



Sveučilište u Zagrebu
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE

Marko Orešković

**DINAMIKA PRIRODNE OBNOVE
SASTOJINA OBIČNE SMREKE (*Picea abies*
(L.) Karst.) ZAHVAĆENIH SUŠENJEM NA
PODRUČJU SJEVERNOGA VELEBITA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2025.



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

Marko Orešković

**NATURAL REGENERATION DYNAMIC OF
NORWAY SPRUCE (*Picea abies* (L.) Karst.)
STANDS AFFECTED BY DIEBACK IN THE
NORTHERN VELEBIT**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE

Marko Orešković

**DINAMIKA PRIRODNE OBNOVE
SASTOJINA OBIČNE SMREKE (*Picea abies*
(L.) Karst.) ZAHVAĆENIH SUŠENJEM NA
PODRUČJU SJEVERNOGA VELEBITA**

DOKTORSKI RAD

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

Zagreb, 2025.



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

Marko Orešković

**NATURAL REGENERATION DYNAMIC OF
NORWAY SPRUCE (*Picea abies* (L.) Karst.)
STANDS AFFECTED BY DIEBACK IN THE
NORTHERN VELEBIT**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: ass. prof. Stjepan Mikac, PhD.

Zagreb, 2025.

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 istom fakultetu na Zavodu za ekologiju i uzgajanje šuma. Doktorski rad pod naslovom „Struktura i regeneracijska dinamika bukovo-jelove prašume Čorkova uvala“ obranio je 2010. godine. U znanstveno-nastavno zvanje docenta izabran je 2014. godine na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, dok je u znanstveno-nastavno zvanje izvanrednog profesora, na istom fakultetu izabran 2021. godine. Predaje na preddiplomskom i diplomskom studiju kolegije Uzgajanje šuma 1, Uzgajanje šuma 2, Silvikultura, Prašume i šumske 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.

Dosadašnji znanstveni doprinos u području i temi istraživanja ogleda se u znanstvenoj i stručnoj bibliografiji koja sadrži 60 objava od čega 33 izvorna znanstvena rada (indeksiranih u bazi – WoSCC), 1 priručnik, 2 znanstvene knjige, 4 poglavija u znanstvenim knjigama, 15 radova u recenziranim zbornicima skupova te 13 sažetaka u zbornicima skupova. Osim toga ogleda se i aktivnim sudjelovanjem na inozemnim i domaćim međunarodnim znanstvenim i stručnim skupovima i to na 22 međunarodne i 5 nacionalnih znanstvenih konferencija te na 24 domaća stručna skupa. Znanstvena djelatnost pristupnika dokazana je i citiranošću u iznosu od 1838 citata (h-indeks: 18) u Google scholar-u te 849 citata (h-indeks: 13) u Web of Science bazi.

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 šumskega 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. Od 2020. do 2023. godine vodio je EU projekt: Mjere prilagodbe klimatskim promjenama za održivo upravljanje prirodnim resursima - "MEMORIE" financiran iz Operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014. – 2020.

godina (KK.05.1.1.02). Od 2020. do 2024. voditelj je projekta „Razvoj modela adaptivnog gospodarenja šumama - mjere prilagodbe na klimatske promjene“, (HRVATSKE ŠUME d.o.o.). Od 2019. do 2022. voditelj je projekta „Utjecaj klimatskih promjena na stanje očuvanja šumskega ekosustava u NP Plitvička jezera“, a od 2017. do 2020. voditelj projekta „Uporaba LiDAR-a u inventarizaciji šumskega ekosustava u zaštićenim područjima prirode na primjeru NP Plitvička jezera“.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

TI (naslov)	Dinamika prirodne obnove sastojina obične smreke (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.) Zahvaćenih sušenjem na području sjevernoga Velebita
AU (autor)	Marko Orešković
AD (adresa)	Stjepana Radića 31, 53220, Otočac, RH e-mail: moreskovic10@gmail.com
SO (izvor)	Šumarska knjižnica, Fakultet šumarstva i drvene tehnologije Svetosimunska 23, 10000 Zagreb
PY (godina objave)	2025.
LA (izvorni jezik)	Hrvatski
DE (ključne riječi)	Prirodna obnova, sušenje, Klimatske promjene, Potkornjaci, dinamika šume, sjeverni Velebit
GE (zemlja objave)	Republika Hrvatska
PT (vrsta objave)	Doktorski rad
VO (obujam)	189 stranica, 32 tablice, 89 slika i 172 navoda literature
AB (sažetak)	<p>Dinamika šumskega ekosistema utjecana je prirodnim nepogodama poput vjetroizvala, vjetroloma, požara i napada štetnih kukaca, a njihova učestalost povećava se zbog klimatskih promjena. Brojna istraživanja pokazuju kako će klimatske promjene značajno ugroziti populacije vrsta drveća koje se nalaze na rubovima svojeg prirodnog rasprostranjenja, a ekstremni toplinski valovi i dugotrajne suše mogli bi značajno utjecati na njihovu otpornost i prirodnu obnovu (Bennett i dr. 2015; Carnicer i dr. 2021; Vilà-Cabrera i Jump 2019). Stoga će stabilnost i opstanak takvih populacija uvelike ovisiti o sposobnosti prilagodbe promjenjivim stanišnim uvjetima. Premda je jedna od najrasprostranjenijih evropskih vrsta drveća obična smreka (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.) ujedno je jedna od najugroženijih. Posebno se to odnosi na populacije s juga Europe gdje smreka zauzima planinske predjele i specifične reljefne oblike. U Hrvatskoj obična smreka prirodno pridolazi u subalpinskom vegetacijskom pojusu na nadmorskim visinama od 1200 do 1600 m gdje tvori čiste sastojine pretežito u vrtačama, udolinama i mrazištima. Ondje smreka u reljefno uvjetovanim klimatskim inverzijama nadoknađuje manjak vlage i oborina koje su često deficitarne na dinarskom kršu. U takvim stanišnim uvjetima, na području sjevernoga Velebita, provedeno je ovo istraživanje. Cilj istraživanja bio je istražiti klimatske čimbenike koji najviše utječu na rast obične smreke te analizirati dinamiku sušenja i prirodne obnove smrekovih sastojina. Rezultati korelacijskih analiza između klimatskih varijabli i indeksnih kronologija obične smreke pokazali su značajnu pozitivnu povezanost rasta s oborinama (Prec) i indeksom suše (SPEI) te negativan utjecaj temperature zraka iz prethodne godine. Nadalje, analiza dinamike brojnosti populacije smrekovog osmerozubog potkornjaka (<i>Ips typographus</i> L.) pokazala je</p>

postojanje značajne statističke povezanosti između ljetnih temperatura zraka i međugodišnje varijabilnosti brojnosti potkornjaka na području sjevernoga Velebita. Rezultati analize dinamike sušenja pokazuju kako su ona zabilježena 2004., 2007. i 2008. godine, a glavni pokretač bila je suša 2003. godine nakon koje su uslijedile masovne gradacije potkornjaka. Rezultati analize odumiranja sastojina smreke s obzirom na nadmorsku visinu ukazuju na to da su najveće površine zahvaćene odumiranjem na nadmorskim visinama od 1200 do 1350 m, na blagim nagibima do 30° te na jugozapadnim ekspozicijama, što upućuje na izraženiji utjecaj insolacije i sušnog stresa u tim zonama. U istraživanju dokazana je i razlika u sušenju između gospodarskih sastojina te sekundarnih i primarnih prašuma gdje su se primarne prašume (Smrčeve doline) pokazale kao najotpornije. Prirodna obnova nakon postupnog odumiranja sastojina uslijed napada potkornjaka stvara uvjete koji favoriziraju pojavu jеле i bukve, dok velike otvorene površine nastale sanitarnim sijekom pogoduju pionirskim i heliofilnim vrstama. Obnova obične smreke moguća je samo u zdravim sastojinama dok je slučajevima sušenja ograničena zbog konkurenkcije gustog sloja prizemnog rašča.

