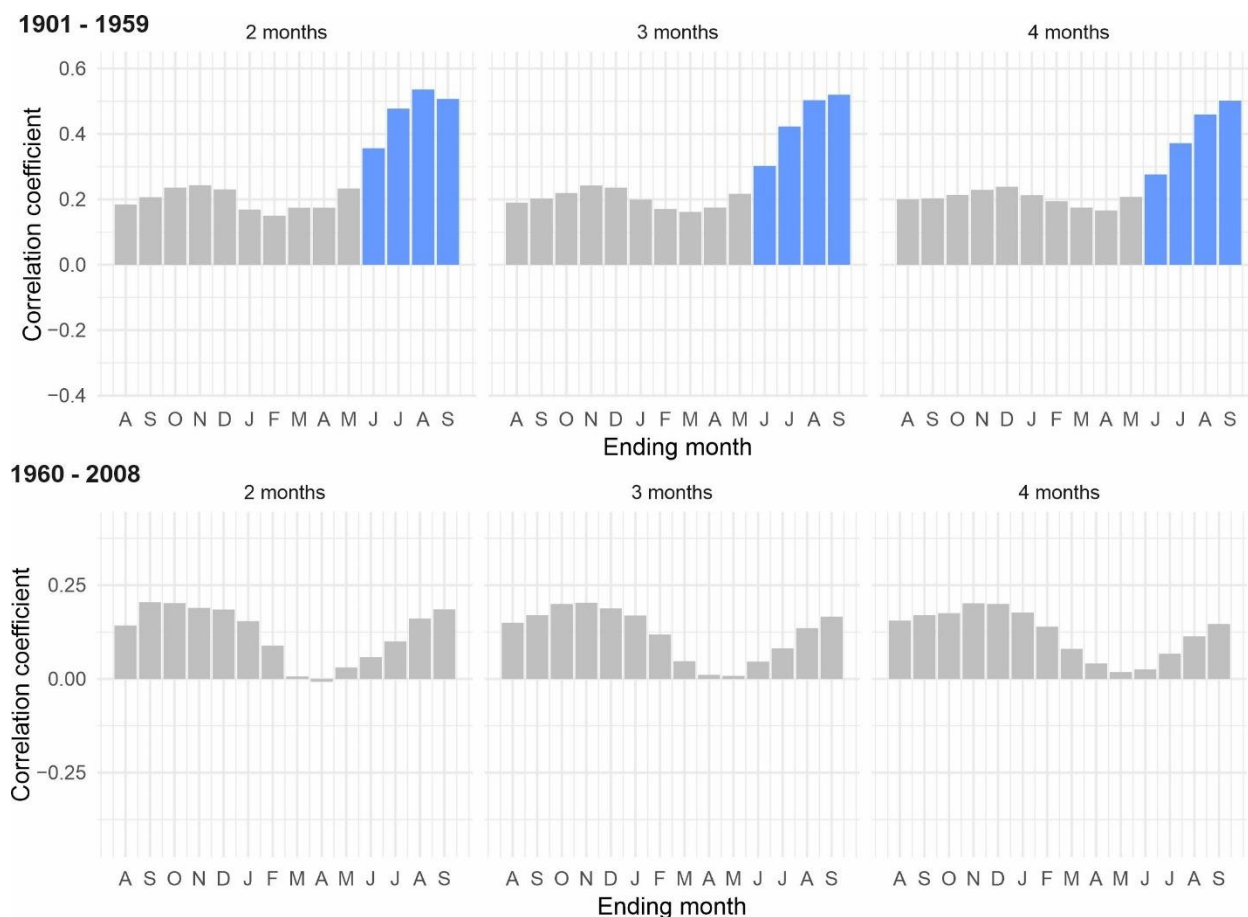


**Slika 54.** Koeficijenti korelacije između regionalne kronologije PC1 i sume oborina za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja. Na apscisi su prikazani zadnji mjeseci u kojima završava prosjek sezone. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) pozitivne korelacije (plavo)

Za razliku od temperatura zraka, oborine pokazuju značajnu pozitivnu korelaciju s regionalnom kronologijom crnoga bora na istraživanom području. Usporedbom koeficijenta korelacije za dva polurazdoblja također su utvrđene značajne promjene. U prvom polurazdoblju (od 1901. do 1959. godine) utvrđene su značajne pozitivne korelacije s ukupnom količinom oborina u ljeto tekuće (lipanj – srpnja, JJ) godine ( $R = 0.66$ ) i za sezonu od tri mjeseca, od lipnja do kolovoza, JJA ( $R = 0.67$ ). U drugom polurazdoblju (od 1960. do 2008. godine) nisu utvrđene značajne i visoke korelacije između oborina i regionalne kronologije (Slika 54)

### 5.5.3. Klimatska osjetljivost na Palmerov indeks jačine suše (scPDSI)

Sezonske korelacije s Palmerovim indeksom jačine suše (PDSI) ukazuju na značajno pozitivan utjecaj suše na varijabilnost radijalnog rasta stabala crnoga bora u jugoistočnoj Europi. U razdoblju od 1901. do 1959. godine značajne pozitivne korelacije su utvrđene za navedeni indeks suše u ljeto tekuće godine (srpanj – kolovoz, JA)  $R = 0.536$  ( $p < 0.05$ ). Pozitivna korelacija ukazuje da što je veći iznos PDSI (veći od 0) to je rast stabala crnoga bora bolji. Kako pozitivne vrijednosti PDSI-a označavaju vlažne, a negativne vrijednosti sušne godine tada je vidljivo da što su ljeta vlažnija da je rast crnoga bora bolji. U drugom polurazdoblju od 1960. do 2008. godine, utjecaj PDSI nije značajan niti u jednom razdoblju (Slika 55).

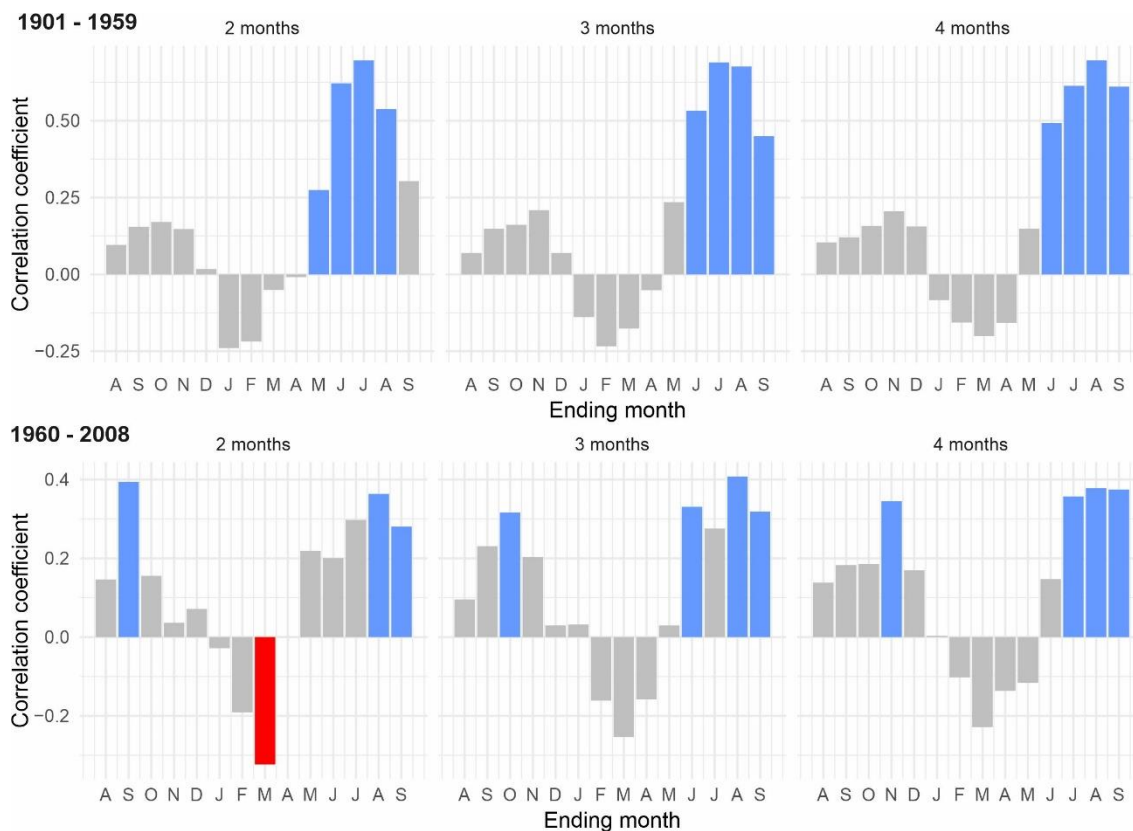


**Slika 55.** Koeficijenti korelacije između prve komponente PC1 rezidualnih kronologija te indeksa suše (PDSI) za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja. Na apscisi su prikazani zadnji mjeseci u kojima završava prosjek sezone. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) pozitivne korelacije (plavo)



#### 5.5.4. Klimatska osjetljivost na indeks suše (SPEI)

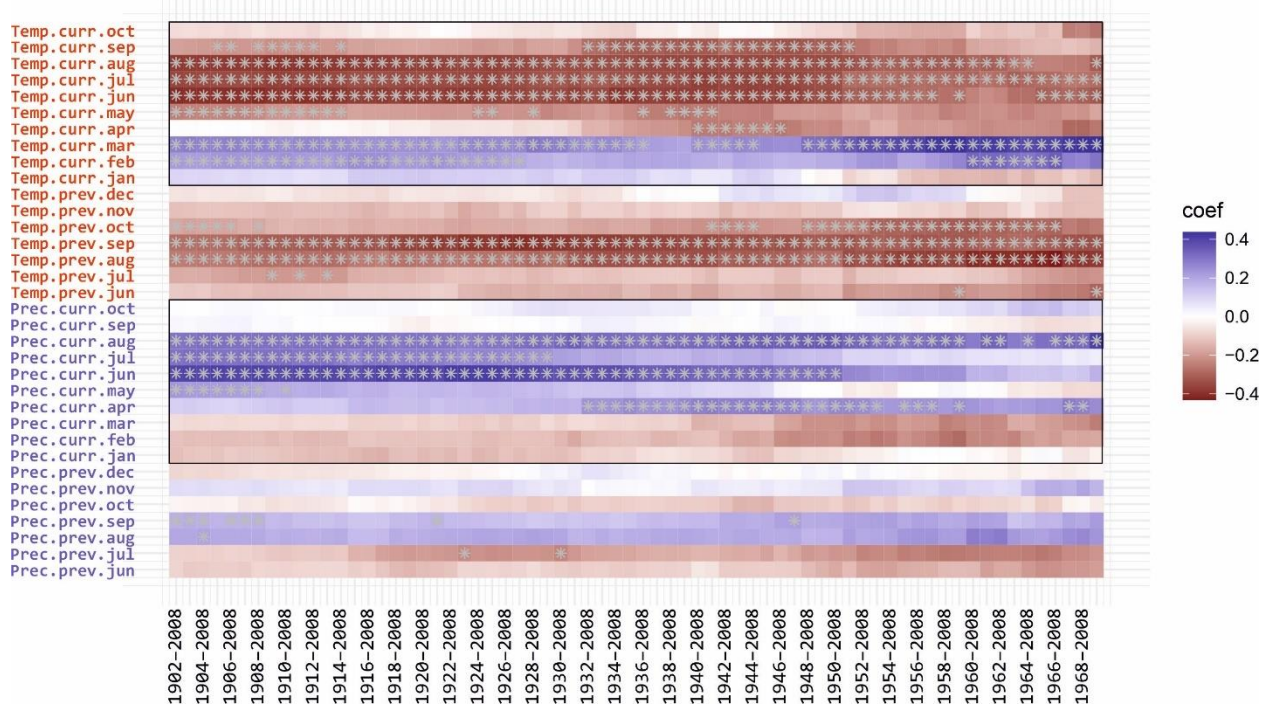
SPEI je indeks koji uzima u obzir i oborine i potencijalnu evapotranspiraciju (PET) pri određivanju suše. Stoga, za razliku od PDSIa, SPEI bilježi glavni utjecaj povišenih temperatura zraka na potražnju za vodom. SPEI se može izračunati na rasponu vremenskih skala od 1 do 48 mjeseci a ovom istraživanju smo koristili SPEI s rasponom od 1 mj. Najveće korelacije sa varijablom SPEI-a utvrđene su u prvom polurazdoblju (od 1901. do 1960. godine) u iznosu  $R=0.70$  za prosjek srpanj - kolovoz dok u drugom polurazdoblju (od 1960. godine do danas) su i dalje pozitivne i značajne, ali sa dvostruko manjim vrijednostima korelacije ( $R=0.30$ ).



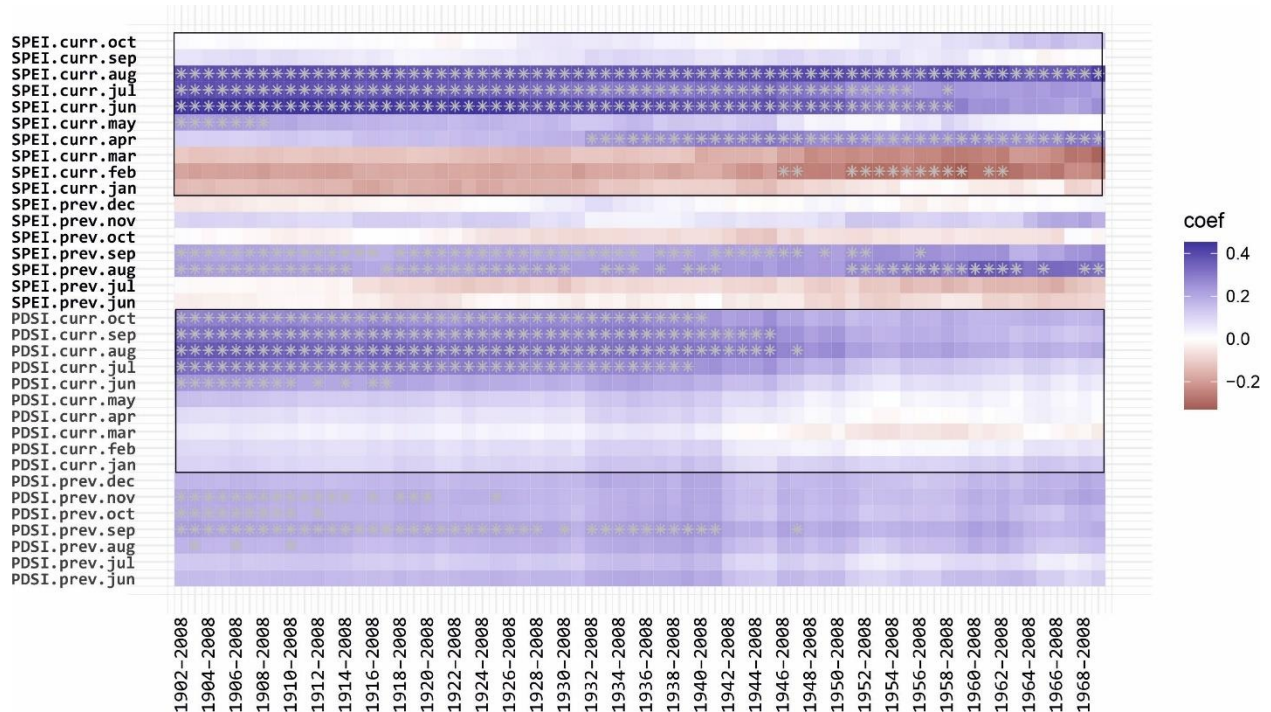
**Slika 56.** Koeficijenti korelacije između prve komponente PC1 rezidualnih kronologija te indeksa suše (SPEI) za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja. Na apscisi su prikazani zadnji mjeseci u kojima završava prosjek sezone. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) pozitivne korelacije (plavo)

### 5.5.5. Vremenska stabilnost klimatske osjetljivosti

Stabilnost klimatskog signala je analizirana koristeći pomične korelacije s duljinom razdoblja od 40 godina od 1901. do 2008. godine. Prvo razdoblje je od 1901. do 1941. godine, drugo od 1902. do 1942. godine itd. Za svako razdoblje je izračunat Pearsonov korelacijski koeficijent sve do 2008. godine. Rezultati pomičnih korelacija ukazuju na stabilnost utjecaja klime na rast stabala tijekom promatranog razdoblje istraživanja.

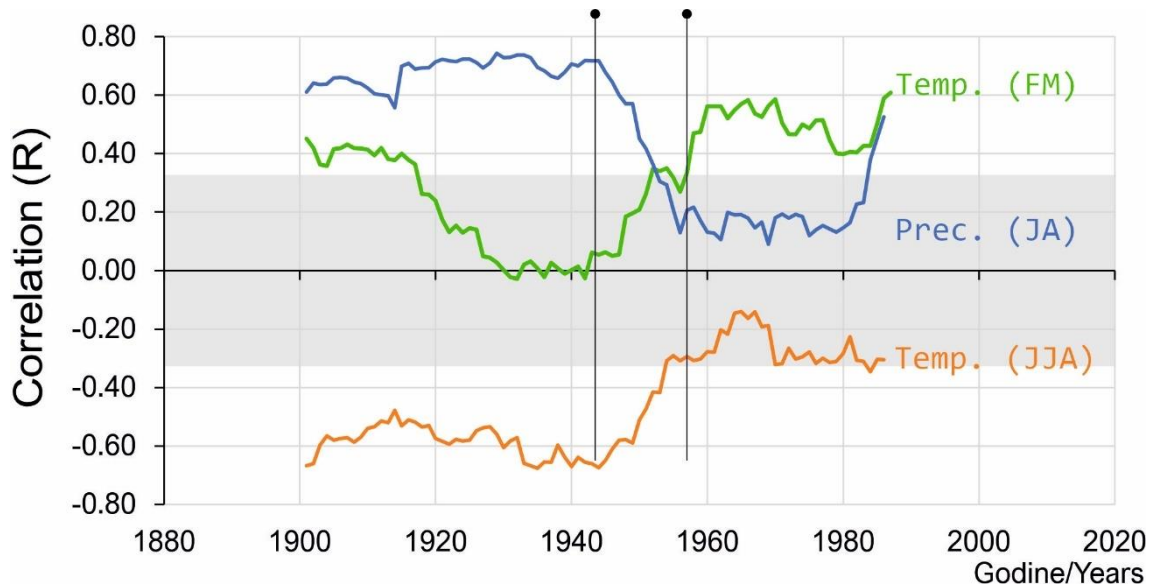


**Slika 57.** Pomične korelacije za svaki mjesec između oborina i temperature zraka. Duljina korelacijskog prozora iznosi 40 godina.