BASIC DOCUMENTATION CARD

TI (Title)	Natural regeneration dynamic of norway spruce (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.) stands affected by dieback in the northern Velebit
OT (Original title)	Dinamika prirodne obnove sastojina obične smreke (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.) Zahvaćenih sušenjem na području sjevernoga Velebita
AU (Author)	Marko Orešković
AD (Adress)	Stjepana Radića 31, 53220, Otočac, RH e-mail: moreskovic10@gmail.com
SO (Source)	Library of Forestry, Faculty of Forestry and Wood Technology Svetosimunska 23, 10000 Zagreb
PY (Publication year)	2025.
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)	189 pages, 32 tables, 89 figures, 172 bibliographical references
AB (Abstract)	<p>The dynamics of forest ecosystems are influenced by natural disturbances such as windthrows, storms, fires and insect outbreaks, the frequency of which is increasing due to climate change. Numerous studies indicate that climate change will significantly threaten tree populations at the edges of their natural range, as extreme heat waves and prolonged droughts can severely affect their resilience and natural regeneration (Bennett et al., 2015; Carnicer et al., 2021; Vilà-Cabrera i Jump, 2019). The stability and survival of such populations will therefore largely depend on their ability to adapt to changing habitat conditions.</p> <p>Although Norway spruce (<i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.) is one of the most widespread tree species in Europe, it is also one of the most endangered, especially in southern Europe, where it colonises mountainous areas and specific landforms. In Croatia, Norway spruce occurs naturally in the subalpine vegetation belt at altitudes between 1200 and 1600 m and forms pure stands mainly in sinkholes, valleys and frost depressions. Under these habitat conditions, where climatic inversions compensate for the lack of moisture and precipitation characteristic of the Dinaric karst, this study was carried out in the northern Velebit region.</p> <p>The main objective of the research was to identify the climatic factors that have most influence on the growth of spruce and to analyze the dynamics of its decline and natural regeneration. Correlation analyzes between climatic variables and indexed chronologies of spruce showed a significant</p>

positive relationship between growth and precipitation (Prec) and the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI), while the air temperatures of the previous year had a negative influence. In addition, an analysis of the population dynamics of spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) revealed a significant statistical relationship between summer air temperatures and inter-annual population fluctuations at Northern Velebit.

The results of the analysis of mortality dynamics indicate that significant mortality events occurred in 2004, 2007 and 2008, primarily triggered by the drought in 2003, which was followed by a massive bark beetle outbreak. Spatial analysis of the decline in spruce stands as a function of altitude showed that the largest affected areas were at altitudes between 1200 and 1350 m, on gentle slopes up to 30° and on southwest-facing exposures, indicating a stronger influence of solar radiation and drought stress in these zones. Differences in tree mortality were found between managed forests and both secondary and primary old-growth stands, with primary forests (such as the Smrčeve doline) proving to be the most resilient. Natural regeneration following the gradual decline of stands due to bark beetle outbreaks creates conditions that favor the establishment of silver fir (*Abies alba*) and beech (*Fagus sylvatica*), while large open areas resulting from salvage logging promote pioneer and heliophilous species. Spruce regeneration is only possible in healthy stands, while in areas affected by forest dieback it is considerably restricted due to competition from dense ground vegetation.

SADRŽAJ

Popis slika	I
Popis tablica	IX
1. UVOD	1
2. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA	4
2.1. Ekološke osobine obične smreke	4
2.1.1. Rasprostranjenost.....	4
2.1.2. Ekološki zahtjevi obične smreke	7
2.2. Gospodarenje smrekom u Europi.....	10
2.3. Ugroze i prijetnje.....	15
2.3.1. Klimatske promjene – abiotski čimbenici	15
2.3.2. Štetni insekti– biotski čimbenici.....	19
2.4. Trenutno stanje smrekovih šuma u Europi	22
2.4.1. Austrija.....	22
2.4.2. Švicarska	23
2.4.3. Češka.....	24
2.4.4. Slovačka	25
2.4.5. Slovenija	26
2.4.6. Njemačka.....	28
2.4.7. Italija	29
2.4.8. Hrvatska.....	30
2.5. Sanacija i prirodna obnova sastojina nakon prirodnih nepogoda	31
2.5.1. Mjere sanacije smrekovih šuma u Europi.....	33
2.5.2. Urod sjemena obične smreke	35
2.5.3. Prirodna obnova.....	36
3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA	37
4. MATERIJALI I METODE RADA.....	38

4.1.	Područje istraživanja	38
4.2.	Klimatska obilježja područja istraživanja	41
4.3.	Fitocenološke značajke istraživanog područja	42
4.4.	Edafske značajke smrekovih zajednica na području sjevernog Velebita	47
4.5.	Način/metoda uzorkovanja	52
4.5.1.	Odabir lokaliteta i uspostava ploha za uzorkovanje	52
4.5.2.	Prikupljanje podataka.....	52
4.6.	Obrada i analiza podataka.....	58
4.6.1.	Analiza utjecaja klimatskih promjena na prikladnost staništa obične smreke u RH	58
4.6.2.	Analiza prostorne distribucije i intenziteta sušenja smrekovih sastojina na području NP Sjeverni Velebit.....	60
4.6.3.	Analiza utjecaja geomorfoloških čimbenika na odumiranje smreke	63
4.6.4.	Istraživanja osjetljivosti i otpornosti šuma obične smreke na klimatske promjene u prošlosti	64
4.6.4.1.	Očitavanje širina godova i procjena kambijalne starosti	65
4.6.4.2.	Datiranje očitanih serija širina godova	66
4.6.4.3.	Standardizacija serija širina godova	67
4.6.4.4.	Analiza utjecaja klime na radijalni prirast.....	69
4.6.4.5.	Analiza dugoročnih trendova prirasta temeljnica (BAI)	70
4.6.5.	Izračun strukturalnih parametara sastojina	70
4.6.6.	Analiza prirodne obnove	71
5.	REZULTATI.....	72
5.1.	Utjecaj klimatskih promjena na pogodnost staništa obične smreke u Hrvatskoj	72
5.2.	Dinamika populacije potkornjaka	74
5.3.	Dinamika radijalnog rasta stabala.....	78
5.4.	Klimatska osjetljivost obične smreke	80

5.5.	Dinamika odumiranja smreke na Velebitu	87
5.5.1.	Vremenska dinamika odumiranja sastojina obične smreke	87
5.5.2.	Prostorna dinamika odumiranja smreke.....	94
5.5.3.	Utjecaj geomorfološkim čimbenika na odumiranje	95
5.5.4.	Utjecaj geomorfološkim čimbenika na odumiranje tijekom vremena...	101
5.5.5.	Odumiranje sastojina smreke prema tipovima vegetacije	102
5.6.	Utjecaj sastojinskih čimbenika na odumiranje	110
5.6.1.	Dobna struktura	110
5.6.2.	Postanak sastojina.....	115
5.6.3.	Utjecaj strukturnih elemenata na odumiranje stabala smreke.....	116
5.7.	Strukturna obilježja dijelova sastojina zahvaćenih sušenjem	118
5.8.	Pomlađivanje istraživanih sastojina	137
5.8.1.	Pojavnost ponika i pomlatka na istraživanim plohamama.....	137
5.8.2.	Gustoća ponika i pomlatka.....	138
5.8.3.	Distribucija pomlatka prema visinskim klasama i vrstama drveća.....	142
5.9.	Mjere sanacije	149
6.	RASPRAVA.....	159
6.1.	Ekološka niša obične smreke u Republici Hrvatskoj.....	159
6.2.	Dinamika populacije smrekovog potkornjaka (<i>Ips typographus L.</i>).....	160
6.3.	Klimatska osjetljivost obične smreke na Velebitu	161
6.4.	Dinamika sušenja smreke na Velebitu.....	163
6.4.1.	Primarna prašuma, Sekundarna prašuma i gospodarske šume	163
6.4.2.	Prostorna analiza sušenja prema tipovima vegetacije	164
6.4.3.	Utjecaj geomorfoloških čimbenika na sušenje	165
6.5.	Pomlađivanje istraživanih sastojina	166
7.	ZAKLJUČCI.....	168
8.	LITERATURA	170

Popis slika

Slika 1. Sušenje smrekovih sastojina na području Velikog i Malog Lubenovca (Foto: B. Hrašovec).....	3
Slika 2. Prirodne smrekove šume na sjevernom Velebitu (gore); Gospodarske smrekove šume u Austriji (obnova čistim sječama, dolje) (Foto: M. Orešković)	6
Slika 3. Prostorni položaj nalazišta obične smreke u RH (<i>Picea abies Karst.</i>) i crvenom bojom položaj istraživanih sastojina A). Odnos između prosječne temperature zraka MAT (°C) i ukupne količine oborina MAP (mm)za plohe na kojima se pojavljuje smreka (crne točke) gdje crvena točka predstavlja istraživane sastojine u odnosu na plohe gdje nema smreke (sive točke) B).....	8
Slika 4. Oplodne sječe pod zastorom krošanja matičnih stabala na malim površinama (Foto: M.Orešković).	11
Slika 5. Grupimična oplodna sječa - bavarski femelschlag (Visoke Tatre, Slovačka) (Foto: M. Saniga)	12
Slika 6. Wagnerova rubna sječa na kulise u Austriji (foto: M. Orešković)	13
Slika 7. Indeks globalnog zatopljenja (GWI) od 1850. do 2020. godine. Antropogeni doprinos globalnom zagrijavanju prikazan crvenom bojom. Prirodni doprinos (sunce i vulkani) u plavoj boji. Žuta linija prikazuje kombiniranu (ukupnu) promjenu temperature.	16
Slika 8. Projicirane promjene godišnjih (lijevo) i ljetnih (desno) oborina (%) u razdoblju 2071.-2100. u usporedbi s osnovnim razdobljem 1971.-2000. za scenarij forsiranja RCP 8.5. Simulacije modela temelje se na prosjeku ansambla više modela RCM simulacija iz inicijative EURO-CORDEX (izvor: EEA, prema Jacob i dr., 2014)	17
Slika 9. Predviđene promjene u godišnjoj (lijevo), ljetnoj (sredina) i zimskoj (desno) temperaturi zraka blizu površine (°C) u razdoblju 2071.-2100., u usporedbi s osnovnim razdobljem 1971.-2000. za scenarije forsiranja RCP 4.5 (gore) i RCP 8.5 (dolje). Simulacije modela temelje se na prosjeku ansambla više modela RCM simulacija iz inicijative EURO-CORDEX.	18
Slika 10. Površine zahvaćene odumiranjem smreke zbog djelovanja potkornjaka na području sjevernoga Velebita (Foto: S. Mikac).	20

Slika 11. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Austriji od 1950. godine.....	23
Slika 12. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Švicarskoj od 1950. godine.....	24
Slika 13. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Češkoj od 1950. godine.....	25
Slika 14. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Slovačkoj od 1950. godine.....	26
Slika 15. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Sloveniji od 1950. godine.....	28
Slika 16. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Njemačkoj od 1950. godine.....	29
Slika 17. Količinadrvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Italiji od 1950. godine.....	30
Slika 18. Jačina utjecaja prirodne nepogode na određenu hipotetsku sastojinu promatranu putem standardnih indikatora strukture (N – broj stabala, G – temeljnica, V – volumen).	31
Slika 19. Shematski prikaz odnosa jačine prirodne nepogode (uslijed različitih inteziteta napada potkornjaka) te prostorni uzorak koji na razini jedne hipotetske sastojine A. Fotografije i primjeri desperziranog uzorka i lokaliziranog na razini gotovo cijele sastojine B.....	33
Slika 20. Prostroni obrazac sušenja smreke napadom potkornjaka.....	34
Slika 21. Područje istraživanja i položaj pokusnih ploha (Crvene točke) A, Prosječne godišnje vrijednosti oborina i temperatura sa mjerne postaje Zavižan B, Izgled smrekovih sastojina na sjevernom Velebitu C.	39
Slika 22. Prikaz područja primarne prašume Smrčeve doline i seknudarne prašume, narnčastom bojom područja zahvaćena sušenjem (lijevo), fitocenološka karta istraživanog područja, smrekove zajednice obojane crvenom bojom (desno)	42
Slika 23. Izgled sastojine obične smreke u Štirovači (Foto: M. Orešković)	44
Slika 24. Izgled Altimontansko-subalpinske smrekove šuma s obrubljenim gladcem na lokalitetu Lubenovačka vrata (Foto: M. Orešković)	45
Slika 25. Pretplaninska smrekova šuma s alpskom pljuskavicom na lokalitetu Krajačev kuk (Foto: M. Orešković).....	46

Slika 26. Odnos smrekovih zajednica i pripadajućih tala na području Velebita (Foto: D. Bakšić)	49
Slika 27. Izgled sučelja programa ForestScanner za terensko prikupljanje podataka o prostornom položaju i dimenzijama stabala s 3D prikazom pokusne plohe	53
Slika 28. Shema pokusne plohe.....	54
Slika 29. Izgled transekta u gospodarskim šumama	55
Slika 30. Prikupljanje podataka na transektu	56
Slika 31. Prikupljanje uzoraka iz stabla za potrebe dendrokronološke analize	57
Slika 32. Prikaz detalja za područje Lubenovca s godinama snimaka u zaglavlj ...	60
Slika 33. Prikaz postavljenih pokusnih ploha i transekata unutar zaštićenog područja i područja gospodarskih šuma, narančastom bojom označene površine zahvaćene sušenjem (gore) i Usporedba klasifikacije (crveni grid) LANDSAT-ovih snimaka s vizualno interpretiranim progalamama(dijelovima sastojina odumrlih djelovanjem potkornjaka) digitaliziranim na ortofotosnimcima (bijeli poligoni) (dolje).	62
Slika 34. Detalj područja istraživanja s položajem odumrlih sastojina (crne točke) prema nadmorskim visinama A), ekspoziciji B) i nagibu terena C).	63
Slika 35. Mehanička priprema prikupljenih uzoraka	64
Slika 36. Analiza skeniranih uzoraka pomoću sustava ATRICS	65
Slika 37. Prikaz očitavanja širine godova na uzorku	66
Slika 38. Projekcija prostorne razdiobe trenutne pogodnosti staništa obične smreke u Hrvatskoj. Tamno plavom bojom označena su područja visoke pogodnosti staništa obzirom na promatrane okolišne čimbenike A) te najvažniji ekološki prediktori koji određuju pogodnost staništa B)	72
Slika 39. Buduće projekcije pogodnosti staništa za običnu smrek u Republici Hrvatskoj za dva scenarija emisija (RCP4.5 i RCP8.5) za dva razdoblje (od 2011 – 2040. godine, od 2041. – 2070. godine). Plavom bojom su označena područja visoke pogodnosti staništa u rasponu od 0 do 1000 (odnosno od 0-100%).....	73
Slika 40. Odnos između prosječnih maksimalnih (svibanj – srpanj) temperatura zraka (Tmax) i gustoće populacija potkornjaka (<i>Ips typographus</i>) za razdoblje od 2005 – 2023. godine A). Linearni modeli između prosječnih temperatura zraka gustoće potkornjaka B) te prostorna korelacija s ljetnim temperaturama zraka C).	75
Slika 41. Standardno odstupanje od prosječnih ljetnih maksimalnih temperatura zraka (od svibnja do srpnja) za razdoblje od 1959 – 2023. godine. Crvenom bojom su	