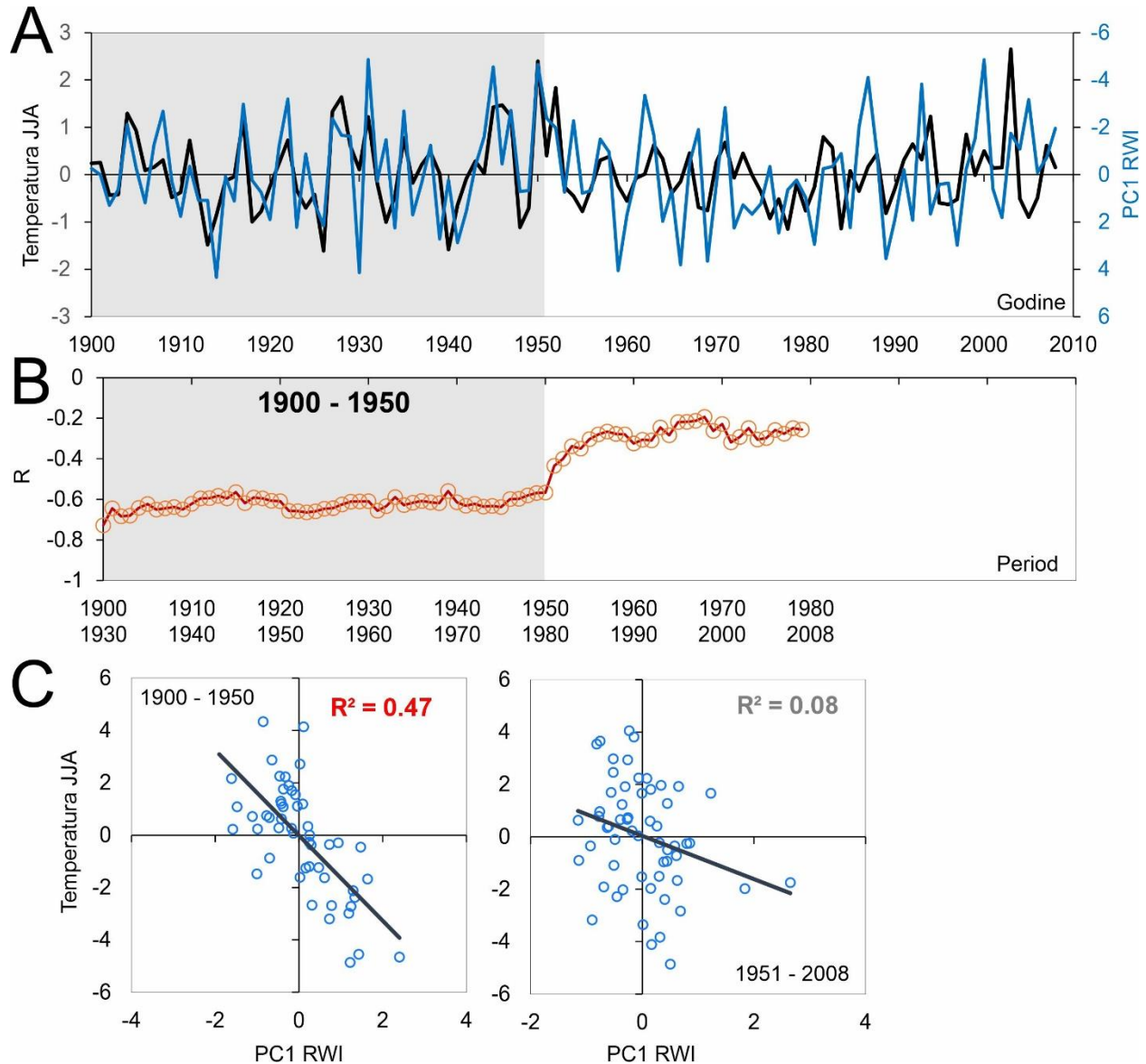
**Slika 58.** Koeficijenti korelacije između prve komponente PC1 rezidualnih kronologija te indeksa suše (PDSI) za različite duljine sezona od 2, 3 i 4 mjeseca za dva polurazdoblja. Na apscisi su prikazani zadnji mjeseci u kojima završava prosjek sezone. Statistički značajne ( $p < 0.05$ ) pozitivne korelacije (plavo)

Rezultati analiza pomičnih korelacija za sezonske vrijednosti klimatskih čimbenika koji su pokazali najveći značajan utjecaj na rast stabala crnoga bora prikazani su na Slici 60. Vidljivo je da visoke ljetne temperature zraka do 1950. godine značajno limitiraju rast stabala crnoga bora na cjelokupnom području istraživanja, a nakon toga taj utjecaj više nije značajan. Za očekivati je da će se utjecaj visokih ljetnih temperatura zraka intenzivirati nakon 1950. godine do danas jer su ljetne temperature sve veće ali sukladno rezultatima navedeni signal se gubi. Također, ako promatramo oborine u ljeti (JA) uočavamo gubitak pozitivnih korelacija nakon 1950. godine. Za razliku od ljetnih temperatura zraka i oborina utvrđene su značajne pozitivne korelacije s temperaturom zraka u proljeće (veljača – ožujak) tekuće godine (Slika 59). Drugim riječima sve toplija proljeća značajno pogoduju rastu stabala crnoga bora na čitavom području Dinarida.



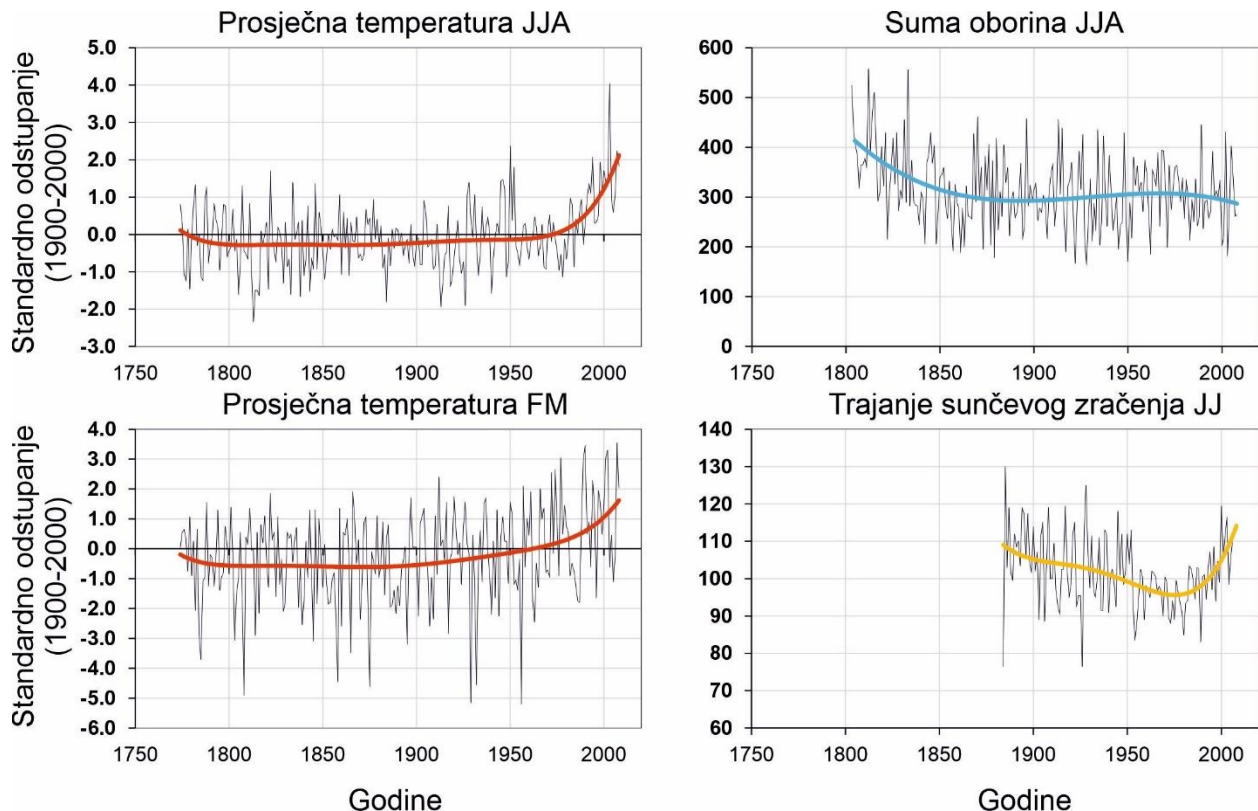
**Slika 59.** Pomične korelacije s prosječnim vrijednostima temperature zraka u ljeto tekuće godine (od lipnja do kolovoza, JJA) sa sumom oborina (od srpnja do kolovoza, JA) te sa prosječnom temperaturom zraka u proljeće (veljača – ožujak, FM) sa regionalnom kronologijom crnoga bora (PC1).

Objašnjenje ove relacije prikazano je i na Slici 60. gdje se vidi poklapanje rasta sa temperaturom zraka od 1950. godine, a nakon toga potpuno razilaženje. Ukupna objašnjena varijabilnost rasta stabala crnoga bora do 1950. godine iznosila je značajnih 47% a nakon 1950. godine svega 0,08% ( $P > 0.05$ ).



**Slika 60.** Regionalna kronologija crnoga bora PC1 i standardno odstupanje ljetnih temperatura zraka tijekom razdoblja zadnjih 100 godina (A). Pomične korelacije s temperaturom zraka (B) i raspršeni dijagrami za razdoblje do 1950. i nakon 1950. godine (C).





**Slika 61.** Standardna odstupanja prosječnih ljetnih (lipanj-kolovoz, JJA) i proljetnih (veljača-ožujak, FM) temperatura zraka i sume oborina u ljeto (lipanj-kolovoz, JJA) i trajanje sunčevog zračenja u lipnju i srpnju (JJ) za razdoblje od 1780 do danas (<https://climexp.knmi.nl/>).

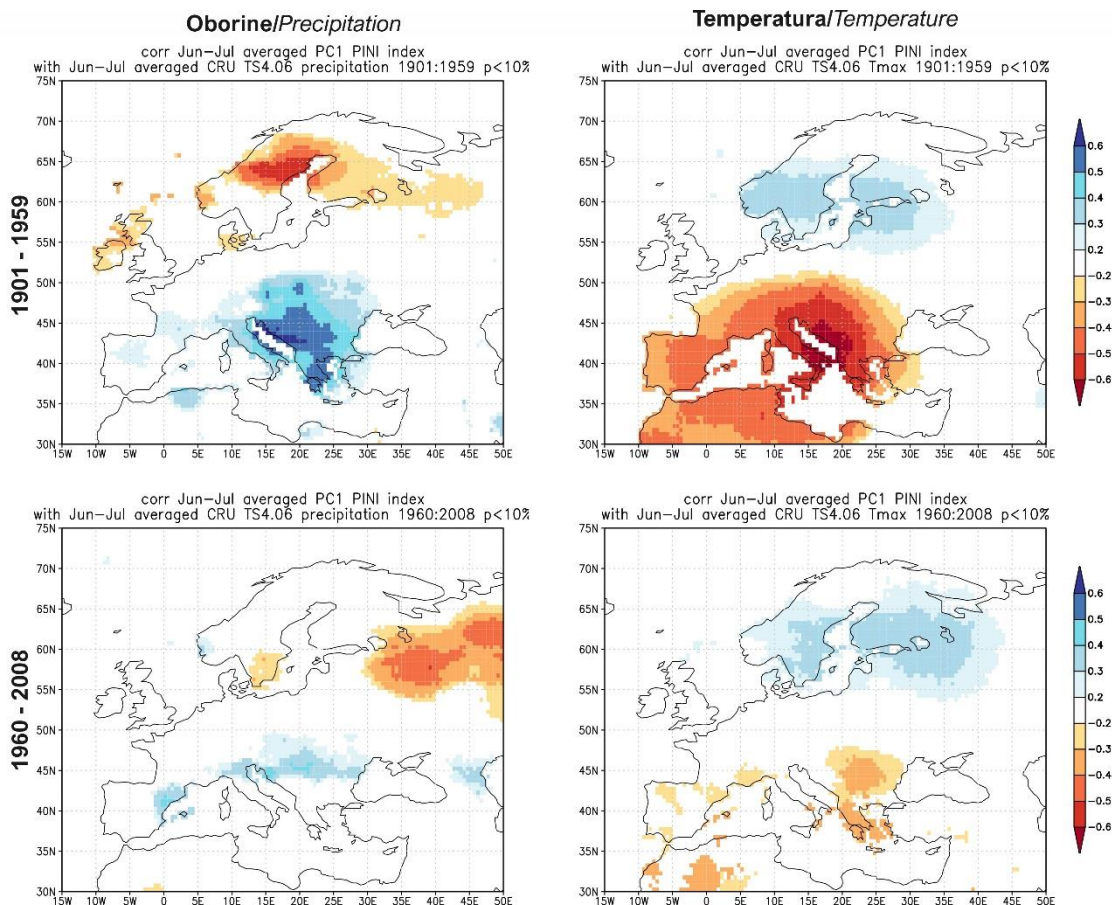
Na Slici 61. prikazano je standardno odstupanje klimatskih čimbenika od ustaljenog obrasca mjerenja s jasnim trendom porasta prosječne temperature u ljetnom i zimskom periodu te smanjenjem oborina i povećanim trajanjem sunčevog zračenja u ljetnom periodu. Ovaj obrazac porasta temperature i sunčevog zračenja te smanjenja oborina započeo je od sredine dvadesetog stoljeća.



## 5.6. Prostorne korelacije

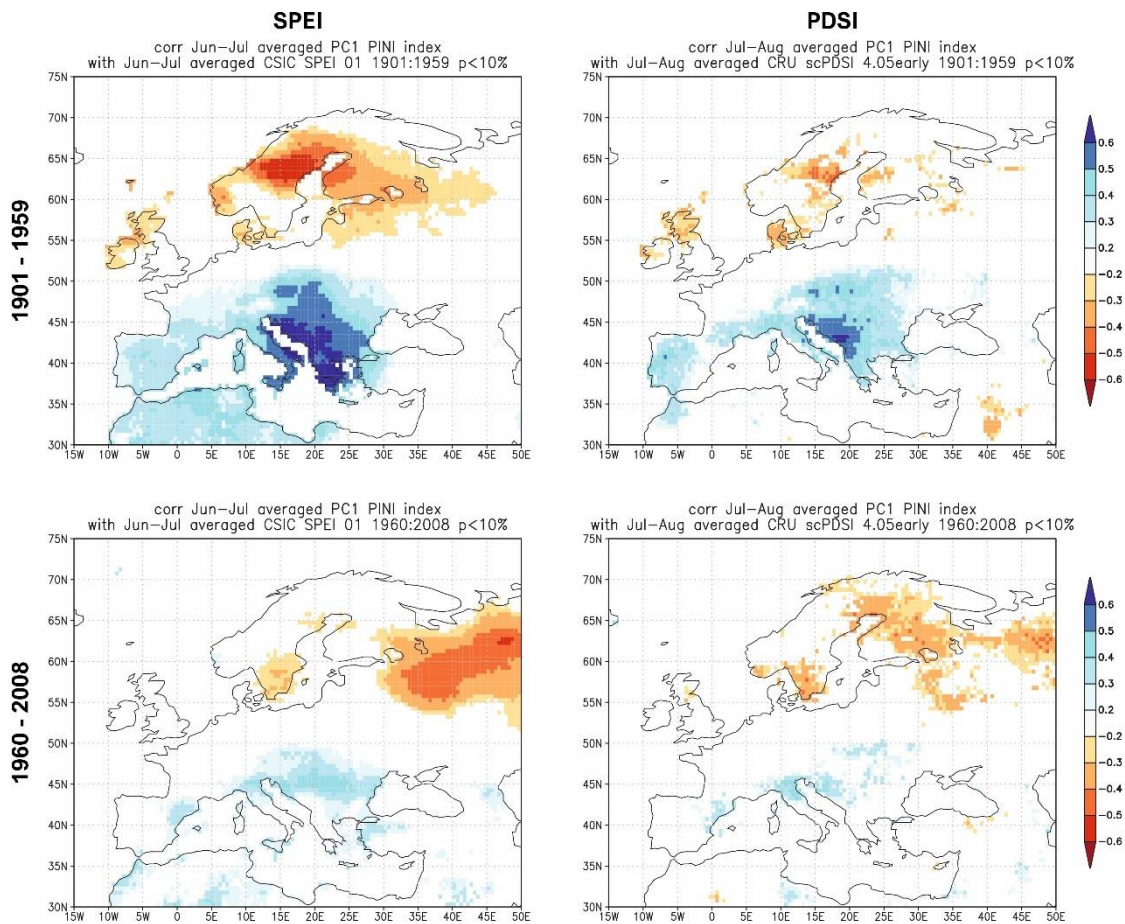
Prostorne korelacije su napravljene sa svakom pojedinom jedinicom grada te su prostorno prikazane u geografskom prostoru. Rezultati prostornih korelacija ukazuju na prostorni obuhvat klime koja utječe na radijalni rast stabala te ujedno jačinu (koeficijent korelacije  $R$ ) i smjer utjecaja (pozitivno – negativno).

Prostorne korelacije su napravljene za dva polurazdoblja identično kao i u prethodnim analizama. Iz rezultata prostornih korelacija vidimo da se klimatski signal u ljetnim razdobljima (prosječna temperatura od lipnja do srpnja i količina oborina u lipnju i srpnju) gubi, odnosno visoke temperature zraka ne limitiraju rasta stabala crnoga bora. U isto vrijeme veće količine oborina u ljeto također nisu značajne za rast stabala crnoga bora.