označene godine s većima plavo s manjim temperaturama zraka od prosječnih vrijednosti za promatrano razdoblje	76
Slika 42. Regionalna kronologija (prosjek kronologija svih istraživanih lokaliteta) prirasta temeljnice BAI - Basal Araea Increment (smeđa boja) i standardizirana kronologija prirasta temeljnice BAI s – Basal Araea Increment u kombinaciji sa spline 60 godina A) i linearni trendovi za razdoblje od 1950 - 1977 i od 1977 - 2013. godine sa pripadajućim statističkim pokazateljima B).....	78
Slika 43. Vrijednosti jednostavnog linearног (Pearson) koeficijenta korelaciјe (R) između odabralih klimatskih čimbenika: temperature zraka (TEMP) sume oborina (PREC) i indeksa suše (SPEI) i prirasta temeljnice (BAI i BAI_s) za svaku plohu zasebno za razdoblje od 1954. – 2018. godine	81
Slika 44. Pomične korelacije između kronologija i dominantnog klimatskog čimbenika (ukupne oborine tekuće godine Prec. (JAS) i prosječne temperature zraka Temp (pJAS) u ljetu prethodne godine od mjeseca srpanj do rujna) koristeći klimatske podatke iz baze CRU KNMI	82
Slika 45. A) Korelaciјe (R) kronologija s prvom (PC1) i drugom (PC2) glavnom komponentom prema metodi standardizacije. A) Jednostavni linearni korelacijski koeficijenti između PC1 i sume oborina (Prec.), prosječne temperature zraka (Temp.) i indeksa SPEI za mjesecce od lipnja (jun) prethodne godine do listopada tekuće godine (OCT) kao i za prosječne sezonske vrijednosti od 3 mjeseca.....	84
Slika 46. A) Prostorna korelacija između glavne komponente 1(PC1) dobivene PC analizomi prosječne temperature zraka od srpnja do rujna prethodne godine (jasT) izvor EOBS za razdoblje od 1954 – 2018. godine. B) Pomične korelacije sa dominantnim klimatskim varijablama (suma oborina i prosječnih temperatura zraka od srpnja do rujna prethodne godine) koristeći različite izvore klimatskih podataka.	86
Slika 47. Vremenska dinamika odumiranja sastojina obične smreke iskazana po površini (ha) prema različitim tipovima sastojina obzirom na gospodarenje i upravljanje.	88
Slika 48. Prostorni raspored progala na istraživanom području. Žutom bojom su označene progale u prašumskim sastojinama, crvenom u sekundarnim prašumama i plavom bojom progale u gospodarskim sastojinama.	89
Slika 49. Distribucija broja progala prema površinama (ha) i tipovima sastojina.....	90
Slika 50. Vremenska dinamika odumiranja sastojina obične smreke i brojnost populacije potkornjaka na području sjevernoga Velebita.....	91

Slika 51. Odnos prirasta temeljnice, površina sušenja (ha) i brojnosti populacije potkornjaka na sjevernom Velebitu.....	92
Slika 52. Mala sušenja u prašumskim lokalitetima na Sjevernome Velebitu (Foto: S. Mikac)	93
Slika 53. Dinamika odumiranja smreke prema godinama	94
Slika 54. Distribucija frekvencija odumiranja obične smreke prema nadmorskoj visini A), ekspoziciji terena B) i nagibu terena C) za područje prašume, nekada gospodarskih šuma (sekundarnih prašuma) i gospodarskih šuma na granici s Nacionalnim parkom Sjeverni Velebit	95
Slika 55. Histogram plave boje prikazuje raspodjelu obične smreke na sjevernom Velebitu prema nadmorskoj visini, dok crni histogrami označavaju udio odumrlih sastojina u istim visinskim zonama. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke prikazan je u odnosu na njezinu distribuciju prema nadmorskoj visini (narančasta boja).....	96
Slika 56. Histogram plave boje prikazuje raspodjelu obične smreke na sjevernom Velebitu s obzirom na nagib terena, dok crni histogrami označavaju udjel odumrlih sastojina u istim kategorijama. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke prikazan je u odnosu na njezinu distribuciju prema nagibu terena (narančasta boja).	97
Slika 57. Histogram plave boje prikazuje raspodjelu obične smreke na sjevernom Velebitu s obzirom na ekspoziciju terena, dok crni histogrami označavaju udjel odumrlih sastojina u istim kategorijama. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke prikazan je u odnosu na njezinu distribuciju prema ekspoziciji terena	98
Slika 58. Model vjerojatnosti odumiranja obične smreke u odnosu na nadmorskú visinu A) i položaj odumrlih sastojina (crvene točke) u odnosu na zdrave sastojine (zelene točke) i njihov položaj s obzirom na nadmorskú visinu i nagib terena B)	100
Slika 59. Trendovi odumiranja tijekom promatranog razdoblja od 1985 do danas prema geomorfološkom čimbeniku.	101
Slika 60. Ukupna površina sušenja smreke prema tipovima vegetacije	102
Slika 61. Prostorni položaj progala nastalih sušenjem smreke 2007. godine A). Prikaz detalja s progalamama B). Distribucija površina progala C).	106
Slika 62. Prostorni položaj progala nastalih sušenjem smreke 2011. godine A), Distribucija površina progala B) i C).	107

Slika 63. Prostorni položaj progala nastalih sušenjem smreke 2016. godine A), Distribucija površina progala B) i C).	108
Slika 64. Distribucija broja stabla u primarnoj prašumi Smrčeve doline prema vrstama drveća (bukva A i obična smreka B). Sjenčano područje predstavlja potencijalne generacije stabala prema starosti.....	112
Slika 65. Usپoredba distribucija broja stabala prema starosti obične smreke prema istraživanim lokalitetima.....	113
Slika 66. Ovisnost starosti stabla i prsnog promjera prema lokalitetima istraživanja	114
Slika 67. Distribucija postanka sastojina prema godinama (desetljećima), A – usporedba s primarnom prašumom Smrčeve Doline B – samo istraživane plohe.	115
Slika 68. Odnos prsnih promjera živih i odumrlih stabala A), model vjerojatnosti odumiranja stabala B), distribucija broja odumrlih i živih stabala po debljinskim stupnjevima	117
Slika 69. Prostorni položaj lokaliteta Icinac (Zavižan) s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2007, plavo – 2011) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima.	118
Slika 70. Prostorni položaj lokaliteta Škrbine Drage s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2007, plavo – 2011) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima.	120
Slika 71. Prostorni položaj lokaliteta Mali Lubenovac s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2007, plavo – 2011) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima.	122
Slika 72. Prostorni položaj lokaliteta Krajačev Kuk s prikazom sušenja (plavo – 2011) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima.	124
Slika 73. Prostorni položaj lokaliteta Škrbine Drage-Lubenovačka vrata s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2007, plavo – 2011) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevi.....	126

Slika 74. Prostorni položaj lokaliteta Varnjača s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2007, plavo – 2011, crveno - 2016) A), distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima C).....	128
Slika 75. Prostorni položaj lokaliteta Veliki Lubenovac s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2007, plavo – 2011) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima	130
Slika 76. Prostorni položaj lokaliteta Štirovača s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2007, plavo – 2011) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima.....	132
Slika 77. Prostorni položaj lokaliteta Šegotski Padeži s prikazom početka sušenja (plavo – 2011) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima.	134
Slika 78. Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m ³ /ha) prema debljinskim stupnjevima za lokalitet Katalinac	136
Slika 79. Pojavnost (%) ponika i pomlatka na istraživanim plohamama prema glavnim vrstama drveća. Gdje su: Ponik – biljka starosti 1.godinu, 2 – biljke starosti 2. godine, 3 – biljke starosti 3. godine, Sap.I – biljke starije od 3 godine do 25cm visine, Sap. II – biljke starije od 3 godine od 25 do 50 cm visine.	138
Slika 80. Prosječna gustoća (kom./ha) ponika i pomlatka na istraživanim plohamama prema glavnim vrstama drveća.....	139
Slika 81. Prosječna ukupna gustoća (kom./ha) ponika i pomlatka prema glavnim vrstama drveća i definiranim grupama: biljke od 1 do 3. godine starosti (lijevo) i i biljke više od 3. godine starosti do 50 cm visine	140
Slika 82. Relativni odnos ukupnog broja ponika i pomlatka (kom./ha) glavnih vrsta drveća obzirom na tretmane: kontrola, sušenje i sanacija. A – ukupno za sve uzraste, , B – prema broju biljaka od 1 do 3. godine starosti i C – ukupno sapl i sapll.	141
Slika 83. Gustoća pomlatka >50cm (kom./ha) prema tretmanima i vrstama drveća	143
Slika 84. Gustoća pomlatka (kom./ha) prema tretmanima i vrstama drveća po visinskim kategorijama.....	146
Slika 85. Gustoća pomlatka (kom./ha) prema tretmanima i vrstama drveća po visinskim kategorijama.....	148