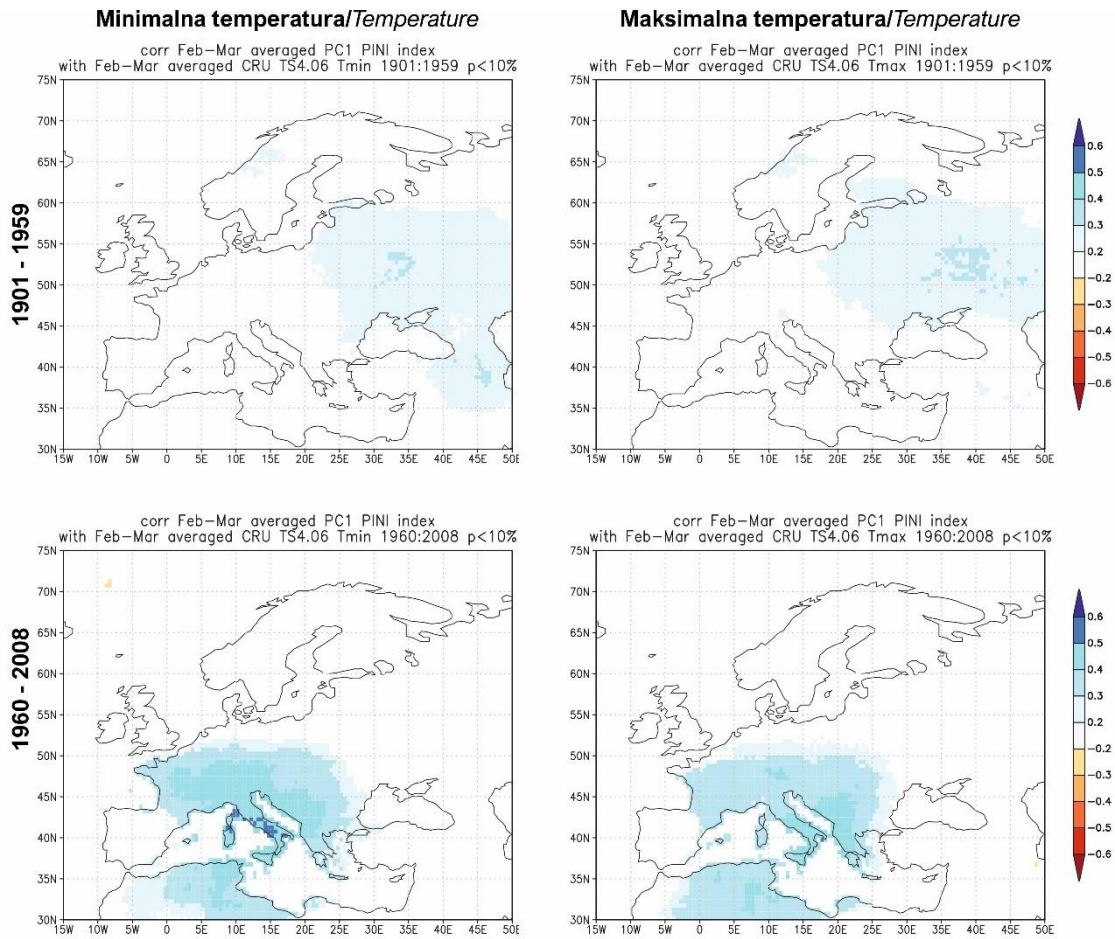


**Slika 62.** Prostorne korelacije PC1 komponente rezidualnih kronologije s oborinama u ljeto (lipanj–srpanj, JJ) i temperaturom zraka za dva polurazdoblja. Prostorne korelacije su napravljene pomoću platforme KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/>).

Prostorne korelacije između radijalnog rasta stabala crnog bora i indeksa suše i Palmerovog indeksa jačine suše su napravljene za dva polurazdoblja (Slika 63. i 64.) identično kao i u prethodnim analizama. Iz rezultata prostornih korelacija vidimo da se klimatski signal u ljetnim razdobljima (indeks suše od lipnja do srpnja i PDSI od srpnja do kolovoza) gubi nakon 1960. godine, odnosno visoke temperature zraka, utjecaj suše i visok nivo evapotranspiracije ne limitiraju rast stabala crnog bora.



**Slika 63.** Prostorne korelacije PC1 komponente rezidualnih kronologije sa indeksima suše SPEI i PDSI za dva polurazdoblja. Prostorne korelacije su napravljene pomoću platforme KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/>).



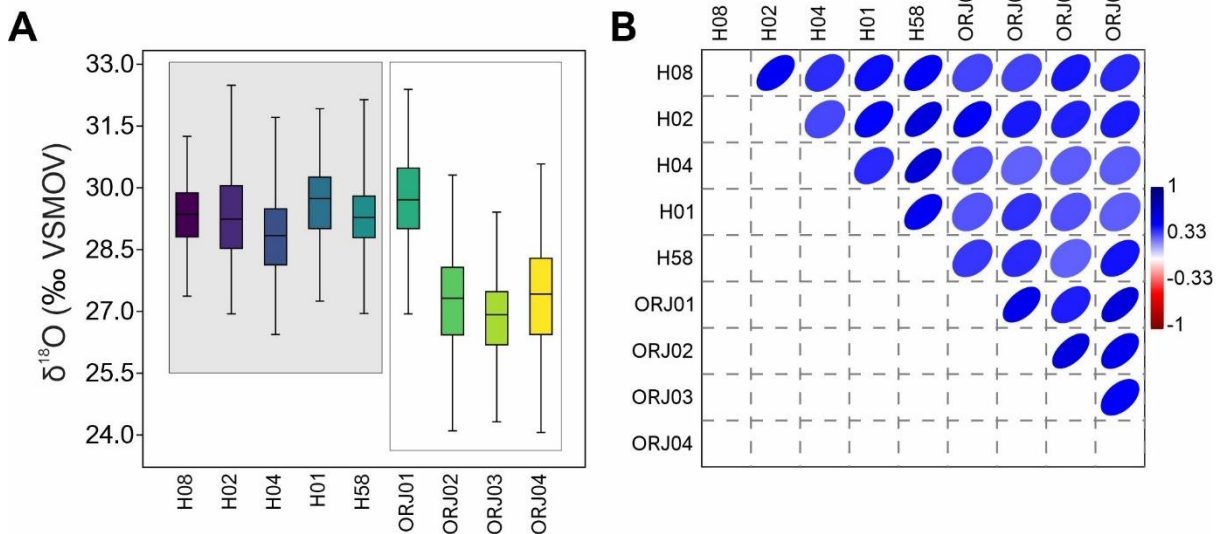
**Slika 64.** Prostorne korelacije PC1 komponente rezidualnih kronologije sa minimalnom i maksimalnom temperaturom zraka u proljeće (veljača – ožujak, FM) za dva polurazdoblja. Prostorne korelacije su napravljene pomoću platforme KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/>).

## 5.7. Rekonstrukcije klimatskih uvjeta u prošlosti

Da bismo bolje razumjeli regionalne klimatske prilike u prošlosti te preciznije predvidjeli opseg budućih promjena, napravljene su rekonstrukcije klimatskih prilika u posljednja dva stoljeća. Kako je klimatski signal u godovima stabala (širini godova) tijekom posljednjih 100 godina nestabilan za rekonstrukcije prošlih klimatskih uvjeta korištena je metoda stabilnih kisikovih izotopa  $\delta^{18}\text{O}$ .

Godišnje kronologije stabilnih izotopa kisika  $\delta^{18}\text{O}$  dobivene su iz četiri zasebna uzorka iz stabala munike (sa Orjena). Uzorci su značajno sinkronizirani prema širinama godova tijekom razdoblja od 1780. do 2018. godine. Kod stabilnih kisikovih izotopa  $\delta^{18}\text{O}$  primjenjuju se ista načela kvalitete kronologije kao i kod širina godova. Stoga, jačina zajedničkog signala tijekom navedenog razdoblja potvrđena je konstantno visokim srednjim  $R_{\text{bar}}$ -om (koji iznosi 0.51) i vrijednostima  $\text{EPS} > 0.85$ . Vrijednosti  $\delta^{18}\text{O}$  pokazuju veću varijabilnost, u rasponu između 24,77‰ i 30,23‰. Prosječne vrijednosti tijekom razdoblja 1780.–2018. godine i 1901.–2018. godine su  $27.72 \pm 0,93\text{‰}$  odnosno  $27.99 \pm 0,88\text{‰}$ . Vrijednosti stabilnih izotopa kisika  $\delta^{18}\text{O}$  općenito su snažnije korelirani s klimatskim varijablama od vrijednosti ugljikovih izotopa  $\delta^{13}\text{C}$ .

Kako bismo napravili regionalnu rekonstrukciju koja obuhvaća šire područje od područja uzorkovanja (masiv Orjena) uz postojeće uzorke preuzeli smo i sirove podatke iz istraživanja An i sur. (2023). Uzorci predstavljaju identične analize stabilnih izotopa kisika sa stabala crnoga bora s prašumskih sastojina na području Loma i Janja.

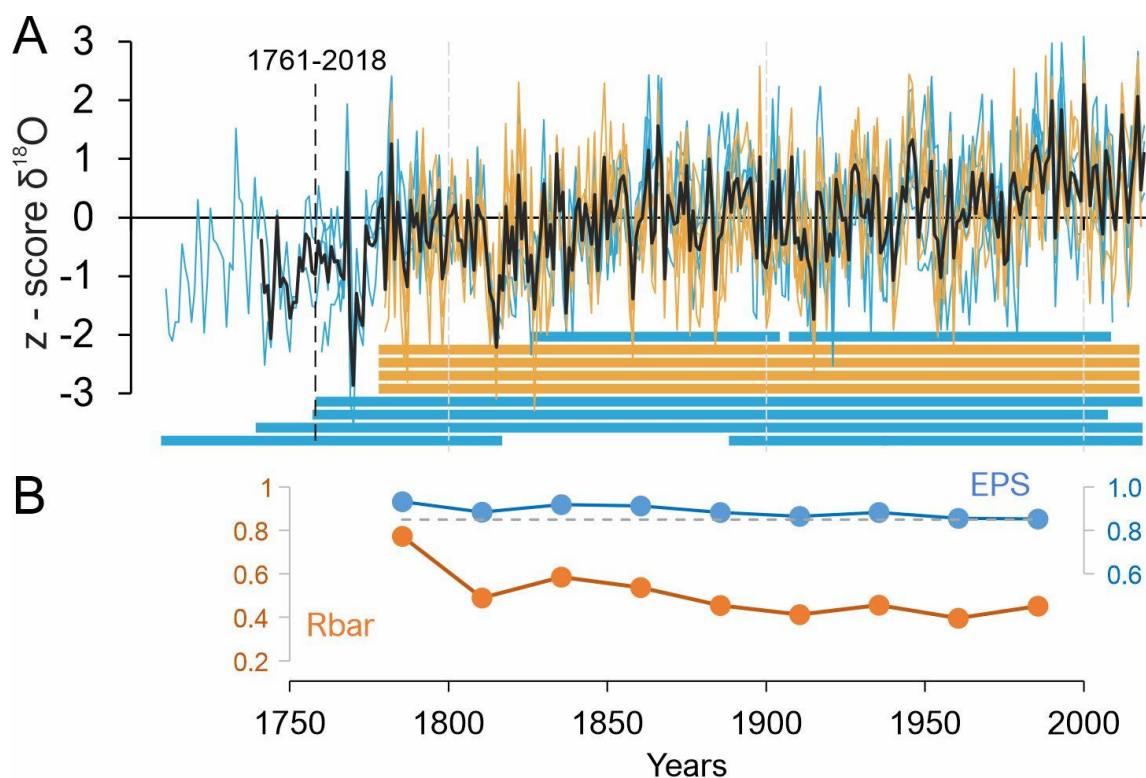


**Slika 65. A)** Prosječne vrijednosti stabilnih kisikovih izotopa u individualnim uzorcima drva te **B)** korelacijska matrica između uzoraka s Orjena i Loma (An i sur. 2023).



Svi uzorci zajedno su prije izrade regionalne kronologije standardizirani sa prosječnom vrijednosti 0 i standardnom devijacijom 1. Prosječna korelacija (zajednički period) između standardiziranih individualnih serija stabilnih izotopa  $\delta^{18}\text{O}$  stabala s lokaliteta Lom i Orjen iznosi 0.50. Na lokalitetu Orjen 0.55, a prosjek korelacijskog koeficijenta (R) između svih serija s oba lokaliteta iznosi 0.40. Prosječni Rbar između serija izotopa TRSI iznos 0.51, a  $\text{EPS} > 0.85$  je pogodan za razdoblje od 1761. do 2018. godine (Slika 66).

Prosječne vrijednosti korelacijskog koeficijenta između individualnih serija stabilnih kisikovih izotopa ukazuju da se bez obzira na geografsku udaljenost ovih lokaliteta standardizirane serije mogu koristiti u jednoj zajedničkoj, prosječnoj kronologiji koja robusno može poslužiti za regionalni proxy u rekonstrukcijama klimatskih čimbenika.



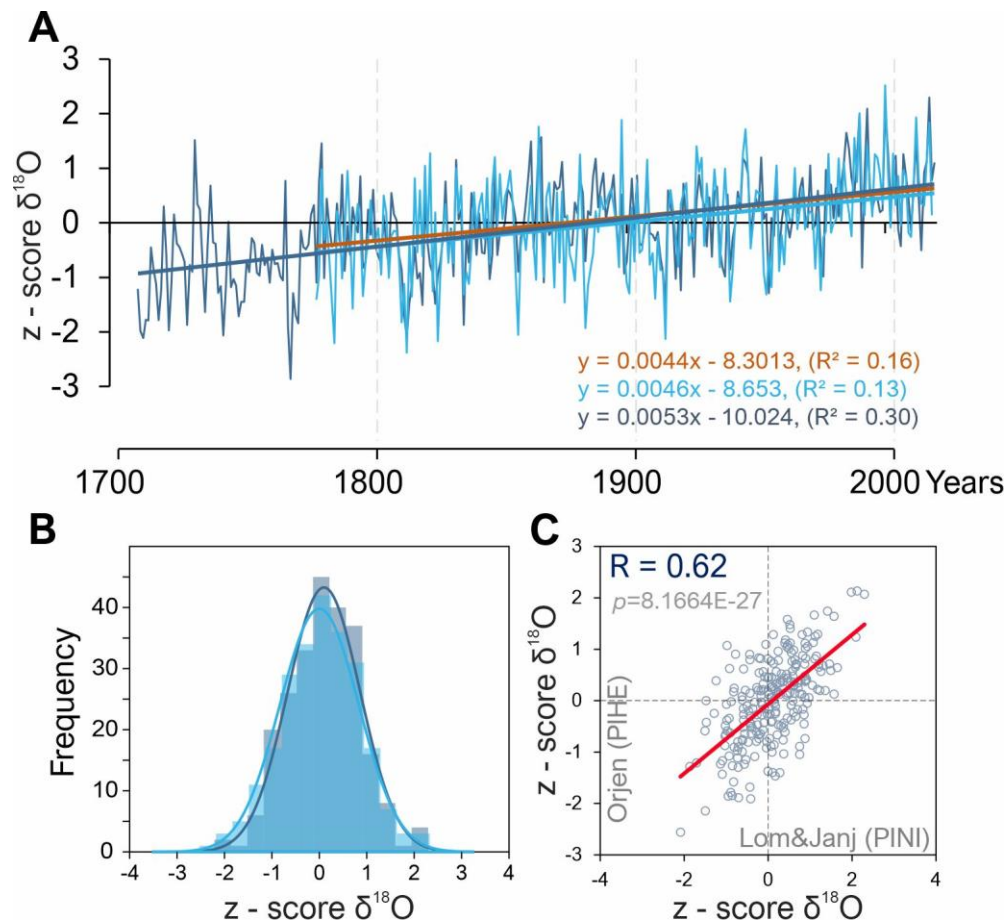
**Slika 66.** Standardizirane serije stabilnog kisikovog izotopa  $\delta^{18}\text{O}$ . Narančastom bojom su bojom označene serije sa lokaliteta Orjen, a plavom bojom serije s lokaliteta Lom i Janj (An i sur. 2023) (A). Prosječne vrijednosti (za 50 godina) EPS-a i Rbar su prikazane na donjoj slici (B).



**Tablica 16.** Korelacijski koeficijenti između serija izotopa  $\delta^{18}\text{O}$  između pojedinih stabala za razdoblje preklapanja serija od 1828. do 2018. godine

R/p	H08	H02	H04	H01	H58	ORJ01	ORJ02	ORJ03	ORJ04
H08		1,2E-13	2,7E-07	4,0E-10	1,5E-12	1,5E-05	1,2E-05	5,0E-09	1,1E-07
H02	0,54		2,5E-05	5,2E-11	1,7E-19	2,7E-12	6,1E-09	2,3E-08	7,7E-09
H04	0,41	0,36		1,5E-07	1,7E-20	6,7E-05	9,0E-04	4,5E-04	4,7E-04
H01	0,48	0,49	0,42		1,6E-13	1,6E-04	4,8E-07	9,1E-05	6,7E-04
H58	0,52	0,63	0,64	0,54		1,6E-06	1,7E-07	7,9E-04	1,5E-09
ORJ01	0,37	0,52	0,35	0,33	0,39		2,3E-15	1,3E-08	1,0E-19
ORJ02	0,37	0,45	0,31	0,41	0,42	0,57		9,2E-19	6,8E-15
ORJ03	0,45	0,44	0,32	0,34	0,31	0,44	0,62		3,1E-11
ORJ04	0,42	0,45	0,32	0,31	0,46	0,63	0,56	0,50	

Standardizirana regionalna kronologija stabilnih izotopa kisika  $\delta^{18}\text{O}$  ukazuje na značajan trend rasta vrijednosti izotopa u celulozi drva tijekom promatranog razdoblja od 1711. godine do danas.



**Slika 67.** Standardizirane kronologije stabilnog kisikovog izotopa  $\delta^{18}\text{O}$  za Orjen (svjetlo plavo) i Lom-Janj (tamno plavo) s linearnim trendovima (A). Distribucija frekvencija standardiziranih vrijednosti kronologija (B). Raspršeni dijagram između kronologija crnog bora (PINI) sa lokaliteta Lom i Janj u odnosu prema kronologiji bora munike (PIHE) s Orjena (C).

**Tablica 17.** Mann-Kendall trend test za kronologije (TRSI) stabilnog kisikovog izotopa  $\delta^{18}\text{O}$ . Gdje su: S i Z vrijednosti Mann-Kendall trend testa, p – vrijednost (INC – rast trenda, DEC – pad trenda), Inter – intercept, Slope – nagib pravca trenda, R – koeficijent korelacije.