Slika 86. Shematski prikaz postupaka direktne sanacije sastojina obične smreke	151
Slika 87. Izgled sastojine nakon sušenja smreke (nema podrasta drugih vrsta)	154
Slika 88. Izgled sastojine nakon sušenja smreke s razvijenim podrastom obične bukve	155
Slika 89. Izgled sastojine nakon sušenja smreke s razvijenim podrastom obične bukve i jele.....	157

Popis tablica

Tablica 1. Iskaz površina,drvne zalihe i prirasta sastojina obične smreke u Republici Hrvatskoj (izvor: ŠGO 2016-2025).....	14
Tablica 2. Popis istraživanih lokaliteta.....	40
Tablica 3. Značajke površinskog sloja tla u smrekovim zajednicama na Velebitu. Prikazane su vrijednosti aritmetičke sredine i standardne devijacije.	51
Tablica 4. Godine s najvećom vrijednosti ljetnih temperatura zraka (MJJ) na području sjevernoga Velebita.....	77
Tablica 5. Osnovni statistički podaci o varijabilnosti kronologija za dva promatrana razdoblja.....	79
Tablica 6. Deskriptivni podaci o površinama (ha) progala prema načinu gospodarenja za razdoblje od 1985 do 2023. godine.....	90
Tablica 7. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na njezinu distribuciju prema nadmorskoj visini.....	97
Tablica 8. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na nagib terena.....	98
Tablica 9. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na ekspoziciju terena.....	99
Tablica 10. Ukupna površina sušenja smreke prema tipovima vegetacije i godinama	103
Tablica 11. Osnovna deskriptivna statistika o površinama zahvaćenim sušenjem na razini sastojina od 2005 – 2016. godine prema tipovima šumskih zajednica, Gdje su: ALTI - Altimontansko-subalpinska šuma smreke s obrubljenim gladcem, DIN – Dinarska bukovo-jelova šuma s mišnjim uhom, DIN_VAP – Dinarska šuma jele s milavom na vapnenačkim blokovima, GOR – Gorska šuma smreke sa šumskim pavlovcem, PRET – Pretpianinska šuma bukve s planinskim žabnjakom, SUBALP – Subalpinska smrekova šuma s alpskom pljuskavicicom.....	104
Tablica 12. Osnovan deskriptivna statistika o površini sušenja na razini sastojina (odjela) zahvaćenih sušenjem u razdoblju od 2005 – 2016. godine prema glavnim tipovima šumskih zajednica, Gdje su: ALTI - Altimontansko-subalpinska šuma smreke s obrubljenim gladcem DIN – Dinarska bukovo-jelova šuma s mišnjim uhom, DIN_VAP – Dinarska šuma jele s milavom na vapnenačkim blokovima, GOR – Gorska šuma smreke sa šumskim pavlovcem, PRET – Pretpianinska šuma bukve s	

planinskim žabnjakom, SUBALP – Subalpinska smrekova šuma s alpskom pljuskavicicom	105
Tablica 13. Osnovna deskriptivna statistika o broju i površini progala za 3 promatrana razdoblja (2007, 2011, 2016)	108
Tablica 14. Distribucija broja stabala obične smreke na istraživanim lokalitetima sušenja i prašumi Smrčeve doline	111
Tablica 15. Osnovni deskriptivni podaci o prsnim promjerima odumrlih i živih stabala	116
Tablica 16. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	119
Tablica 17. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	121
Tablica 18. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	123
Tablica 19. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	125
Tablica 20. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	127
Tablica 21. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	129
Tablica 22. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	131
Tablica 23. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	133
Tablica 24. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	135
Tablica 25. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m ² /ha)- temeljnica, V (m ³ /ha)	136
Tablica 26. Prosječna gustoća (kom./ha) ponika i pomlatka na istraživanim plohama prema glavnim vrstama drveća	139
Tablica 27. Relativni odnos ukupnog borja ponika i pomlataka (do 50cm visine) (kom./ha) glavnih vrsta drveća s obzirom na tretmane: kontrola sušenje i sanacija	142
Tablica 28. Gustoća pomlatka (kom./ha) prema tretmanima i vrstama drveća po visinskim kategorijama.....	148

Tablica 29. Radovi sanacije sastojina (odnose samo na kategorije od S1 i S3 prema shemi za sanaciju)	153
Tablica 30. Radovi sanacije sastojina (odnose samo na kategorije S4 i S5 prema shemi za sanaciju)	154
Tablica 31. Radovi sanacije sastojina (odnose samo na kategorije S4 i S5 prema shemi za sanaciju)	156
Tablica 32. Radovi sanacije sastojina (odnose samo na kategorije S4 i S5 prema shemi za sanaciju)	158

1. UVOD

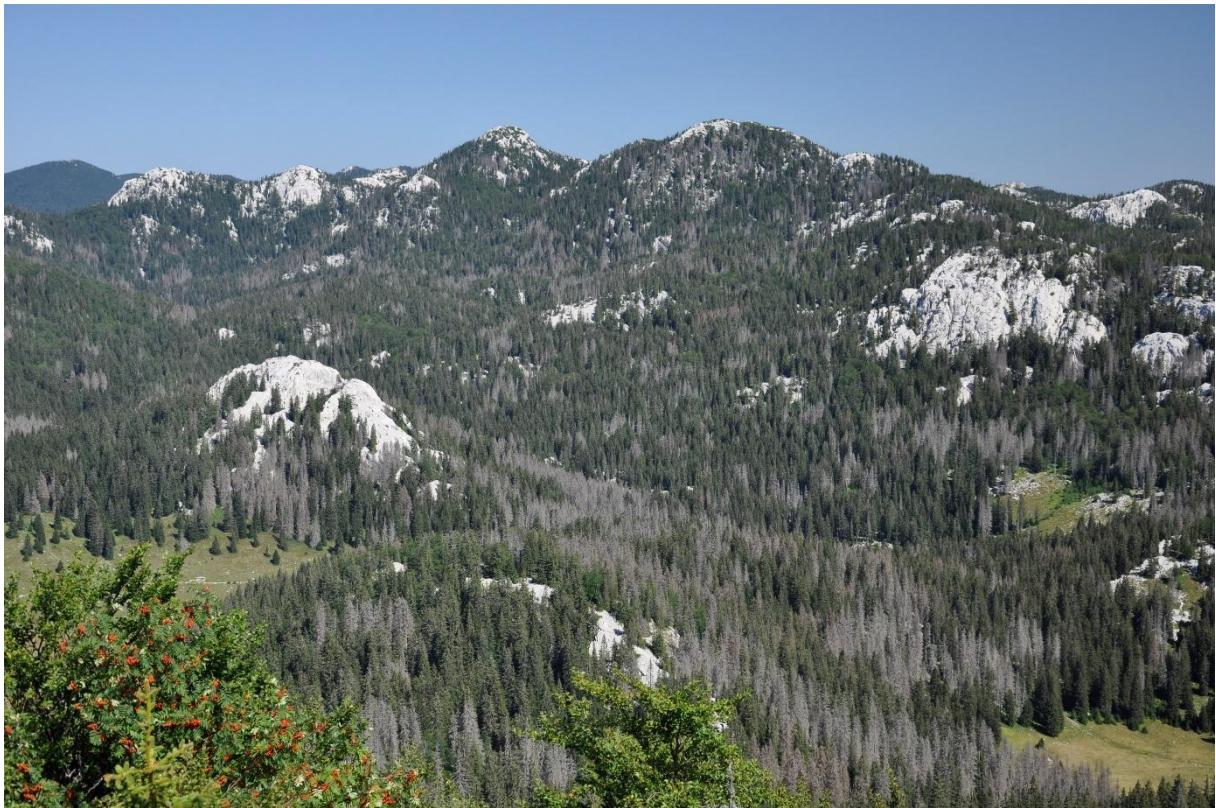
Prirodne nepogode, poput vjetroizvala, vjetroloma, požara i napada štetnih insekata, predstavljaju ključne čimbenike koji mijenjaju brzinu i smjer prirodne dinamike šumskih ekosustava. One značajno utječu na strukturu šuma i sastav vrsta (Foster i Motzkin, 1998; Pickett i White, 1985; Svoboda i dr., 2012). Tijekom 20. stoljeća, prirodni šumski ekosustavi umjerene zone Europe smatrani su izrazito stabilnima, s karakterističnim mozaikom različitih razvojnih stadija (Remmert, 2012; Svoboda i dr., 2012). Međutim, u posljednjim desetljećima, sve češće i intenzivnije prirodne nepogode kao posljedica globalnih promjena dovode šumske ekosustave na granicu stabilnosti, narušavajući njihovu prirodnu dinamiku, strukturu i otpornost.

Najnovije izvješće Međuvladinog panela o klimatskim promjenama (*IPCC AR6*, 2023) ukazuje da se prosječna globalna temperatura zraka u razdoblju od 2011.–2020. povećala za približno $1,1^{\circ}\text{C}$ u odnosu na predindustrijsko razdoblje 1850.–1900. Buduća predviđanja ukazuju kako će globalno zatopljenje dosegnuti ili premašiti $1,5^{\circ}\text{C}$ u prosjeku tijekom sljedećih 20 godina, čak i u optimističnim scenarijima s niskim emisijama stakleničkih plinova. Tako povećane temperature zraka, čak i bez značajnih promjena u količini oborina, dovode do pojave sušnog stresa, koji negativno utječe na rast stabala i smanjuje njihovu vitalnost i otpornost (Allen i dr., 2010; Altman i dr., 2017; Zang i dr., 2014) što je posebno izraženo kod vrsta s plitkim korijenskim sustavom kao što je obična smreka (Honkaniemi i dr., 2020; Pretzsch i dr., 2013; Zang i dr., 2014).

Mnogobrojna istraživanja sugeriraju da će klimatske promjene značajno ugroziti populacije vrsta drveća koje se nalaze na geografskim rubovima svojeg prirodnog rasprostranjenja, budući da su prilagođene hladnijim i vlažnijim uvjetima. Ekstremni toplinski valovi i dugotrajne suše mogli bi značajno utjecati na njihovu otpornost i demografske procese (prirodnu obnovu) (S. Bennett i dr., 2015; Carnicer i dr., 2021; Vilà-Cabrera i Jump, 2019). Stoga će stabilnost i opstanak takvih populacija uvelike ovisiti sposobnosti prilagodbe promjenjivim stanišnim uvjetima a gospodarenje će se morati prilagoditi novim modelima koje moraju pratiti ekološke zahtjeve vrsta i dinamiku okolišnih promjena.

Premda je jedna od najrasprostranjenijih europskih vrsta drveća, obična smreka (*Picea abies* (L.) H. Karst.) ujedno je i jedna od najugroženijih. Kao tipična planinska vrsta kojoj dobro podnosi niske temperature zraka, mrazeve i vlažnu klimu s puno oborina očekivati je da će topliji uvjeti kao posljedica klimatskih promjena pogodovati njenom rastu. Takvi slučajevi pozitivnog učinka porasta temperatura zraka na rast stabla smreke i drugih crnogoričnih vrsta su zabilježeni u Europi (Martinez del Castillo i dr., 2024) ali takvi obrasci nisu prostorno ujednačeni nego su isključivo povezani s geografskim klimatskim gradijentima. Najveći porast rasta predviđa se na području sjevera Europe (Skandinavija), gdje projekcije ukazuju na povećanje od 50% u razdoblju 2071.–2100. godine prirasta dok u mediteranskom dijelu Europe se očekuje značajno smanjenje rasta za oko 25% kao posljedica viših temperatura. Unatoč ovim trendovima čak i u slučaju pozitivnog rasta kao na primjeru Skandinavije klimatske promijene i dalje predstavljaju ozbiljnu prijetnju i ugrozu, ponajviše jer su direktno odgovorne za više od 60% prirodnih nepogoda kao što su suše, olujni vjetrovi, ekstremne vremenske prilike, povećanje populacije štetnih insekata i dr. (Carrer i dr., 2012; Patacca i dr., 2023; Seidl i dr., 2016).

Znanstvene spoznaje koje se odnose na razumijevanje otpornosti te svih mogućih scenarija dinamike razvoja šuma pružaju važnu podlogu kako bi se razvili novi ili modificirali postojeći modeli gospodarenja šuma posebice u pogledu prirodnih obnova šuma ali i sanacija površina nakon katastrofalnih prirodnih nepogoda. Rezultati takvih istraživanja mogu i trebaju doprinijeti razvoju inovativnih šumskouzgojnih modela kao i praksi uzbajanja šuma temeljenih na prirodi bliskim principima, čime se osigurava dugoročna stabilnost, otpornost i održivost ovih vrijednih ekosustava naročito u vremenima koja su pred nama.



Slika 1. Sušenje smrekovih sastojina na području Velikog i Malog Lubenovca (Foto: B. Hrašovec)

2. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA

2.1. Ekološke osobine obične smreke

2.1.1. Rasprostranjenost

Okolišni čimbenici (klima, tlo i reljef) imaju značajnu ulogu u prirodnoj rasprostranjenosti vrsta. Dosadašnje klimatske fluktuacije imale su značajan utjecaj na distribuciju i raznolikost flore i faune (Hewitt 2004). Tijekom posljednjeg glacijalnog maksimum (prije ~ 20000 godina) veći dio sjeverne Europe bio je prekriven ledenim pokrovom (Clark i dr., 2009), dok su južni dijelovi Europe bila područja permafrosta (G. Hewitt, 2000). Mnoge su vrste mogle preživjeti samo na južnoeuropskim poluotocima (K. D. Bennett i dr., 1991; G. Hewitt, 2000). Osobito važna refugijalna područja bila su područja Apenina i Alpa, Pirinejski poluotok i zapadni dio Balkanskog poluotoka (K. D. Bennett i dr., 1991; G. M. Hewitt, 2004).

Obična smreka preživjela je posljednji glacijalni maksimum u refugijima koji se nalaze u Europi i na području Ruske ravnice (G. M. Hewitt, 2004). Kada gledamo čimbenike koji ograničavaju širenje i distribuciju ove vrste, temperatura vjerojatno nije bila glavni i jedini čimbenik (Ravazzi, 2002). Poznavajući ekološke zahtjeve obične smreke dostupnost vode (odnosno suša) je bitan čimbenik zbog kojeg se smreka povukla u refugijalna područja (Ravazzi, 2002). Na jugu europskog areala obična smreka zauzima planinske predjele, što znači da je topografija reljefa igrala važnu ulogu u postglacijskom širenju populacija (Latałowa i van der Knaap, 2006). Srednja Europa je primarno rekolonizirana iz refugija smještenih u jugoistočnim Alpama i zapadnom dijelu sjevernih Karpati, dok populacije koje su preživjele u južnim Karpatima i Apeninima nisu uspjele kolonizirati veća područja, vjerojatno zbog topografije terena (Ravazzi, 2002; Tollefsrud i dr., 2008). Cijeli sjeverni areal obične smreke kolonizirao je iz jednog refugija, smještenog na području Ruske zaravni (Tollefsrud i dr., 2008).