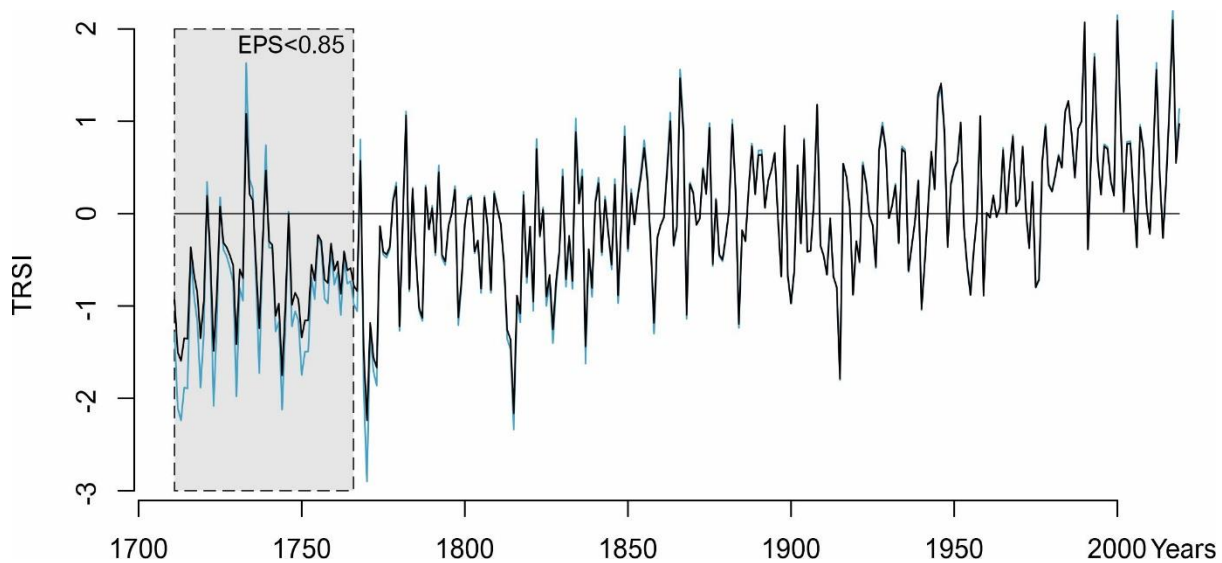
R/p	razdoblje	Species	S	Z	p (no trend)	Inter.	Slope	R
Lom&Janj	1780-2018	PINI	7573	6,1289	8,84E-10 (INC)	-8,30	0,0044	0,39
Orjen	1780-2018	PIHE	6909	5,5915	2,25E-08 (INC)	-8,65	0,0046	0,37
Lom&Janj	1711-2018	PINI	18042	9,9886	1,71E-23 (INC)	-10,02	0,0053	0,54

Pozitivna S vrijednost znači da je trend u porastu, a negativna S vrijednost znači da je trend u opadanju. Pozitivna z-statistika označava uzlazni trend, negativna z-statistika označava silazni trend, a nulta z - statistika ukazuje na nedostatak trenda.

P vrijednost  $< 0,05$  govori da postoji (monotoni) trend i ako je  $\tau + ve$ , rastući trend, a ako je  $\tau - ve$ , opadajući trend. P vrijednost  $> 0,05$ , govori da ne postoji monotoni trend.

**Tablica 18.** Deskriptivne vrijednosti koncentracije stabilnog kisikovog izotopa za svaki uzorak posebno. Vrijednosti su izračunate za razdoblje od 1828. do 2018. godine za koje postoji preklapanje izmjera.

Uzorak	H08	H02	H04	H01	H58	ORJ01	ORJ02	ORJ03	ORJ04
N	181	181	181	181	181	181	181	181	181
Min	27,37	26,94	26,44	27,25	26,95	26,94	24,10	24,32	24,06
Max	31,25	32,49	31,71	31,92	32,14	32,39	30,31	29,41	30,58
Mean	29,35	29,30	28,83	29,66	29,28	29,72	27,26	26,85	27,43
Std. error	0,06	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,10
Variance	0,58	1,14	0,85	0,93	0,78	1,06	1,30	1,01	1,65
Stand. dev	0,76	1,07	0,92	0,96	0,89	1,03	1,14	1,01	1,28
Median	29,36	29,24	28,84	29,74	29,28	29,71	27,32	26,92	27,42
25 prcentil	28,81	28,52	28,13	29,01	28,79	29,01	26,43	26,18	26,43
75 prcentil	29,90	30,07	29,49	30,26	29,81	30,48	28,07	27,49	28,30
Skewness	-0,10	0,28	0,22	-0,21	0,09	-0,02	-0,03	-0,12	0,05
Kurtosis	-0,24	-0,17	0,03	-0,31	0,70	-0,20	-0,09	-0,15	-0,30
Geom. mean	29,34	29,28	28,82	29,64	29,27	29,70	27,24	26,83	27,40
Coeff. var	2,59	3,64	3,20	3,25	3,02	3,47	4,17	3,74	4,68

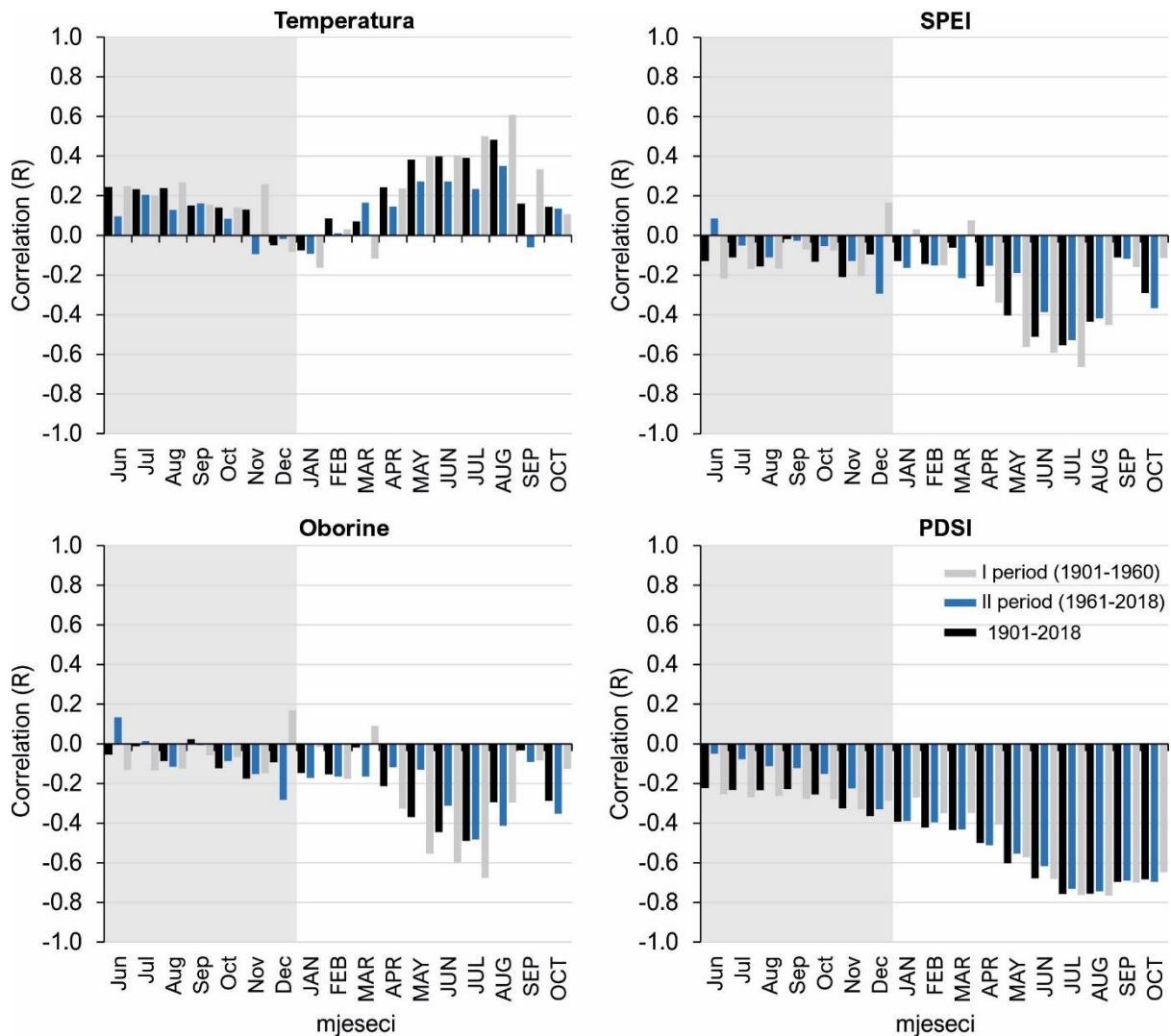


**Slika 68.** Standardizirane kronologije stabilnog kisikovog izotopa  $\delta^{18}\text{O}$  za Orjen (svjetlo plavo) i Lom-Janj (tamno plavo).

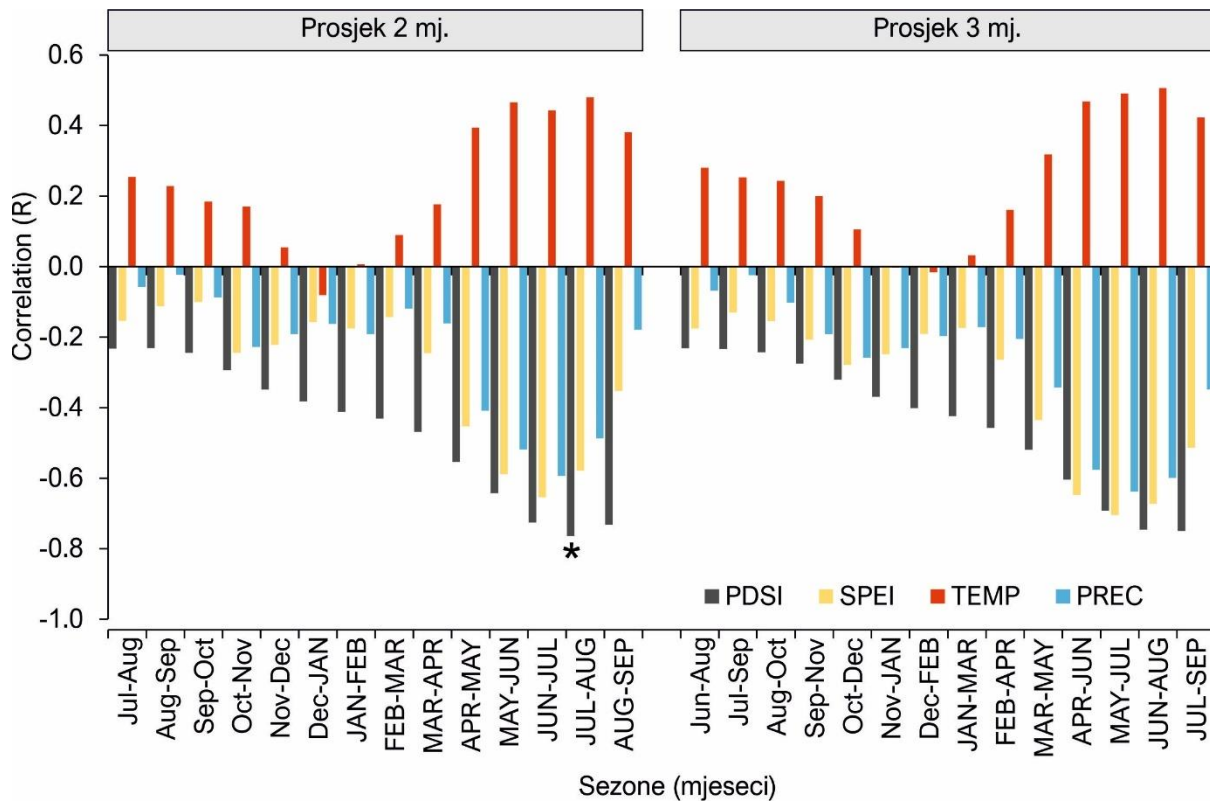
### 5.7.1. Korelacije s klimatskim čimbenicima

Korelacijska analiza je napravljena s konačnom regionalnom prosječnom kronologijom stabilnih izotopa kisika  $\delta^{18}\text{O}$  (Slika 69. i 70.) te odabranih klimatskih čimbenika. Svrha ove analize je utvrditi koji od odabranih klimatskih čimbenika pokazuje najveću i značajnu ovisnost s navedenom kronologijom stabilnih kisikovih izotopa. Korelacijske analize su provedene i za individualne mjesečne vrijednosti klimatskih čimbenika i za prosjeke klimatskih čimbenika za duljine sezona od 2 i 3 mjeseca i to od lipnja prethodne godine (Jun) do listopada (OCT) tekuće godine. Od svih analiziranih klimatskih čimbenika Palmerov indeks jačine suše (scPDSI) pokazao je najveći i najznačajniji signal sa kronologijom stabilnih izotopa kisika i to posebice u razdoblju ljeta (srpanj – kolovoz). Stoga je daljnjim rekonstrukcijama provedena rekonstrukcija ljetnog indeksa suše (scPDSI) za prosjek od srpnja do kolovoza (JA).

PDSI se široko koristi u procjeni klimatskih promjena. Palmerov indeks jačine suše (PDSI) je izvorno razvio Palmer 1965. godine. Kod izračuna PDSIa uključena je količina vode (iznos oborina u mm) i potencijalna evapotranspiracija (PET) te kapacitet tla za vodu. PDSI je standardizirana mjera koja se kreće u rasponu od oko -10 (suho) do +10 (mokro) s vrijednostima ispod -3 koje predstavljaju jaku do ekstremnu sušu.



**Slika 69.** Korelacijski koeficijent (R) između sezonskih vrijednosti klimatskih čimbenika i regionalne kronologije (TRSI) stabilnog izotopa kisika  $\delta^{18}\text{O}$ . Gdje su: TEMP – prosječna temperatura zraka, PREC – ukupne oborine, SPEI - multiskalarni indeks suše i scPDSI - samokalibrirajući Palmerov indeks jačine suše. Prosjek klimatskih čimbenika je prikazan za duljinu sezona od 2 i 3 mjeseca, Malim slovima su prosjeci sezona za prethodnu godinu, a velikim štampanim slovima za tekuću godinu nastanka goda.



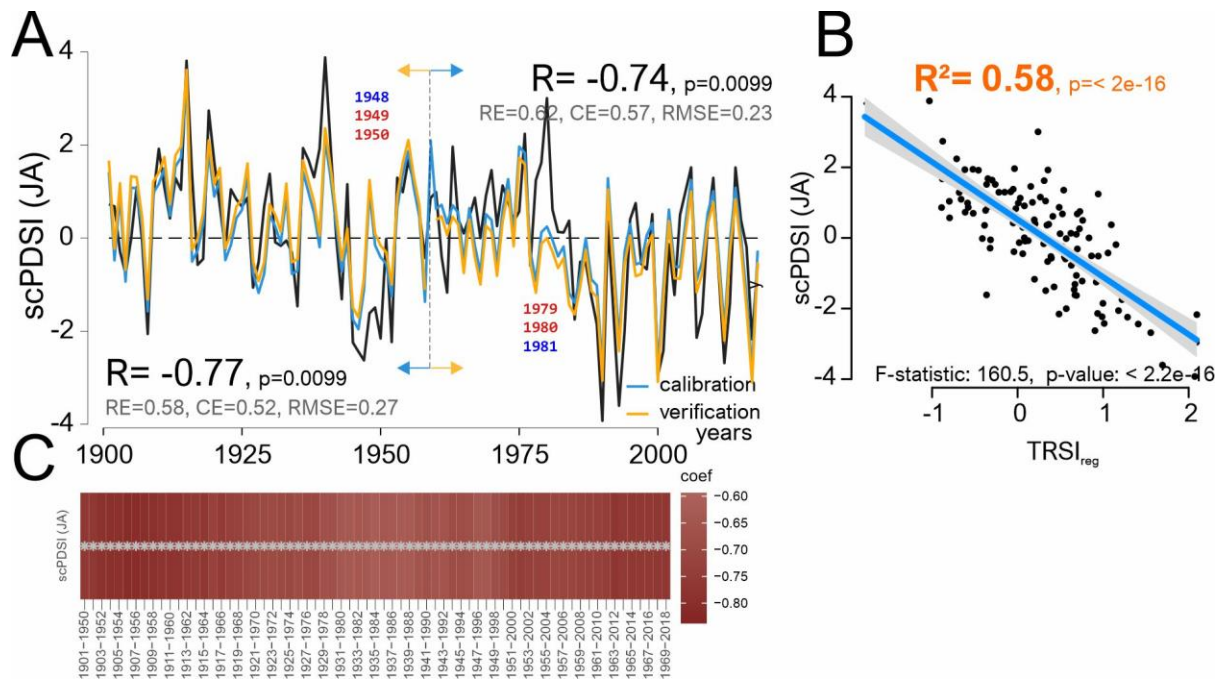
**Slika 70.** Korelacijski koeficijent  $R$  između sezonskih vrijednosti klimatskih čimbenika i regionalne kronologije (TRSI) stabilnog izotopa kisika  $\delta^{18}\text{O}$  gdje su: TEMP – prosječna temperatura zraka, PREC – ukupne oborine, SPEI - multiskalarni indeks suše i scPD-I - samokalibrirajući Palmerov indeks jačine suše. Prosjek klimatskih čimbenika je prikazan za duljinu sezona od 2 i 3 mjeseca, Malim slovima su prosjeci sezona za prethodnu godinu, a velikim tiskanim slovima za tekuću godinu nastanka goda.

### 5.7.2. Validacija i kalibracija modela

Mjerenje sposobnosti predviđanja linearnog modela za rekonstrukciju indeksa suše (PDSI) korištenjem stabilnih izotopa kisika je provedeno za dva razdoblja, 1901.–1960. godine (verifikacija) i 1961.–2018. godine (kalibracija). Za vrednovanje kvalitete modela korišteni su osnovni statistički parametri kao što su: koeficijent determinacije za cijelo razdoblje dostupnih klimatskih podataka ( $R^2$ ), smanjenje pogreške (RE), koeficijent učinkovitosti (CE), srednja kvadratna pogreška (MSE) koji su prikazani u Tablici 19. Napravljeni model objašnjava ukupno 58% varijabilnosti suše.