Današnji areal obične smreke (*Picea abies* (L.) Karst.) prirodno se proteže od arktičkog kruga na sjeveru do jugozapada i zapadnog područja Alpi, Karpati i Balkanskog poluotoka, te na krajnji sjever Grčke (Mitchell, A.F., 1974). S obzirom da je poznata kao vrlo plastična vrsta koja se može prilagoditi različitim uvjetima za rast te zbog vrlo

dobrog uspjeha sadnje i razmnožavanja te brzog rasta smreka se unazad 200 godina intenzivno sadila unutar i izvan svog prirodnog rasprostiranja.

U Hrvatskoj obična smreka zauzima površinu od 16,246 ha odnosno oko 0,6 % površine šuma. Ukupna drvna zaliha iznosi oko 3 milijuna m³ (*Šumskogospodarska osnova 2016. - 2025.*). Smreka prirodno pridolazi u subalpinskom vegetacijskom pojasu na nadmorskim visinama od 1200 – 1600 m gdje tvori čiste sastojine. Osim toga pojavljuje se u manjem udjelu do 5% u pojasu bukovo-jelovih šuma kao prateća vrsta (Matić, 2011). Na području sjevernoga Velebita areal smreke je disjunktan na površini od 2200 ha unutar vegetacijske zone pretplaninskih bukovih šuma (Vukelić, J., 2005) gdje je njezin pridolazak uvjetovan specifičnim orografskim formama krškog reljefa (vrtače, mrazišta, udoline, ponikve i sl.) koje modificiraju makroklimatske prilike.



Slika 2. Prirodne smrekove šume na sjevernom Velebitu (gore); Gospodarske smrekove šume u Austriji (obnova čistim sječama, dolje) (Foto: M. Orešković)

2.1.2. Ekološki zahtjevi obične smreke

Tijekom posljednjih stoljeća, širenje areala smreke izvan svojih prirodnih granica bilo je potpomognuto ljudskim djelovanjem. U 19. i 20. stoljeću obična smreka je unesena u nizinska područja gdje dolazi čista ili u smjesi s drugim vrstama drveća (Modrzyński, 2007).

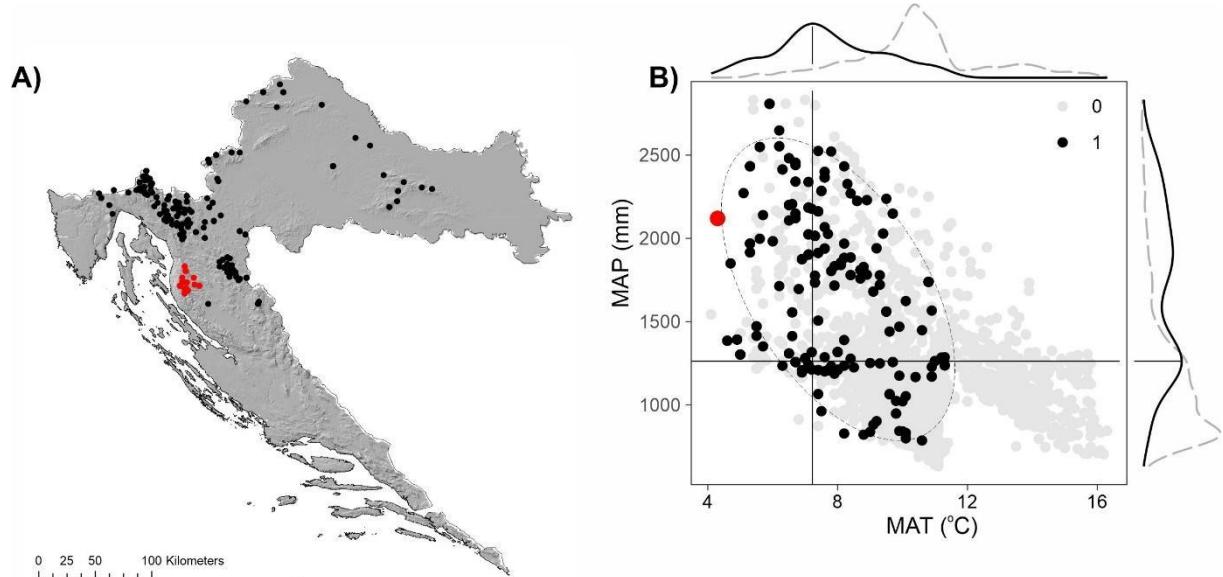
Kada govorimo o ekološkom optimumu mislimo na određene kombinacije okolišnih varijabli koje su optimalne za preživljavanje, rast i razvoj te reprodukciju vrsta (Verbitskii i Verbitskaya, 2007). Za svaku varijablu u okolišu postoje donje i gornje granice, ispod i iznad kojih vrste ne mogu preživjeti. Ove granice čine raspon tolerancije vrsta odnosno ekološku nišu. Kako se vrste približavaju svojim granicama tolerancije, suočavaju se s pojačanim fiziološkim stresom (Huggett, 2004). Kada govorimo o ekološkom optimumu obične smreke možemo reći kako općenito preferira hladne i vlažne uvjete te plodna tla (Honkaniemi i dr., 2020). Zahtjevi obične smreke za temperaturom su relativno niski. To je vidljivo iz prirodnog areala smreke koji seže daleko na sjever dok se na južnom dijelu rasprostiranja javlja samo na visokim nadmorskim visinama (Modrzyński, 2007)). Smreka pokazuje izrazitu prilagodljivost na različite klimatske uvjete unutar svog rasprostranjenja. Na sjevernim dijelovima areala raste na područjima s vegetacijskom sezonom od približno 60 dana s prosječnim temperaturama iznad 10°C , dok se na južnim dijelovima vegetacijska sezona proteže do 150 dana pri istoj temperaturnoj granici (Modrzyński, 2007; Schmidt-Vogt, 1977). U srednjoj Europi sastojine obične smreke rastu unutar raspona prosječnih godišnjih temperatura od -4 do $+4^{\circ}\text{C}$ (Zarzycki, 1984).

Obična smreka podnosi maksimalne temperature i do $+46^{\circ}\text{C}$, ali također podnosi ekstremno niske temperature, sve do -60°C (Schmidt-Vogt, 1977). Njeni zahtjevi za vlagom su također visoki, pri čemu minimalne potrebe za oborinama variraju ovisno o godišnjim temperaturama. Tako, u najhladnijim dijelovima areala može opstati s oko 450 mm oborina godišnje (Ravazzi, 2002), dok u srednjim područjima rasprostranjenja zahtijeva oko 800 mm (D'Andrea i dr., 2023). Na području Dinarida smreka se rasprostire unutar zone planinske klime, koju karakteriziraju niske temperature i visoka količina oborina, u nekim područjima dosežući i do 3.000 mm godišnje (Prelovsek i dr., 2010).

Osim ukupne količine oborina, važan je i njihov raspored tijekom vegetacijske sezone. Prema Lyru i dr. ma (1999), oborine tijekom vegetacije trebale bi iznositi najmanje 300 mm. Obična smreka koristi oborine kao glavni izvor vode zbog svoje relativno plitke dubine zakorjenjivanja i velikog broja finih korijenovih dlačica, koje su prilagođene efikasnom korištenju površinske vlage (Tjoelker i dr. 2007; Modrzynski). Obična smreka pokazuje široku amplitudu zahtjeva za svjetlom. U ranoj fazi razvoja pokazuje skiofilne karakteristike, osobito na plodnjim staništima gdje uspijeva konkurrirati bukvi i jeli (Oršanić i dr. 2001). Tolerancija obične smreke na zasjenu smanjuje se s godinama i padom kvalitete staništa. Na višim nadmorskim visinama i staništima nižeg boniteta, smreka je u mladosti skiofit, dok u kasnijim fazama razvoja zahtjeva više svjetla za optimalan rast (Oršanić i dr. 2001; Tjoelker i dr. 2007; Modrzynski).