**Tablica 19.** Pokazatelji kvalitete linearnog modela za rekonstrukciju indeksa suše PDSI-a

Varijabla	razdoblje	RE	CE	RMSE	DW(p)	R	p
scPDSI (JA)	1901-1960	0.64	0.574	0.229	1.228 (0.00078)	-0.74	0.0099
scPDSI (JA)	1961-2018	0.58	0.523	0.272	1.446 (0.01657)	-0.77	0.0099
scPDSI (JA)	1901-2018				1.71E-23 (INC)	-0.76	0.0099



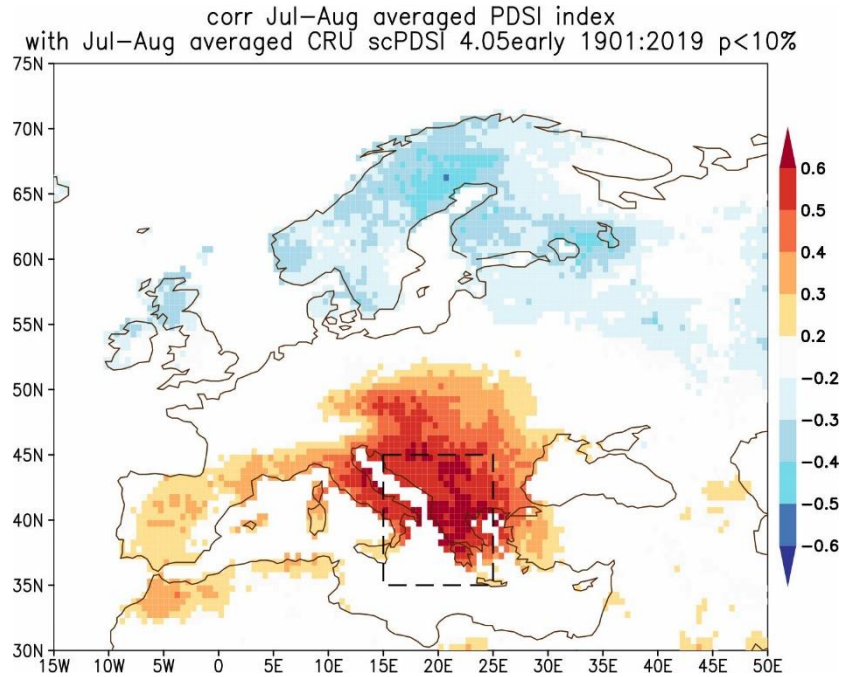
**Slika 71.** Odnos između mjerenih vrijednosti PDSI u ljeto te kronologije stabilnih izotopa za razdoblje do 1901. do 2018. godine A. Raspršeni dijagram odnosa kronologije stabilnih izotopa kisika i indeksa suše. Ovaj model se koristio za rekonstrukciju suše u povijest izvan obuhvata instrumentalnih mjerenja B).

Konačni model za rekonstrukciju indeksa suše (scPDSI) ima izraz jednadžbe:  
 $scPDSI (JA) = 0.5220091 + (-1.6284850 \times TRSI$

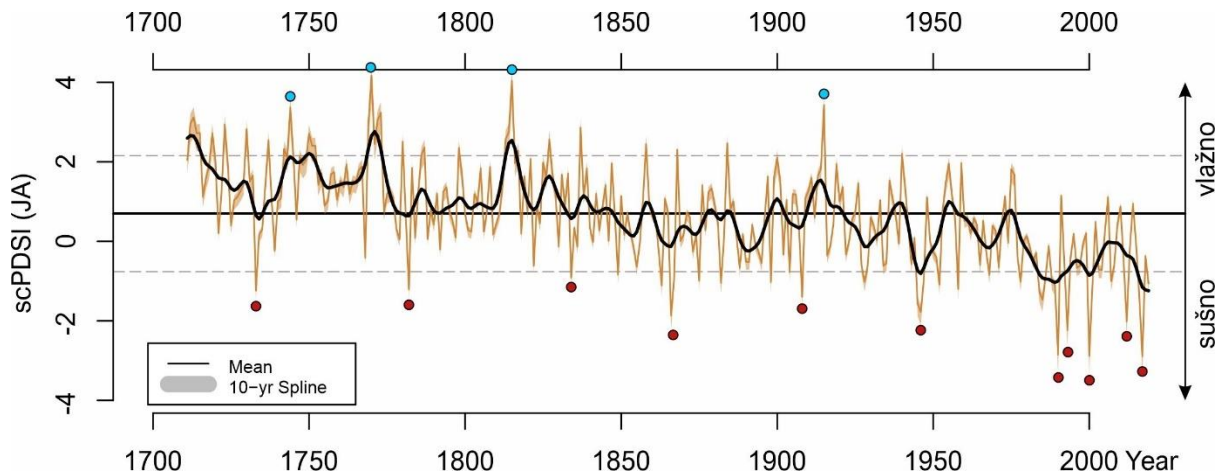


### 5.7.3. Prostorna korelacija

Prostorna korelacija između rekonstruiranih vrijednosti Palmerovog indeksa jačine suše ukazuje da regresijski model dobro reprezentira područje jugoistočne Europe odnosno cjelokupnog područja istraživanja.



**Slika 72.** Prostorna korelacija između rekonstruiranog i mjenenog Palmerovog indeksa jačine suše (PDSI)



**Slika 73.** Rekonstruirane vrijednosti Palmerovog indeksa suše za područje Dinarida od 1761. godine do danas. Pozitivne vrijednosti označuju vlažna razdoblja, a negativne vrijednosti suha razdoblja.

S obzirom na rezultate modela rekonstrukcije indeksa suše (PDSI) za područje Dinarida možemo zaključiti da su klimatski uvjeti sve ekstremniji i to naročito od 1960. godine.

Niz najsuših i najvlažnijih godina dobiveni modelom stabilnih izotopa kisika je prikazan u Tablici 20.

Iz analize vidimo da su 3 najsuše godine u zadnjih 250 godina upravo u zadnja dva desetljeća (2000, 2012 i 2017. godina) a da je kompletno razdoblje značajno suše u odnosu na povijesni raspon. Sve navedeno ukazuje da su stanišni (poglavito klimatski) uvjeti na Dinaridima sve suši i stoga manje povoljni za normalan razvoj vrsta drveća.

**Tablica 20.** Popis najvlažnijih (scPDSI > 2.0) i sušnih (scPDSI < -1.5) godina

Vlažne godine		Sušne godine	
YRS	PDSI	YRS	PDSI
1770	4,17	2017	-2,89
1815	4,04	2000	-2,88
1915	3,43	1990	-2,85
1773	3,24	1993	-2,24
1772	3,06	2012	-2,01
1769	2,93	1866	-1,86
1837	2,86	1946	-1,77
1814	2,74	1945	-1,57
1813	2,57	1985	-1,47
1827	2,56	1908	-1,40
1780	2,51		
1884	2,47		
1771	2,45		
1858	2,45		
1787	2,36		
1798	2,35		
1868	2,31		
1817	2,28		
1940	2,20		
1786	2,18		
1900	2,10		
1821	2,07		

## 6. RASPRAVA

### 6.1. Strukturne značajke i prirodna dinamika sastojina

Analiza strukture istraživanih sastojina pokazuje da se radi o dugovječnim sastojinama čija starost, kada je u pitanju crni bor, dostiže do približno 500 godina na istočnijim lokalitetima (Peručica, Zelengora, Višegrad) dok se starost postupno smanjuje prema zapadu, tako na Dinari i Braču maksimalna starost sastojina doseže ispod 200 godina. Starost sastojina munike na Orjenu doseže više od 600 godina, a najveći broj stabala je starosti od 200 do 400 godina.

Distribucija broja stabala po debljinskim razredima kod crnog bora pokazuje da je najzastupljeniji broj stabala u debljinskim razredima 60–80 cm na istočnim lokalitetima dok je krećući se prema zapadu distribucija stabala pomaknuta za niži debljinski razred. U sastojinama munike distribucija najvećeg broja stabala je u debljinskim razredima 70–80 cm.

Temeljnica i drvena zaliha u istraživanim sastojinama crnog bora i bora munike značajno varira u vrijednostima u ovisnosti o stanišnim uvjetima te je temeljnica za lokalitete u zapadnim Dinaridima u rasponu 13,8 (Budim) – 20,20 (Borov vrh) m<sup>2</sup>/ha, raspoređena u nižim debljinskim razredima dok se vrijednost temeljnice na istočnim Dinaridima kreće u rasponu 30,59 (Šipovo) – 69,26 (Crna Poda) m<sup>2</sup>/ha raspoređena u višim debljinskim razredima. Isti trend prati i volumen sastojine koji je na lokalitetima zapadnih Dinarida u rasponu 99,10 (Budim) – 194,88 (Paklenica) m<sup>3</sup>/ha dok je na lokalitetima istočnih Dinarida volumen u rasponu 260,57 (Višegrad) – 1318,58 (Crna Poda) m<sup>3</sup>/ha. Lokalitet Crna Poda u Crnoj Gori na kojoj se nalazi sastojina crnog bora pokazuje najveće vrijednosti strukturnih značajki sa 80 stabala ha<sup>-1</sup> gdje je najveći broj stabala raspoređen u debljinskim razredima od 100 cm naviše sa temeljnicom od 70 m<sup>2</sup>/ha i volumenom od 1300 m<sup>3</sup>/ha. Na ovom lokalitetu je sastojina crnog bora dostigla maksimalno zabilježenu produktivnost u optimalnim vrijednostima za stanišne uvjete. Rezultati provedenog istraživanja ukazuju da produktivnost sastojina ovisi od stanišnih uvjeta te da na dubljim tlima i humidnijim staništima sastojine postižu maksimalnu proizvodnu sposobnost.

Istraživanja strukturnih značajki sastojina crnoga bora na strmim dolomitnim padinama u Sloveniji pokazale su značajnu drvenu zaliha u rasponu 146,6 m<sup>3</sup>/ha do 618,8 m<sup>3</sup>/ha (Zimšek, 2011).

Na planini Pirin u Bugarskoj uspoređivane su strukturne značajke starih i mladih sastojina munike gdje se došlo do podataka da stare sastojine imaju znatno manji broj stabala ha<sup>-1</sup> (252–544) u

odnosu na mlade gdje je do 1777 stabala  $\text{ha}^{-1}$ , prosječni prsni promjer je 40–50 cm, dok je maksimalni između 80–130 cm (Rangelova i Panayotov, 2013).

Slična istraživanja Miklića 2021. na području hrvatskog Sredozemlja u sastojinama koje su nastale pošumljavanjem u starosti oko 130 godina crni bor ima drvenu zalihi od 130 do 560  $\text{m}^3/\text{ha}$ . Dakle vrlo velika varijabilnost drvene zalihe koja je osim starosti djelom i različita zbog velike kamenitosti koja je temeljna odlika dinarskoga krša.

Prirodnost šumskih ekosustava na području Dinarida je značajna za prilagodbu crnog bora i munike na klimatske promjene. Od procijenjenih 3 milijuna hektara prirodnih šuma u Europi čija površina zauzima 1,7 % od ukupne površine pod šumama u Europi, većina otpada na šume u Finskoj, Švedskoj kao i na udaljenim planinskim masivima u Centralnoj i Istočnoj Europi (Diaci, J., 1999). U pojasu Dinarida nalazi se najveći dio očuvanih šumskih ekosustava sa izraženim bioraznolikost što se pozitivno odražava na vitalnost vrsta drveća. Antropogeni utjecaj na području Dinarida u povijesti najviše se ogleda u pašarenju (ispaša stoke) koje se odvijalo stoljećima unatrag, mada ne postoje pisani tragovi o njegovu utjecaju na razvoj šumskih ekosustava jer se pašarenje najčešće odvijalo iznad granice vegetacije (Nagel i sur., 2017b).

## **6.2. Utjecaj klimatskih čimbenika na dinamiku rasta**

Kronologije širina godova su jedan od najautentičnijih pokazatelja za proučavanje utjecaja klimatskih čimbenika na radijalni rast stabla. Razlog tomu leži u visokoj vremenskoj rezoluciji i preciznom datiranju. Važno je napomenuti da je odnos između klime i rasta stabala (širina godova) važan za predviđanje odgovora vrsta drveća na vremenske varijacije klimatskih čimbenika.

Kronologije širine godova (TRW) ključni su alat koji se koristi za rekonstrukcije povijesnih kretanja klimatskih čimbenika u regijama u kojima nisu dostupni podaci mjerenja klimatskih čimbenika što je upravo slučaj na Dinaridima. Poboljšanje paleoklimatskih tehnika i dendrokronoloških pristupa omogućilo je razvoj metoda za proučavanja klimatskih promjena u povijesti i time omogućile dugoročne klimatske rekonstrukcije. Na taj način se povećalo znanje o klimatskim promjenama u proteklom tisućljeću (Wilson i sur., 2016), ali i omogućilo bolje shvaćanje interakcije klime i silvidinamike.

Dendrokronološka istraživanja sastojina crnog bora i munike na području Dinarskoga gorja pokazuju da je riječ o dugovječnim sastojinama koje dosežu starost i do preko 400 godina kada je u pitanju crni bor, te i više od 600 godina kada je u pitanju munika.

Promatranjem kronologija širine godova svih lokaliteta crnog bora i munike uočeno je da svaki lokalitet ima sebi svojstvenu dinamiku rasta i razlikuju se jedan od drugog. Ova činjenica se može objasniti značajnim utjecajem stanišnih prilika, odnosno mikroklimatskih uvjeta koji karakteriziraju svaki istraživani lokalitet. Činjenica da na rast i razvoj stabala utječe čitav niz abiotičkih i biotičkih čimbenika koji čine jednu kompleksnu sredinu te da se stoga rast stabla ne može promatrati samo na osnovu klimatskih čimbenika. U prilog ovome ide i činjenica da ako promatrano sa gledišta sličnosti i podudaranja korelacija između lokaliteta iz Bosne i Hercegovine i Hrvatske, jedino lokalitet Šipovo značajnije korelira sa lokalitetima iz Hrvatske upravo zbog geografske blizine i sličnosti regionalnih klimatskih uvjeta.

Studije (Klippel i sur., 2017; Levanič i sur., 2007; Levanič i sur., 2020) koje su se bavile istraživanjem ovisnosti rasta stabala munike i klimatskih čimbenika ukazuju da munika ima vrlo dobar potencijal za razvijanje dugih kronologija korištenjem uzoraka iz živih stabala samim tim jer je životni vijek munike jako dug, tj. može doživjeti starost i preko tisuću godina. Ipak klimatski signal u kronologijama širina godova je slab te koristeći se metodom izračuna širine godova i odnosa sa klimatskim čimbenicima ne dolazi se do zadovoljavajućih odgovora između rasta stabala munike i klime (Panayotov i sur., 2010; Büntgen i sur., 2011).

Prirodi blisko gospodarenje šuma ima potencijal podržati biološku raznolikost, prilagoditi šume klimatskim promjenama i pružiti usluge ekosustava na višoj razini od konvencionalnog gospodarenja šumama (Larsen i sur., 2022)

Očekivani značajni porast temperature u sljedećim desetljećima dovest će do ozbiljnih promjena u uvjetima za rast šuma i to naročito u toplijim i suhim predjelima Dinarida. Sredozemni bazen, sa svojim dobro opisanim klimatskim dipolaritetom zapad – istok (Hafner i sur. 2011; Seim i sur., 2015) je u dosadašnjim istraživanjima označen kao „klimatsko žarište“, gdje je zagrijavanje klime pojačalo sušu (PDSI indeks) od 1970-ih godina (Cook i sur., 1999; Cook i sur., 1997). Mediteranska vegetacija općenito među kojom su istaknuti crni borovi smatra se vrlo otpornom na varijabilnosti klime. Razlog tomu je upravo činjenica da su borovi tijekom svoje duge povijesti doživljavali intenzivne i ekstremne varijabilnosti klime.

Prirodne populacije imaju dugu migracijsku povijest koja se međusobno razlikuje i na njih su snažno filogeografski utjecali složeni obrasci izolacije, specijacije i fragmentacije. Duge i promjenjive klimatske fluktuacije u regiji glavne genetske skupine bile su vjerojatni uzrok različitih diferencijacija šumskih zajednica s različitim sukcesijskim obrascima što je rezultiralo interglacijalnim refugijima nasuprot makro dugoročnim refugijima (Giovannelli i sur., 2017). Istraživanje sprovedeno u Španjolskoj pokazuje da se crni bor može puno brže prilagoditi na uvjete nedostatka vode i ekstremne stanišne prilike u odnosu na druge vrste. Osim toga u sastojinama crnoga bora tijekom sušnih perioda više je izražena kompeticija među susjednim stablima te su dominantna stabla crnog bora prilagodljivija suši čime je njihov oporavak puno brži (Martín-Benito i sur., 2008).

Plastičnost vrsta crnog bora i munike je od velike važnosti za buduće gospodarenje i zaštitu ovih vrijednih ekosustava. Sposobnost prilagodbe klimatskim promjenama ključna je stavka i kod izbora vrsta za pošumljavanje poglavito u Dinarskome kršu. Opravdana očekivanja da će se klimatski ekstremi povećati po jačini i učestalosti kao posljedica globalnog zatopljenja izravna su prijetnja funkcioniranju šumskih ekosustava (IPCC 2023). Opcionalno, unošenje vrsta iz suših i toplijih klimatskih područja jedna je od praktičnih metoda o kojoj se raspravlja kako bi se šumski ekosustavi prilagodili štetnim učincima klimatskih promjena. (Sub)mediteranski crni bor je potencijalni kandidat za takvu potpomognutu migraciju, posebno za suha područja u Srednjoj Europi. Velika genetička raznolikost unutar ove vrste, a time i potencijalne razlike u sposobnosti prilagodbe čine nužnim procijeniti odgovor crnog bora na klimatske ekstreme i identificirati odgovarajuće populacije ili ekotipove koji su bolje prilagođeni projiciranoj budućoj klimi od autohtonih vrsta (Thiel i sur. 2012).

Nekoliko autora je navodilo da je klimatski signal u drugoj polovini dvadesetog stoljeća promjenjiv i nestabilan (Barber i sur., 2000; D'Arrigo i sur., 2008). Činjenica da odnosi između klime i rasta stabala nisu stabilni u vremenu ima značajne posljedice za rekonstrukcije klimatskih događaja u povijesti. Druga polovina dvadesetog stoljeća okarakterizirana je promjenjivim ekološkim uvjetima, ponajviše povećanoj koncentraciji CO<sub>2</sub>, taloženju dušika (N) i povećanju temperature zraka, što pojedinačno ili u interakciji utječe na rast stabala i utječe na produktivnost šuma (Zhou i sur., 2001).



U okviru istraživanja utjecaja klimatskih čimbenika na radijalni rast crnog bora na devet lokaliteta u Hrvatskoj i Bosni i Hercegovini zabilježen je klimatski signal odnosno klimatska osjetljivost crnog bora na temperaturu zraka, oborine, Palmerov indeks jačine suše (PDSI) i na standardizirani indeks oborine i evapotranspiracije (SPEI). Klimatska osjetljivost crnog bora prilikom izračuna korelacija sa vrijednostima gore navedenih klimatskih parametara pokazala je značajne razlike odnosno tijekom dva promatrana polurazdoblja. Istraživani utjecaj klimatskih čimbenika na radijalni prirast stabala bora značajno je različit u prvoj polovini dvadesetog stoljeća (točnije do 1960. godine) od druge polovine dvadesetog stoljeća (od 1960. do 2008. godine).

Utjecaj temperature zraka na rast crnog bora je značajan i negativan, drugim riječima veće temperature zraka značajno smanjuju prirast crnoga bora.

Temperatura zraka u prvoj polovini dvadesetog stoljeća je pokazivala negativan utjecaj u ljetnom periodu i to od lipnja do kolovoza (JJA). U recentnom periodu temperatura zraka je pokazala neznatan utjecaj na rast crnog bora, odnosno ispod granice signifikantnosti.

Klimatska osjetljivost na sezonske oborine također je pokazala značajne razlike u dva promatrana razdoblja gdje je u prvom razdoblju dvadesetog stoljeća evidentiran pozitivan utjecaj oborina na rast crnog bora u ljetnom periodu (od lipnja do srpnja) dok u drugom razdoblju dvadesetog stoljeća oborine ne pokazuju značajan utjecaj na rast crnog bora ni u jednom periodu. Utjecaj klimatskih promjena na rast drveća je usko povezan sa strmim gradijentima okoliša u planinskim područjima jer je na tim područjima drveće najizloženije stresu izazvanom klimatskim ekstremima te se na tim mjestima očekuje temperaturno izazvano pomicanje donje granice vegetacijskog pojasa posebno među vrstama osjetljivima na sušu (Linares i Tiscar 2010).

U našem istraživanju Indeks jačine suše (PDSI) u ranijem razdoblju pokazuje pozitivan utjecaj vlažnih ljeta na rast crnog bora dok u drugoj polovini dvadesetog stoljeća taj se signal gubi. Razlog tomu je povećanje temperature zraka u rano proljeće u drugoj polovini dvadesetog stoljeća koja je iskorištenja za početak rasta te akumulaciju hranjivih materija što omogućava bolje preživljavanje stresa uslijed suše i visokih temperatura tijekom ljeta, odnosno lakšu prilagodbu na ekstremne uvjete klime.

Rezultati osjetljivosti crnog bora na navedene klimatske čimbenike pokazuju veoma dobru plastičnost vrste na prilagođavanje klimatskim promjenama.

Dok su rezultati istraživanja na crnom boru pokazali jasne razlike utjecaja klimatskih čimbenika u dva promatrana razdoblja kod munike se taj utjecaj nije promijenio u toku cijelog vremenskog

razdoblja (1901.–2008. godine). Ovakvi podaci ukazuju na vrlo izražen utjecaj stanišnih prilika na kojima munika raste. Naime, uvjeti u kojima munika raste su ekstremniji s izraženim i jakim suhim ljetima i vrlo hladnim zimama. U svom arealu munika nema konkurenciju drugih vrsta drveća i u takvim uvjetima ima vrlo dugi životni vijek. Razdoblje od 50 godina u drugoj polovini dvadesetog stoljeća je relativno kratko da bi se odrazilo na osjetljivost klimatskog signala posebno jer je munika rastući na ekstremnim staništima svakako izložena krajnjim granicama vrijednosti klimatskih čimbenika kroz čitav životni vijek. U istraživanjima rađenim na području Balkanskog poluotoka utvrđena je pozitivna osjetljivost munike o ljetnim oborinama, kao i to da je munika u drugoj polovini dvadesetog stoljeća pokazala veću negativnu osjetljivost na ljetnu sušu, što se može povezati sa povećanjem temperature i smanjenjem zimskih oborina koje se bilježe od druge polovine dvadesetog stoljeća (Panayotov i sur., 2010).

Vrste drveća imaju snažnu sposobnost prilagodbe na vanjske uvjete sredine rasta, čak i na ekstremne poput onih povezanih s klimatskim promjenama (Kijowska i sur., 2020.). Posljednjih desetljeća, snažne promjene u obrascima padalina i temperature uvelike su opteretile sve šume i vrste, stavljajući ih pod veliki pritisak (IPCC 2023).

Šumski požari najčešći su pokretači dinamike prirodnih sastojina borova te je pojam „dinamike“ u sastojinama borova usko povezan s prirodnim požarima. Rezultati do kojih se došlo u ovom istraživanju sugeriraju da se struktura prašumskih sastojina crnoga bora i dinamika pomlađivanja na području jugoistočnih Dinarida razlikuje od onih sastojina planinskog pojasa Mediteranske regije koja je izložena učestalijim prirodnim požarima gdje se požari na jednom lokalitetu javljaju u prosjeku na svakih 15 godina (Touchan i sur., 2012; Fulé i sur., 2008; Christopoulou i sur., 2013). Do sličnih podataka došli su i drugi autori koji su istraživali dinamiku prirodnih sastojina crnoga bora u Bosni i Hercegovini i Sloveniji (Nagel i Cerioni 2023) koji nisu pronašli dokaze o režimu učestalih površinskih požara u sastojinama crnoga bora koji se ponavljaju. Na jugozapadu Bugarske u istraživanju dinamike sastojina munike došlo se do zaključka da se prirodni požari niskog do umjerenog intenziteta u ovim sastojinama javljaju u intervalima od 50 do 100 godina te da imaju značajnu ulogu u varijabilnosti ove vrste (Panayotov i sur., 2017).

Istraživanja na crnome boru u Austriji pokazala su slabljenje osjetljivosti rasta na oborine u proljeće i ljeto od polovine dvadesetog stoljeća do danas. Ova promjena u osjetljivosti sugerira da rast crnog bora nije primarno ovisan o dostupnosti vode. Pretpostavlja se da je došlo do poboljšanja

učinkovitosti korištenja vode zbog stimulacije procesa fotosinteze te opadanja provodljivosti puči kao posljedica povećanja koncentracije CO<sub>2</sub> i dušika N (Leal i sur., 2008). Na jugoistoku Španjolske su vršena istraživanja utjecaja klime na radijalni rast crnog bora promatrajući dominantna i potisnuta stabla. Dominantno drveće pokazalo je plastičniju reakciju na klimatske ekstreme dok potisnuta stabla imaju redukciju rasta uslijed ekstremnih suša (Martín-Benito i sur., 2010).

### **6.3. Prilagodba crnog bora i bora munike na klimatske promjene**

Sastojine crnog bora i munike na području jugoistočnih Dinarida zauzimaju strma, stjenovita i ekstremna staništa kako u pogledu reljefa tako i klime. Iako rijetki i raštrkani požari sugeriraju na sprječavanje sukcesivne zamjene crnog bora i munike, ipak presudnu ulogu u opstanku ovih vrsta toliko dugo (više stoljeća) na istim lokalitetima igraju stanišni uvjeti na kojima jedino ove vrste mogu opstati.

Naše istraživanje je pokazalo da do značajnije pojave pomlađivanja u sastojinama crnog bora i munike dolazi svakih 50 godina kao i to da se razmak u pojavljivanju nove generacije povećava nakon 1950. godine što se može pripisati utjecaju globalnih promjena. Analiza širine godova crnog bora pokazuje značajnu vezu između stanišnih uvjeta i rasta stabala. Na osnovi širine godova ustanovljeno je da na lokalitetima Perućica, Borov Vrh i Budim nije bilo značajnijih prekida sklopa niti prirodnih poremećaja, na lokalitetu Zelengora su stabla rasla konstantno oslobođena konkurencije, dok na lokalitetima Dinara i Brač dolazi do oslobađanja u rastu stabala nakon 1960. godine što ukazuje na prirodni poremećaj koji je doveo do prekida sklopa sastojine. Analiza širina godova kod bora munike ne pokazuje trendove u rastu koji se mogu povezati sa stanišnim uvjetima. Korelacije širine godova crnog bora sa klimatskim čimbenicima na svim istraživanim lokalitetima pokazale su da temperatura zraka u drugoj polovini dvadesetog stoljeća znatno manje limitira rast stabala u odnosu na razdoblje u prvoj polovini dvadesetog stoljeća.

Rezultati istraživanja u Apeninima, Albaniji, Italiji, Crnoj Gori i Španjolskoj ukazuju da se granica šumske vegetacije pomiče prema većim nadmorskim visinama kao odgovor na klimatske promjene (Vitali i sur., 2019; Piermattei i sur., 2012) što je evidentirano i na nekim lokalitetima crnoga bora na Dinaridima (Kulakowski i sur., 2017a).

Istraživanje 19 provenijencija od četiri podvrste crnog bora na južnoj granici njihovog areala u Tunisu koje se temelji na dendrometrijskom i dendrološkom pristupu pokazalo je da će od presudne važnosti za odabir vrsta za gospodarenje u budućnosti biti poznavanje genetskih svojstava te da je varijabilnost u morfološkim osobinama unutar podvrsta crnog bora ovisna o geografskom porijeklu. Zaključeno je da su temperature značajno povezane s radijalnim rastom u siječnju/veljači i svibnju/lipnju za neke podvrste i provenijencije te s količinom oborina u travnju. Stoga, ravnoteža između pozitivnih i negativnih učinaka dostupnosti vode i zimsko-proljetnih temperatura na radijalni rast mogla bi odrediti buduću izvedbu provenijencija crnog bora (Fkiri i sur., 2021). U istraživanim populacijama crnog bora u Španjolskoj je zaključeno da se brzorastuće populacije koje potječu iz blažih klimatskih područja brže pomlađuju za razliku od onih koje potječu iz hladnijih i kontinentalnijih područja rasprostranjenosti vrste. Vrste iz blažih područja klime su više resursa ulagale u rast dok su druge ulagale u rezerve hranjivih tvari u stablo. No bez obzira na navedena istraživanja postoje i manje optimistični rezultati gdje se predviđa potencijalna ranjivost mediteranskih populacija crnog bora na buduće smanjenje dostupnosti vode (Santini i sur., 2019). Globalno gledano na rast stabala crnoga bora pored sve većeg zagrijavanja i sve intenzivnijih suša značajno utječu i stanišne prilike (Linares i Tiscar 2010).

Istraživanjem u zapadnoj Bosni proučavani su obrasci pomlađivanja sastojina crnoga bora i došlo se do zaključka da se pomladak ne pojavljuje u intervalima već više postupno i to na svakih 100 godina na značajnijim površinama, dok se na izoliranim i manjim površinama regeneracija javlja u kraćim intervalima (Accetto, 1979) što objašnjava dobivene rezultate u našem istraživanju jer su istraživani lokaliteti crnog bora na manjim površinama okruženi klimatogenim sastojinama listača.

Klimatski čimbenici snažno utječu na pomlađivanje crnog bora, u godinama jake solarne aktivnosti i suše što dovodi do niskog prirasta, a regeneracija izostaje. Šumski požari se poklapaju sa jakom solarnom aktivnosti i niskim prirastom dok nije zabilježena značajna veza između požara i pomlađivanja istraživanih sastojina u zapadnoj Bosni (Accetto, 1979). Do sličnih zaključaka se došlo i prilikom istraživanja regeneracije crnoga bora nakon požara u dolini Trente i Loga pod Mangartom u Sloveniji gdje nije primijećeno odstupanje u vegetacijskom pokrivaču između površine gdje je zabilježen požar prije cca 40 godina i one na kojoj nije bilo požara (Stritih 2013).

U posljednjem desetljeću objavljen je niz studija u vezi s razvojem višestoljetnih kronologija godova drveća koje su osjetljive na temperaturu i oborine iz prvobitnih borovih šuma na Balkanu (Seim i sur., 2015; Trouet 2014). Ove studije pokazuju da klimatski signal u TRW-ovima vrsta bora može biti prilično slab (Seim i sur., 2013; Klippel i sur., 2017) i više ovisiti o lokalnim uvjetima nego o regionalnim klimatskim obrascima. Međutim, čini se da je klimatski signal u širini kasnog drva jači (proljetne oborine) (Klesse i sur., 2015), maksimalna kasna gustoća drva pokazuje još jači klimatski signal (ljetna temperatura) (Seim i sur., 2013; Trouet 2014; Klesse i sur., 2015). Naši rezultati dobiveni analizom stabilnih ugljikovih i kisikovih izotopa u celulozi drva bora munike pokazuju veće korelacije između TRSI i klimatskih varijabli (temperatura, oborina i PDSI) u usporedbi s TRW. Najveće korelacije nalaze se kada su uključeni ekološki uvjeti cijelog ljetnog razdoblja (lipanj–kolovoz; JJA). Ovi se rezultati općenito slažu s ranijom studijom (Hafner i sur., 2011) koji potvrđuju snažan pozitivan odnos između izotopa  $\delta^{18}\text{O}$  i ljetne temperature te negativan odnos s oborinama u jugoistočnim europskim Alpama.

U usporedbi s rezultatima Levaniča i sur. 2020, uočavamo nešto jači odnos između  $\delta^{13}\text{C}$  i ljetnih oborina. Kao što su objavili (Liu i sur., 2019) za područje planine Tiamnu opažamo značajne negativne korelacije između  $\delta^{18}\text{O}$  i PDSI indeksa i oborine. Uočavamo jaču povezanost između PDSI i  $\delta^{18}\text{O}$  nego između PDSI i  $\delta^{13}\text{C}$ , što je u skladu s rezultatima (Esper i sur., 2018; Urban i sur., 2021).

Iz eko-fiziološke perspektive, vrijednost  $\delta^{13}\text{C}$  u godovima stabala prvenstveno je modulirana temperaturno vođenom brzinom karboksilacije i/ili difuznom stomatalnom provodljivošću  $\text{CO}_2$  u lišće. Osobito na vlažnim mjestima, gdje stomatalna vodljivost i međustanična koncentracija  $\text{CO}_2$  nisu ograničavajući čimbenici fotosinteze (Lichtenthaler i ostali 2007) više temperature rezultiraju višim (tj. manje negativnim) vrijednostima  $\delta^{13}\text{C}$  (Lipp i ostali 1991).

Smatra se da vrijednosti  $\delta^{13}\text{C}$  celuloze u godovima stabala pružaju posebno važne uvide u efikasnost korištenja vode (WUE) stabla i druge srodne fiziološke procese (Farquhar 1989, Pumijumnong 2020). Pretpostavlja se da su vrijednosti  $\delta^{18}\text{O}$  u biljkama u negativnoj korelaciji sa stomatalnom vodljivošću, ali neovisne o fotosintetskom unosu  $\text{CO}_2$  (Roden i Siegwolf 2012). Stoga kombinirana analiza  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  u našoj studiji predstavlja značajno poboljšanje u usporedbi s drugima.

Doista, nekoliko nedavnih studija potvrđuje da  $\delta^{18}\text{O}$  može biti robustan i pouzdan pokazatelj stanja suše ili poplave (Ferrio i ostali 2015; Pumijumnong i ostali 2020). Potvrdili smo da je  $\delta^{18}\text{O}$  u

tijesnoj korelaciji s JA sumom oborina na značajnom dijelu Balkanskog poluotoka. Međutim, rezultati prostorne korelacije pokazuju da je kronologija  $\delta^{13}\text{C}$  još jača i stabilnija zamjena za rekonstrukciju ljetnih oborina. Suprotno tome, nije otkrivena prostorno-vremenska korelacija između TRSI-ja i temperature tijekom razdoblja od 1959. do 2018. To se može objasniti široko dokumentiranim fenomenom poznatim kao „divergencija“, gdje se više instrumentalne temperature ne odražavaju u TRWs zamjenama (Frank i sur., 2007). Postoji nekoliko hipoteza koje pokušavaju objasniti ovu razliku, koja je vjerojatno rezultat kombinacija različitih okolišnih i antropogenih čimbenika (Stine i Huybers 2014; Brownlee i sur., 2016). Utjecaj suše na rast i razvoj sastojina crnoga bora u Južnoj Europi istraživali su (An i sur., 2023) na lokalitetu u zapadnom dijelu Bosne i Hercegovine koristeći se analizom kisikovih izotopa. Na osnovu rekonstrukcije proteklih 300 godina utjecaja klimatskih čimbenika na rast i razvoj sastojina crnog bora zaključili su da je trend sušenja u Južnoj Europi započeo od 1850. godine te da su globalne promjene putem zagađenja povećanjem stakleničkih plinova u atmosferi imale velikog utjecaja na kopno-atmosfera zagrijavanje i pogoršanje trenda suše.



## 7. ZAKLJUČCI

Na temelju obavljenih istraživanja došlo se do sljedećih zaključaka:

1. Strukturne značajke istraživanih prašuma crnog bora i bora munike ukazuju da ove vrste u ekstremnim uvjetima staništa postižu visoke proizvodne vrijednosti (do 1300 m<sup>3</sup>/ha). Maksimalna utvrđena starost stabala crnog bora se kreće od 144 godine na zapadnim lokalitetima do 501 godinu na istočnim lokalitetima. Maksimalna starost stabala munike na Orjenu je 625 godina dok je većina stabala starosti od 200 do 400 godina. Obje istraživane vrste pokazuju raznodobnu strukturu stablimičnog i/ili grupimičnog oblika smjese.
2. Utjecaj klimatskih čimbenika na rast crnoga bora promatran je u dva razdoblja: 1901.–1959. godine i 1960.–2008. godine. U prvom razdoblju utjecaj temperature zraka u ljetnom periodu pokazao je negativne korelacije s rastom stabala dok je nakon 1960. godini taj utjecaj neočekivano oslabio i postao beznačajan. U istom razdoblju crni bor je pokazao značajnu pozitivnu osjetljivost na temperature zraka u rano proljeće (veljača – ožujak) čime je pozitivno iskoristio utjecaj klimatskih promjena jer je ranije započeo s rastom. Iz toga razloga ljetne temperature zraka više ne limitiraju rast stabala crnoga bora. Sve navedeno ukazuje na to da je crni bor izrazito plastična vrsta koja se prirodno prilagodila novonastalim izmijenjenim uvjetima klime.
3. Utjecaj klimatskih čimbenika na rast munike promatran je u periodu od 1901. do 2008. godine. Na rast munike pozitivno utječu oborine u ljetnom periodu. Na pojedinim lokalitetima porast temperature zraka od kraja zime do ranog proljeća pozitivno utječe na rast. Naime, uvjeti u kojima munika raste su ekstremniji od staništa crnog bora s izraženim sušnim ljetima i vrlo hladnim zimama. U svom arealu munika nema konkurenciju i u takvim uvjetima ima izrazito dug životni vijek. Razdoblje od 50 godina u drugoj polovini dvadesetog stoljeća je relativno kratko da bi se odrazilo na osjetljivost klimatskog signala posebno jer je munika rastući na ekstremnim staništima prilagođena ekstremnim klimatskim prilikama.

4. Prirodno pomlađivanje nije značajno ovisno o pojavi šumskih požara. Ovu zakonitost treba promatrati na svakom lokalitetu zasebno i ne može se generalizirati za čitavo područje rasprostiranja borova. U epimediteranskom i submediteranskom području šumski požari pomažu opstanku crnoga bora jer uklanjaju konkurenciju klimatogene vegetacije.
5. Crni bor i munika su vrste koje rastu u ekstremnim stanišnim uvjetima u pogledu podloge, dostupnosti vode te klimatskih čimbenika. Provedena istraživanja ukazuju da su se obje vrste, posebice crni bor, prirodno prilagodile novonastalim uvjetima te iskoristile visoke proljetne temperature zraka u korist prirašćivanja (raniji početak vegetacije) te se stoga zasigurno mogu preporučiti za pošumljavanje ekstremnih staništa dinarskoga krša.
6. Buduće gospodarenje sastojinama crnoga bora treba vršiti u skladu s biološkim svojstvima i ekološkim zahtjevima vrste imajući u vidu buduće klimatske prilike. S obzirom na to da su obje istraživane vrste dobro prilagođene ekstremnim staništima prirodnu obnovu bi trebalo provoditi na malim površinama prilagođenim geomorfologiji terena. U slučajevima velikih nagiba terena i plitkih tala treba provoditi oplodne sječe u dva sijeka dok u slučajevima blažih nagiba i većih kompleksa borovih šuma mogu i čiste sječe na malim površinama (promjer kruga ne veće od 2 visine dominantnih stabala) uz ostavljanje pričuvaka. Kako su obje vrste prilagođene na šumske požare ipak je za očekivati da će se u budućnosti jačina i broj požara povećavati. U svakom slučaju prilikom prirodne obnove (bilo oplodnom ili čistom sječom) treba ostavljati pričuvke starih stabala. Ova stabla treba negovati (čistiti od suhih grana) te ih pravilno rasporediti po površini sastojine kako bi uvijek osiguravala izvor sjemena.

## 8. LITERATURA

Accetto, M. (1979): Regeneration, growth and development of natural stands of Austrian Pine (*Pinus nigra* Arnold) on dolomite-lime-stone sites of Western Bosnia. *Zbornik Gozdarstvo in Lesarstvo* 17, 247–350.

Afzal-Rafii, Zara, i Richard S. Dodd. (2006): Chloroplast DNA Supports a Hypothesis of Glacial Refugia over Postglacial Recolonization in Disjunct Populations of Black Pine (*Pinus Nigra*) in Western Europe: PHYLOGEOGRAPHY OF EUROPEAN BLACK PINE. *Molecular Ecology* 16 (4): 723–36. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2006.03183.x>.

Alikalfić, F. (1971): Problemi gospodarenja visokim ,prebornim‘ šumama u Bosni i Hercegovini. *DIT šumarstva i industrije za preradu drveta, Sarajevo*.

An, Wenling, Chenxi Xu, Slobodan B. Marković, Shanlei Sun, Yue Sun, Milivoj B. Gavrilov, Zoran Govedar, Qingzhen Hao, i Zhengtang Guo. (2023): Anthropogenic Warming Has Exacerbated Droughts in Southern Europe since the 1850s. *Communications Earth & Environment* 4 (1): 232. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00907-1>.

Anderegg, William R. L., Jeffrey M. Kane, i Leander D. L. Anderegg. (2013): Consequences of Widespread Tree Mortality Triggered by Drought and Temperature Stress. *Nature Climate Change* 3 (1): 30–36. <https://doi.org/10.1038/nclimate1635>.

Barber, Valerie A., Glenn Patrick Juday, i Bruce P. Finney. (2000): Reduced Growth of Alaskan White Spruce in the Twentieth Century from Temperature-Induced Drought Stress. *Nature* 405 (6787): 668–73. <https://doi.org/10.1038/35015049>.

Barbet-Massin, Morgane, Frédéric Jiguet, Cécile Hélène Albert, i Wilfried Thuiller. (2012): Selecting Pseudo-Absences for Species Distribution Models: How, Where and How Many?: *How to Use Pseudo-Absences in Niche Modelling? Methods in Ecology and Evolution* 3 (2): 327–38. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>.

Bebi, Peter, Dominik Kulakowski, i Christian Rixen. (2009): Snow Avalanche Disturbances in Forest Ecosystems—State of Research and Implications for Management. *Forest Ecology and Management* 257 (9): 1883–92. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.050>.

Belsky, A. Joy, i Charles D. Canham. (1994): Forest Gaps and Isolated Savanna Trees. *BioScience* 44 (2): 77–84. <https://doi.org/10.2307/1312205>.

Beniston, Martin, David B. Stephenson, Ole B. Christensen, Christopher A. T. Ferro, Christoph Frei, Stéphane Goyette, Kirsten Halsnaes, i ostali. (2007): Future Extreme Events in European Climate: An Exploration of Regional Climate Model Projections. *Climatic Change* 81 (S1): 71–95. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z>.

Boettger, Tatjana, Marika Haupt, Kay Knöllner, Stephan M. Weise, John S. Waterhouse, Katja T. Rinne, Neil J. Loader, i ostali. (2007): Wood Cellulose Preparation Methods and Mass

Spectrometric Analyses of  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and Nonexchangeable  $\delta^2\text{H}$  Values in Cellulose, Sugar, and Starch: An Interlaboratory Comparison“. *Analytical Chemistry* 79 (12): 4603–12. <https://doi.org/10.1021/ac0700023>.

Brain, C. K., i A. Sillent. (1988): Evidence from the Swartkrans Cave for the Earliest Use of Fire. *Nature* 336 (6198): 464–66. <https://doi.org/10.1038/336464a0>.

Brownlee, A. H., Patrick F. Sullivan, Adam Z. Csank, Bjartmar Sveinbjörnsson, i Sarah B. Z. Ellison. (2016): Drought-induced Stomatal Closure Probably Cannot Explain Divergent White Spruce Growth in the Brooks Range, Alaska, USA. *Ecology* 97 (1): 145–59. <https://doi.org/10.1890/15-0338.1>.

Bucci, G., G. G. Vendramin, L. Lelli, i F. Vicario. (1997): Assessing the Genetic Divergence of *Pinus Leucodermis* Ant. Endangered Populations: Use of Molecular Markers for Conservation Purposes. *Theoretical and Applied Genetics* 95 (7): 1138–46. <https://doi.org/10.1007/s001220050674>.

Bunn, A. G. (2008): A Dendrochronology Program Library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26 (2): 115–24. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.

Büntgen, Ulf, Willy Tegel, Kurt Nicolussi, Michael McCormick, David Frank, Valerie Trouet, Jed O. Kaplan, i ostali. (2011): 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility“. *Science* 331 (6017): 578–82. <https://doi.org/10.1126/science.1197175>.

Buras, A. (2017): A Comment on the Expressed Population Signal. *Dendrochronologia* 44 (lipanj): 130–32. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.005>.

Christopoulou, A., Peter Z. Fulé, Pavlos Andriopoulos, Dimitris Sarris, i Margarita Arianoutsou. (2013): Dendrochronology-Based Fire History of *Pinus Nigra* Forests in Mount Taygetos, Southern Greece. *Forest Ecology and Management* 293 (travanj): 132–39. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.048>.

Christopoulou, A., Nikolaos M. Fyllas, Pavlos Andriopoulos, Nikos Koutsias, Panayiotis G. Dimitrakopoulos, i Margarita Arianoutsou. (2014): Post-Fire Regeneration Patterns of *Pinus Nigra* in a Recently Burned Area in Mount Taygetos, Southern Greece: The Role of Unburned Forest Patches. *Forest Ecology and Management* 327 (rujan): 148–56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.006>.

Cindrić K, K., Güttler, I., Pandžić, K., Srnc, L., Vučetić, V., Zaninović, K. (2018): Sedmo nacionalno izvješće Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC). *Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ)*.

Cook, E. R., D. M. Meko, D. W. Stahle, i M. K. Cleaveland. (1999): Drought Reconstructions for the Continental United States. *Journal of Climate* 12 (4): 1145–62. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1145:DRFTCU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1145:DRFTCU>2.0.CO;2).

Cook, E. R., i Kenneth P. (1997): Calculating Unbiased Tree-Ring Indices for the Study of Climatic and Environmental Change. *The Holocene* 7 (3): 361–70. <https://doi.org/10.1177/095968369700700314>.

Cook, E.R., D.M. Meko, i C.W. Stockton. (1997): NOAA/WDS Paleoclimatology - Cook et al. 1997 Western US Drought Area Index Reconstruction. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.25921/CTAN-9D11>.

D'Arrigo, Rosanne, Rob Wilson, Beate Liepert, i Paolo Cherubini. (2008): On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A Review of the Tree-Ring Evidence and Possible Causes. *Global and Planetary Change* 60 (3–4): 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.03.004>.

Diaci, J., ur. 1999. *VIRGIN Forests and Forest Reserves in Central and East European Countries: History, Present Status and Furture Development ; Proceedings of the Invited Lecturers' Reports Presented at the COST E4 Management Committee and Working Groups Meeting in Ljubljana, Slovenia, 25 - 28 Aril 1998*. Ljubljana: Department of Forestry and Renewable Forest Resources - Biotechnical Faculty.

Debazac, E.-F. (1971): Contribution à la connaissance de la répartition et de l'écologie de *Pinus nigra* Arn. dans le Sud-Est de l'Europe. *Annales des Sciences Forestières* 28 (2): 91–139. <https://doi.org/10.1051/forest/19710201>.

Enescu, Cristian, Daniele de Rigo, Giovanni Caudullo, i Tracy Durrant. (2016): *Pinus nigra* in Europe: distribution, habitat, usage and threats“. European Atlas of Forest Tree Species Publisher: Publication Office of the European Union, Luxembourg

Esper, Jan, Steffen Holzkämper, Ulf Büntgen, Bernd Schöne, Frank Keppler, Claudia Hartl, Scott St. George, Dana F. C. Riechelmann, i Kerstin Treydte. (2018): Site-Specific Climatic Signals in Stable Isotope Records from Swedish Pine Forests. *Trees* 32 (3): 855–69. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1678-z>.

Ferrio, Juan Pedro, Andrés Díez-Herrero, Daniel Tarrés, Juan Antonio Ballesteros-Cánovas, Mònica Aguilera, i José María Bodoque. (2015): Using stable isotopes of oxygen from tree-rings to study the origin of past flood events: first results from the iberian peninsula. *Quaternaire*, izd. vol. 26/1 (ožujak): 67–80. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.7172>.

Fkiri, Sondes, Faten Mezni, Ghayth Rigane, Ridha Ben Salem, Hanene Ghazghazi, M. Larbi Khouja, Zouheir Nasr, i Abdelhamid Khaldi. (2021): Chemotaxonomic Study of Four Subspecies of *Pinus Nigra* Arn. Grown in Common Garden Based on Essential Oil Composition. Uredio Constantin Apetrei. *Journal of Food Quality* 2021 (srpanj): 1–7. <https://doi.org/10.1155/2021/5533531>.

Frank, David, Ulf Büntgen, Reinhard Böhm, Maurizio Maugeri, i Jan Esper. (2007): Warmer Early Instrumental Measurements versus Colder Reconstructed Temperatures: Shooting at a Moving Target. *Quaternary Science Reviews* 26 (25–28): 3298–3310. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.08.002>.

Franjić, J., Vidaković, M. (2005): Golosjemenjače, 824.

Fritts, H.C. (1976): *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 p.

Fukarek, P., Fukarek, P. bez dat. (1966): Zajednice endemne munike na planini Prenju u Hercegovini, *Šumarski list* 61–83.

Fulé, Peter Z., Montserrat Ribas, Emilia Gutiérrez, Ramón Vallejo, i Margot W. Kaye. (2008): Forest Structure and Fire History in an Old Pinus Nigra Forest, Eastern Spain. *Forest Ecology and Management* 255 (3–4): 1234–42. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.046>.

Gao, Xuejie, i Filippo Giorgi. (2008): Increased Aridity in the Mediterranean Region under Greenhouse Gas Forcing Estimated from High Resolution Simulations with a Regional Climate Model. *Global and Planetary Change* 62 (3–4): 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.02.002>.

Giovannelli, Guia, Anne Roig, Ilaria Spanu, Giovanni Giuseppe Vendramin, i Bruno Fady. (2017): A New Set of Nuclear Microsatellites for an Ecologically and Economically Important Conifer: The European Black Pine (Pinus Nigra Arn.). *Plant Molecular Biology Reporter* 35 (3): 379–88. <https://doi.org/10.1007/s11105-017-1029-z>.

Grissino-Mayer, H.D. (2001): Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. *Tree-Ring Research*, izd. 57: 205–21.

Hafner, Polona, Iain Robertson, Danny McCarroll, Neil J. Loader, Mary Gagen, Roderick J. Bale, Högne Jungner, Eloni Sonninen, Emmi Hiltavuori, i Tom Levanič. (2011): Climate Signals in the Ring Widths and Stable Carbon, Hydrogen and Oxygen Isotopic Composition of Larix Decidua Growing at the Forest Limit in the Southeastern European Alps. *Trees* 25 (6): 1141–54. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0589-z>.

Harris, I., P.D. Jones, T.J. Osborn, i D.H. Lister. (2014): Updated High-Resolution Grids of Monthly Climatic Observations - the CRU TS3.10 Dataset: UPDATED HIGH-RESOLUTION GRIDS OF MONTHLY CLIMATIC OBSERVATIONS. *International Journal of Climatology* 34 (3): 623–42. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>.

Higgins, Steven I., i David M. Richardson. (1998): No title found]. *Plant Ecology* 135 (1): 79–93. <https://doi.org/10.1023/A:1009760512895>.

Hlásny, T, Z Barcza, M Fabrika, B Balázs, G Churkina, J Pajtík, R Sedmák, i M Turcáni. (2011): Climate Change Impacts on Growth and Carbon -balance of Forests in Central Europe. *Climate Research* 47 (3): 219–36. <https://doi.org/10.3354/cr01024>.

Holeksa, Jan, Tomasz Zielonka, Magdalena Żywiec, i Peter Fleischer. (2016): Identifying the Disturbance History over a Large Area of Larch–Spruce Mountain Forest in Central Europe. *Forest Ecology and Management* 361 (veljača): 318–27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.031>.



Holmes, R. L. (1983): Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement“ 43: 69–79.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023): *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1. izd. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

Isajev, V., Andonovski, V. (2003): European black pine (*Pinus nigra*). EUFORGEN Technical Guidelines for Genetic Conservation and Use. ISBN: 978-92-9043-659-1, ISBN: 92-9043-659-X.

J. E. Keeley and P.H. Zedler. (1998): Evolution of life histories in *Pinus*. U *Ecology and Biogeography of Pines*, 219–51. Cambridge University Press.

Keeley, Jon E. (2009): Fire Intensity, Fire Severity and Burn Severity: A Brief Review and Suggested Usage. *International Journal of Wildland Fire* 18 (1): 116. <https://doi.org/10.1071/WF07049>.

Klesse, S., M. Ziehmer, G. Rousakis, V. Trouet, i D. Frank. (2015): Synoptic Drivers of 400 Years of Summer Temperature and Precipitation Variability on Mt. Olympus, Greece. *Climate Dynamics* 45 (3–4): 807–24. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2313-3>.

Klippel, Lara, Paul J. Krusic, Robert Brandes, Claudia Hartl-Meier, Valerie Trouet, Matthew Meko, i Jan Esper. (2017): High-Elevation Inter-Site Differences in Mount Smolikas Tree-Ring Width Data. *Dendrochronologia* 44 (lipanj): 164–73. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.05.006>.

Knibbe B. (2004): Past4 — Personal Analysis System for Treering Research Version 4, Instruction Manual. *SCIENCE/Bernhard Knibbe, Wien*.

Kulakowski, Dominik, Rupert Seidl, Jan Holeksa, Timo Kuuluvainen, Thomas A. Nagel, Momchil Panayotov, Miroslav Svoboda, i ostali. (2017a): A Walk on the Wild Side: Disturbance Dynamics and the Conservation and Management of European Mountain Forest Ecosystems. *Forest Ecology and Management* 388 (ožujak): 120–31. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.037>.

Nagel, T. (2017b): A Walk on the Wild Side: Disturbance Dynamics and the Conservation and Management of European Mountain Forest Ecosystems. *Forest Ecology and Management* 388 (ožujak): 120–31. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.037>.

Larsen, Jørgen Bo, Per Angelstam, Jürgen Bauhus, João Fidalgo Carvalho, Jurij Diaci, Dorota Dobrowolska, Anna Gazda, i ostali. (2022): Closer-to-Nature Forest Management. From Science to Policy. From Science to Policy. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs12>.

- Leal, Sofia, Derek Eamus, Michael Grabner, Rupert Wimmer, i Paolo Cherubini. (2008): Tree Rings of *Pinus Nigra* from the Vienna Basin Region (Austria) Show Evidence of Change in Climatic Sensitivity in the Late 20th Century. *Canadian Journal of Forest Research* 38 (4): 744–59. <https://doi.org/10.1139/X07-189>.
- Lenderink, Geert, i Erik van Meijgaard. (2008): Increase in Hourly Precipitation Extremes beyond Expectations from Temperature Changes. *Nature Geoscience* 1 (8): 511–14. <https://doi.org/10.1038/ngeo262>.
- Levanič, Tom. (2007): Atrics – A New System for Image Acquisition in Dendrochronology. *Tree-Ring Research* 63 (2): 117–22. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-63.2.117>.
- Levanič, Tom, Jernej Jevšenak, i Polona Hafner. (2020): Stable Isotopes Reveal Climate Signal Hidden in Tree Rings of Endemic Balkan Pines. *Atmosphere* 11 (2): 135. <https://doi.org/10.3390/atmos11020135>.
- Levanič, Tom, Simon Poljanšek, i Elvin Toromani. (2015): Early Summer Temperatures Reconstructed from Black Pine (*Pinus Nigra* Arnold) Tree-Ring Widths from Albania. *The Holocene* 25 (3): 469–81. <https://doi.org/10.1177/0959683614561882>.
- Levanič, Tom, Ionel Popa, Simon Poljanšek, i Constantin Nechita. (2013): A 323-Year Long Reconstruction of Drought for SW Romania Based on Black Pine (*Pinus Nigra*) Tree-Ring Widths. *International Journal of Biometeorology* 57 (5): 703–14. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0596-9>.
- Lichtenthaler, Hartmut K., Alexander Ač, Michal V. Marek, Jiří Kalina, i Otmar Urban. (2007): Differences in Pigment Composition, Photosynthetic Rates and Chlorophyll Fluorescence Images of Sun and Shade Leaves of Four Tree Species. *Plant Physiology and Biochemistry* 45 (8): 577–88. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.04.006>.
- Linares, J. C., i P. A. Tiscar. (2010): Climate Change Impacts and Vulnerability of the Southern Populations of *Pinus Nigra* Subsp. *Salzmannii*. *Tree Physiology* 30 (7): 795–806. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq052>.
- Lipp, J., P. Trimborn, P. Fritz, H. Moser, B. Becker, i B. Frenzel. (1991): Stable Isotopes in Tree Ring Cellulose and Climatic Change. *Tellus B* 43 (3): 322–30. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1991.t01-2-00005.x>.
- Liu, Lei, Xiaoyu Zhao, Yongxu Liu, Hong Zhao, i Fuchang Li. (2019): Dietary Addition of Garlic Straw Improved the Intestinal Barrier in Rabbits<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 97 (10): 4248–55. <https://doi.org/10.1093/jas/skz277>.
- Martín-Benito, Dario, Guillermo Gea-Izquierdo, Miren Del Río, i Isabel Cañellas. (2008): Long-Term Trends in Dominant-Height Growth of Black Pine Using Dynamic Models. *Forest Ecology and Management* 256 (5): 1230–38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.024>.

- Martín-Benito, Darío, Miren del Río, i Isabel Cañellas. (2010): Black Pine (*Pinus Nigra* Arn.) Growth Divergence along a Latitudinal Gradient in Western Mediterranean Mountains. *Annals of Forest Science* 67 (4): 401–401. <https://doi.org/10.1051/forest/2009121>.
- Matic, S.; Anić, I.; Oršanić, M.; Mikac, S. (2011): Njega i obnova šuma hrvatskoga Sredozemlja. *Akademija šumarskih znanosti, Zagreb*, 376–86.
- McCarroll, Danny, i Neil J. Loader. (2004): Stable Isotopes in Tree Rings. *Quaternary Science Reviews* 23 (7–8): 771–801. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.017>.
- Mihevc, Andrej, Mitja Prelovšek, i Nadja Zupan Hajna. (2010): *Introduction to the Dinaric Karst*. ZRC SAZU, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789612541989>.
- Miklić, Boris, Igor Anić, Stjepan Mikac, Marko Orešković, Domagoj Trlin, i Anja Žmegač. (2021): Climate sensitivity of black pine (*Pinus nigra* Arnold.) chronology in the Northern Velebit. *Šumarski list* 145 (3–4): 137–45. <https://doi.org/10.31298/sl.145.3-4.3>.
- Nagel, Thomas A., i Matteo Cerioni. (2023): Structure and Dynamics of Old-Growth *Pinus Nigra* Stands in Southeast Europe. *European Journal of Forest Research* 142 (3): 537–45. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01540-5>.
- Nagel, Thomas A., Dejan Firm, Rok Pisek, Tomaz Mihelic, David Hladnik, Maarten de Groot, i Dusan Rozenberger. (2017a): Evaluating the Influence of Integrative Forest Management on Old-Growth Habitat Structures in a Temperate Forest Region. *Biological Conservation* 216 (prosinac): 101–7. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.10.008>.
- Nagel, T. (2017b): Evaluating the Influence of Integrative Forest Management on Old-Growth Habitat Structures in a Temperate Forest Region. *Biological Conservation* 216 (prosinac): 101–7. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.10.008>.
- Oliver, Chadwick Dearing, i Bruce C. Larson. (1996): *Forest stand dynamics*. Update ed. New York: Wiley.
- Paluch, J., S. Keren, i Z. Govedar. (2021): The Dinaric Mountains versus the Western Carpathians: Is Structural Heterogeneity Similar in Close-to-Primeval *Abies–Picea–Fagus* Forests? *European Journal of Forest Research* 140 (1): 209–25. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01325-0>.
- Panayotov, Momchil, Peter Bebi, Valerie Trouet, i Steffan Yurukov. (2010): Climate Signal in Tree-Ring Chronologies of *Pinus Peuce* and *Pinus Heldreichii* from the Pirin Mountains in Bulgaria. *Trees* 24 (3): 479–90. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0416-y>.
- Panayotov, Momchil, Georgi Gogushev, Evgeni Tsavkov, Pepa Vasileva, Nickolay Tsvetanov, Dominik Kulakowski, i Peter Bebi. (2017): Abiotic Disturbances in Bulgarian Mountain Coniferous Forests – An Overview. *Forest Ecology and Management* 388 (ožujak): 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.034>.

- Piermattei, Alma, Francesco Renzaglia, i Carlo Urbinati. (2012): Recent Expansion of *Pinus Nigra* Arn. above the Timberline in the Central Apennines, Italy. *Annals of Forest Science* 69 (4): 509–17. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0207-2>.
- Pilcher, J.R., Baillie, M.G.L. (1973): A simple cross-dating program for tree-ring research., izd. 33: 7–14.
- Pintarić, K. (1991): *Uzgajanje šuma II dio: Tehnika obnove i njege sastojina*. Šumrski fakultet, Sarajevo.
- Pintarić, K., Izetbegović, S., & Dizdarević, H. (1978): Prilog proučavanju obnove i njege u sastojinama crnog i bijelog bora. *Radovi Šumarskog Fakulteta Univerziteta U Sarajevu*, 5–67.
- Poljanšek, S., D. Ballian, T. A. Nagel, i T. Levanič. (2012): A 435-Year-Long European Black Pine (*Pinus Nigra*) Chronology for the Central-Western Balkan Region. *Tree-Ring Research* 68 (1): 31–44. <https://doi.org/10.3959/2011-7.1>.
- Prodon, R. Athias-Binche, F. (1987): The impact of fire on animal communities in Mediterranean area, In The role of fire on ecological systems. *The Hague*, izd. Academic Publications: 121–57.
- Pumijumnong, Nathsuda, Achim Bräuning, Masaki Sano, Takeshi Nakatsuka, Chotika Muangsong, i Supaporn Buajan. (2020): A 338-Year Tree-Ring Oxygen Isotope Record from Thai Teak Captures the Variations in the Asian Summer Monsoon System. *Scientific Reports* 10 (1): 8966. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66001-0>.
- Pyne, Stephen J. (1982): Fire Primeval. *The Sciences* 22 (6): 14–20. <https://doi.org/10.1002/j.2326-1951.1982.tb02087.x>.
- Quezel, P., Barbero, M. (1980): Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen In person“, 205–56.
- Rangelova, P. i Panayotov, M. (2013): Structure of old-growth *Pinus heldreichii* forests in Pirin Mountains. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, izd. Supplement 2: 273–76.
- Retana, Javier, Josep Maria Espelta, Abdessamad Habrouk, Jose Luis Ordoñez, i Faustina de Solà-Morales. (2002): Regeneration Patterns of Three Mediterranean Pines and Forest Changes after a Large Wildfire in Northeastern Spain. *Écoscience* 9 (1): 89–97. <https://doi.org/10.1080/11956860.2002.11682694>.
- Roden, J., i R. Siegwolf. (2012): Is the Dual-Isotope Conceptual Model Fully Operational? *Tree Physiology* 32 (10): 1179–82. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps099>.
- Runkle, James Reade. (1981): Gap Regeneration in Some Old-Growth Forests of the Eastern United States. *Ecology* 62 (4): 1041–51. <https://doi.org/10.2307/1937003>.

Şahan, Evrim A., Nesibe Köse, Ünal Akkemik, H. Tuncay Güner, Çağatay Tavşanoğlu, Anıl Bahar, Valerie Trouet, i H. Nüzhet Dalfes. (2021): Fire History of *Pinus Nigra* in Western Anatolia: A First Dendrochronological Study. *Dendrochronologia* 69 (listopad): 125874. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125874>.

Santini, Filippo, Luis Serrano, Shawn Carlisle Kefauver, Mamun Abdullah-Al, Mònica Aguilera, Ester Sin, i Jordi Voltas. (2019): Morpho-Physiological Variability of *Pinus Nigra* Populations Reveals Climate-Driven Local Adaptation but Weak Water Use Differentiation. *Environmental and Experimental Botany* 166 (listopad): 103828. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103828>.

Saurer, M., K. Aellen, i R. Siegwolf. (1997): Correlating  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in Cellulose of Trees. *Plant, Cell and Environment* 20 (12): 1543–50. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-53.x>.

Schliemann, Sarah A., i James G. Bockheim. (2011): Methods for Studying Treefall Gaps: A Review. *Forest Ecology and Management* 261 (7): 1143–51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.011>.

Schweingruber, F.H. (1978): Prahistorisches Holz. The Value of Wood Fleams from Central Europe for the Solution of Archaeological and Paleoenviromental Problems. *American Antiquity* 43 (4): 782–782. <https://doi.org/10.1017/S0002731600093689>.

Seidl, Rupert, Mart-Jan Schelhaas, i Manfred J. Lexer. (2011): Unraveling the Drivers of Intensifying Forest Disturbance Regimes in Europe: DRIVERS OF FOREST DISTURBANCE INTENSIFICATION. *Global Change Biology* 17 (9): 2842–52. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x>.

Seidl, Rupert, Thomas A. Spies, David L. Peterson, Scott L. Stephens, i Jeffrey A. Hicke. (2016): REVIEW: Searching for Resilience: Addressing the Impacts of Changing Disturbance Regimes on Forest Ecosystem Services. Uredio David Angeler. *Journal of Applied Ecology* 53 (1): 120–29. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12511>.

Seim, Andrea, Kristina Linscott, Karl-Uwe Heussner, Niels Bonde, Claudia Baittinger, Jan Michael Stornes, Thomas S. Bartholin, i Hans W. Linderholm. (2015): Diverse Construction Types and Local Timber Sources Characterize Early Medieval Church Roofs in Southwestern Sweden. *Dendrochronologia* 35 (listopad): 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.06.001>.

Seim, Inge, Xiaodong Fang, Zhiqiang Xiong, Alexey V. Lobanov, Zhiyong Huang, Siming Ma, Yue Feng, i ostali. (2013): Genome Analysis Reveals Insights into Physiology and Longevity of the Brandt's Bat *Myotis Brandtii*. *Nature Communications* 4 (1): 2212. <https://doi.org/10.1038/ncomms3212>.

Siewig, Rolf T. W., J. Renée Brooks, John Roden, i Matthias Saurer, ur. (2022): *Stable Isotopes in Tree Rings: Inferring Physiological, Climatic and Environmental Responses*. Sv. 8. Tree

Physiology. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4>.

Stadelmann, Golo, Harald Bugmann, Franz Meier, Beat Wermelinger, i Christof Bigler. (2013): Effects of Salvage Logging and Sanitation Felling on Bark Beetle (*Ips typographus* L.) Infestations. *Forest Ecology and Management* 305 (listopad): 273–81. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.003>.

Stine, A. R., i P. Huybers. (2014): Arctic Tree Rings as Recorders of Variations in Light Availability. *Nature Communications* 5 (1): 3836. <https://doi.org/10.1038/ncomms4836>.

Stritih, A. (2013): Sekundarna sukcesija po požarih v sestojih črnega bora (*Pinus nigra* Arnold) v zgornjem Posočju. Univ. v Lj., Biotehniška fakul., Odd. za gozdarstvo in obn. gozdne vire,.

Swetnam, Thomas W., Christopher H. Baisan, Anthony C. Caprio, Peter M. Brown, Ramzi Touchan, R. Scott Anderson, i Douglas J. Hallett. (2009): Multi-Millennial Fire History of the Giant Forest, Sequoia National Park, California, USA“. *Fire Ecology* 5 (3): 120–50. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0503120>.

Thiel, Daniel, Laura Nagy, Carl Beierkuhnlein, Gerhard Huber, Anke Jentsch, Monika Konnert, i Juergen Kreyling. (2012): Uniform Drought and Warming Responses in *Pinus nigra* Provenances despite Specific Overall Performances. *Forest Ecology and Management* 270 (travanj): 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.034>.

Thom, Dominik, i Rupert Seidl. (2016): Natural Disturbance Impacts on Ecosystem Services and Biodiversity in Temperate and Boreal Forests. *Biological Reviews* 91 (3): 760–81. <https://doi.org/10.1111/brv.12193>.

Tíscar, Pedro A., i Manuel E. Lucas-Borja. (2016): Structure of Old-Growth and Managed Stands and Growth of Old Trees in a Mediterranean *Pinus nigra* Forest in Southern Spain. *Forestry* 89 (2): 201–7. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw002>.

Todaro, Luigi, Laia Andreu, Carmela Miriam D’Alessandro, Emilia Gutiérrez, Paolo Cherubini, i Antonio Saracino. (2007): Response of *Pinus leucodermis* to Climate and Anthropogenic Activity in the National Park of Pollino (Basilicata, Southern Italy). *Biological Conservation* 137 (4): 507–19. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.03.010>.

Touchan, Ramzi, Christopher Baisan, Ioannis D. Mitsopoulos, i Alexandros P. Dimitrakopoulos. (2012): Fire History In European Black Pine (*Pinus nigra* Arn.) Forests of the Valia Kalda, Pindus Mountains, Greece“. *Tree-Ring Research* 68 (1): 45–50. <https://doi.org/10.3959/2011-12.1>.

Treydte, Kerstin S., David C. Frank, Matthias Saurer, Gerhard Helle, Gerhard H. Schleser, i Jan Esper. (2009): Impact of Climate and CO<sub>2</sub> on a Millennium-Long Tree-Ring Carbon Isotope Record. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73 (16): 4635–47. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.057>.

- Trouet, Valerie. (2014): A Tree-Ring Based Late Summer Temperature Reconstruction (AD 1675–1980) for the Northeastern Mediterranean. *Radiocarbon* 56 (4): S69–78. [https://doi.org/10.2458/azu\\_rc.56.18323](https://doi.org/10.2458/azu_rc.56.18323).
- Urban, Otmar, Alexander Ač, Tomáš Kolář, Michal Rybníček, Natálie Pernicová, Eva Koňasová, Mirek Trnka, i Ulf Büntgen. (2021): The Dendroclimatic Value of Oak Stable Isotopes. *Dendrochronologia* 65 (veljača): 125804. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125804>.
- Vacchiano, Giorgio, Matteo Garbarino, Emanuele Lingua, i Renzo Motta. (2017): Forest Dynamics and Disturbance Regimes in the Italian Apennines. *Forest Ecology and Management* 388 (ožujak): 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.033>.
- Vidaković M., Fukarek, P., (1965): Nalaz prelazne ili hibridne svojte borova (*Pinus nigra* Dermis Fuk. et Vid.) na planini Prenju u Hercegovini., 68–87.
- Vitali, Alessandro, Matteo Garbarino, J. Julio Camarero, Francesco Malandra, Elvin Toromani, Velibor Spalevic, Milić Čurović, i Carlo Urbinati. (2019): Pine Recolonization Dynamics in Mediterranean Human-Disturbed Treeline Ecotones“. *Forest Ecology and Management* 435 (ožujak): 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.039>.
- White, P. S., Pickett, S. T. A. (1985): The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics.
- Whitmore, T. C. (1989): Canopy Gaps and the Two Major Groups of Forest Trees. *Ecology* 70 (3): 536–38. <https://doi.org/10.2307/1940195>.
- Wigley, T. M. L., K. R. Briffa, and P. D. Jones. (1984): On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 2 (23): 201–13.
- Wilson, Rob, Kevin Anchukaitis, Keith R. Briffa, Ulf Büntgen, Edward Cook, Rosanne D’Arrigo, Nicole Davi, i sur. (2016): Last Millennium Northern Hemisphere Summer Temperatures from Tree Rings: Part I: The Long Term Context. *Quaternary Science Reviews* 134 (veljača): 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.12.005>.
- Zang, C., i F. Biondi. (2015): Treeclim: An R Package for the Numerical Calibration of Proxy-climate Relationships. *Ecography* 38 (4): 431–36. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>.
- Zhou, Liming, Compton J. Tucker, Robert K. Kaufmann, Daniel Slayback, Nikolay V. Shabanov, i Ranga B. Myneni. (2001): Variations in Northern Vegetation Activity Inferred from Satellite Data of Vegetation Index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106 (D17): 20069–83. <https://doi.org/10.1029/2000JD000115>.
- Zimšek, M. (2011): Structure and growth of European Black Pine stands on steep, dolomited slope in Zasavje. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.



## ŽIVOTOPIS AUTORA

Ljubica Lukač, rođena je 18. listopada 1982. godine u Foči, Bosna i Hercegovina. Osnovnu i srednju Šumarsku tehničku školu pohađala je u Foči. Šumarski fakultet, Univerziteta u Banjoj Luci upisala je 2001. godine, a diplomirala 2006. godine. Master studij na Šumarskom fakultetu, Univerziteta u Beogradu na odsjeku Pejzažna arhitektura završila je 2013. godine. Od kolovoza 2006. godine zaposlena je u javnom poduzeću „Šume RS” BiH, Centar za sjemensko – rasadničku proizvodnju Doboj na radnom mjestu referenta za hortikulturnu proizvodnju. Od 2009. godine radi na radnom mjestu tehničkog direktora u Centru za sjemensko rasadničku proizvodnju. Do sada je kao autor i koautor objavila 4 znanstvena članka, od toga jedan u kategoriji Q1. Trenutno sudjeluje na EU projektu Mjere prilagodbe klimatskim promjenama za održivo upravljanje prirodnim resursima – „MEMORIE" financiranom iz Operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014.–2020. Boravila je na studijskom usavršavanju u Global Change Research Institute, Brno, Češka Republika te u Laboratory of Tree Ring Research, The University of Arizona, Tucson, Arizona USA. Sudjelovala je kao izlagač na više domaćih i međunarodnih znanstvenih konferencija.

Popis objavljenih radova:

Lukač, Ljubica, Stjepan Mikac, Otmar Urban, Tomáš Kolář, Michal Rybníček, Alexander Ač, Mirek Trnka, and Michal V. Marek. 2021. "Stable Isotopes in Tree Rings of *Pinus heldreichii* Can Indicate Climate Variability over the Eastern Mediterranean Region" *Forests* 12, no. 3: 350. <https://doi.org/10.3390/f12030350>

Verica Vasić, Ljubica Lukač, Sreten Vasić, Milan Drekić, Leopold Poljaković Pajnik. / Application of herbicides in production of spruce seedlings / 7th International Weed Science Congress / 19 - 25. 06. 2016. / Ministry of agriculture of the Czech Republic / Prague, Czech Republic

Verica Vasić, Slaviša Opačić, Mladen Grabovičkić, Ljubica Lukač, Leopold Poljaković Pajnik, Milan Drekić, Predrag Pap / The use of herbicides to weed control in nursery production of seedlings black locust and oak / Sixth International Scientific Agricultural Symposium “Agrosym 2015” / Sarajevo, Bosnia and Herzegovin

Lukac Ljubica / Bosnian pine tree-ring width chronology in the subalpine belt of southeastern Dinaric Mountains - preliminary results/ The Eurodendro 2019 Conference held on 9 - 13 September 2019 in Brno, Czech Republic

Lukac Ljubica / (*Pinus heldreichii* H. Christ and *Pinus nigra* Arnold) Forest dynamic based on the tree ring in the subalpine belt of the southeastern Dinaric Mountains / Seminar - Tree Ring Talk held October 18, 2022 in Laboratory of Tree Ring Research, The University of Arizona, Tucson, Arizona USA