U Hrvatskoj, obična smreka najčešće raste na hladnjim i vlažnjim mjestima, poput vrtača, udolina i mrazišta. U takvim reljefno uvjetovanim klimatskim inverzijama smreka nadoknađuje manjak vlage i oborina, koji su često deficitarni na dinarskom kršu.

Što se tiče makroklimatskih prilika za područje Hrvatske obuhvaća područje s rasponom temperatura zraka od 4 do 12 °C te širokim rasponom oborina od 1000 mm pa sve do preko 2500 mm godišnje (Slika 3).



Slika 3. Prostorni položaj nalazišta obične smreke u RH (*Picea abies Karst.*) i crvenom bojom položaj istraživanih sastojina A). Odnos između prosječne temperature zraka MAT (°C) i ukupne količine oborina MAP (mm) za plohe na kojima se pojavljuje smreka (crne točke) gdje crvena točka predstavlja istraživane sastojine u odnosu na plohe gdje nema smreke (sive točke) B)

Kod obične smreke najvažniji čimbenici koji negativno utječu na rast i razvoj su suše, oštećenja od snijega, smanjena duljina vegetacijske sezone i konkurenca s drugim vrstama (Modrzyński, 2007).

Odumiranje stabala uzrokovano sušom rezultat je interakcije nekoliko međusobno povezanih mehanizama. Obična smreka je poznata kao relativno izohidrična vrsta, odnosno vrsta koja u sušnim uvjetima ima djelotvornu regulaciju gubitka vode putem zatvaranja pući, koja omogućava održavanje vodnog potencijala iznad praga kavitacije (Lyr i dr., 1999). Ovakav način prilagodbe može značajno smanjiti asimiliaciju ugljika, te u ekstremnim slučajevima (npr. blaga i produžena sušna razdoblja) dovesti do negativnog balansa ugljika u biljci (McDowell i dr., 2008), što dovodi do situacije da se stabla moraju oslanjati na rezerve ugljika radi održavanja metaboličkih procesa (Tomasella i dr., 2017). S druge strane sušni stres može rezultirati značajnim oštećenjem hidrauličkog sustava biljke pojmom zračne embolije u ksilemu (Choat i dr., 2019). Rezerve ugljika koje se nalaze u bjeljici sudjeluju u održavanju i obnavljanju transportnog kapaciteta ksilema, omogućavajući dopunu vode u zrakom ispunjeni ksilem (Bucci i dr., 2003; Secchi i Zwieniecki, 2012).

Smanjenje radijalnog prirasta stabla također je jedan od načina prilagodbe na sušni stres, gdje stabla smanjuju radijalni prirast zbog potrošnje ugljika kako bi održala osnovne metaboličke procese kao što su respiracija i održavanje osmotskog tlaka (Hartmann i dr., 2013)). Neka istraživanja pokazuju na potpuni prestanak radijalnog prirasta stabla tijekom vegetacijskog perioda, što ukazuje ili na jaki nedostatak ugljika namijenjenog za rast ili na alokaciju ugljika radi održavanja metaboličkih procesa (Maunoury-Danger i dr., 2010).

2.2. Gospodarenje smrekom u Europi

Prirodne čiste sastojine obične smreke su prilično rijetke u Europi i nalaze se uglavnom u višim planinskim područjima. Međutim umjetno podignute čiste smrekove sastojine su uobičajene u mnogim regijama Europe. U šumarskoj praksi razvijeno je nekoliko sustava gospodarenja čistim smrekovim kao i mješovitim sastojinama smreke, bukve i jele. Obična smreka je vrsta drveta s lakin sjemenom koja se može vrlo dobro prirodno obnavljati regularnim načinom gospodarenja. Prema Szymańskom, (2007) regularni način gospodarenja, odnosno način obnove pod zastorom krošanja starih matičnih stabala najbolji je način obnove smrekovih šuma koje se nalaze u zaštićenim planinskim dolinama i vrtačama ili na područjima bez jakih vjetrova. Ovakav način gospodarenja ponekad uključuje pripremni sijek kako bi se stvorili odgovarajući uvjeti na tlu te omogućilo uspješno klijanje sjemena. Alternativno, kasna proreda može odigrati ulogu pripremnog sijeka te pripremiti sastojinu i tlo za prirodnu obnovu. U tom slučaju, pripremni sijek nije potreban i obnova se nastavlja u godini punog uroda naplodnim sijekom gdje se otvaranjem krošanja matične sastojine uspostavljaju povoljni uvjeti za rast ponika i pomlatka tijekom sljedeće 2-3 godine. Nakon uspješne prirodne obnove dovršnim sijekom uklanjuju se preostala stabla matične sastojine kako ne bi smetala razvoju mlade sastojine. U proljeće ne pomlađeni dijelovi sastojine mogu se popuniti drugim heliofilnim vrstama u manjim ili većim skupinama.



Slika 4. Oplodne sječe pod zastorom krošanja matičnih stabala na malim površinama
(Foto: M.Orešković).

Još jedan način uzgajanja smrekovih šuma su bavarske nejednolične oplodne sječe (bavarski *femelschlag*). Ovaj sustav je kombinacija oplodnih sječa na malim površinama u obliku krugova i rubne sječe. Ovakav način obnove često se primjenjuje u mješovitim sastojinama smreke, bukve i jele s ciljem povećanja postotka vrijednog smrekovog drva. Prema Aniću, (2009) metoda pomlađivanja sastojina karakterizira se time što početne pomladne jezgre nisu raspoređene po cijeloj površini, kao što je slučaj kod klasičnih oplodnih sječa na krugove čiji je cilj formiranje jednodobne sastojine. Umjesto toga, sastojina je podijeljena u radna polja širine od 60 do 70 metara. U okviru jednog radnog polja, pomlađivanje započinje i završava istodobno, primjenom naplodnog, eventualno naknadnog, te završava dovršnim sijekom. Nakon što se pomladak osamostali, pomladne jezgre se proširuju rubnom sječom, bilo centrično ili ekscentrično. Specijalno pomladno razdoblje traje od 10 do 20 godina. Nakon dovršetka pomlađivanja jezgri prvog radnog polja, ili istodobno s njihovim proširenjem, započinje pomlađivanje drugog radnog polja. Taj proces se nastavlja sve dok cijela

sastojina ne bude pomlađena. Opće pomladno razdoblje traje od 30 do 40 godina, što u konačnici rezultira raznodbnom sastojinom.



Slika 5. Grupimična oplodna sječa - bavarski femelschlag (Visoke Tatre, Slovačka)
(Foto: M. Saniga)

Optimalna metoda za prirodnu obnovu smreke je Wagnerova rubna sječa na kulise. Ovaj način uzgajanja temelji se na najpovoljnijim ekološkim uvjetima za prirodnu obnovu smreke duž sjevernog ruba sastojine. Ova metoda se temelji na rubnim sjećama s postupno smanjenim intenzitetom unutar sastojine. Pomlađivanje započinje s ruba sastojine odnosno od prve pruge svakog sjekoreda i nastavlja se unutar sastojine nakon pojave prirodnog pomlatka jele, bukve i smreke. To je supstitucijska kombinacija oplodnih sjeća na malim površinama u obliku pruga s rubnom sjećom. Ovaj način daje najbolje rezultate u obnovi čistih sastojina obične smreke i smrekovih sastojina s primjesama jele, bukve i bora.



Slika 6. Wagnerova rubna sječa na kulise u Austriji (foto: M. Orešković)

Prema Oršaniću, (2001) način gospodarenja, a time i obnova sastojina, od presudne je važnosti za opstojnost smrekovih šuma. Na području sjevernog Velebita uglavnom se provodi stablimična preborna sječa uglavnom bez uzgojnih radova njege. Takvim načinom gospodarenja često se pozitivni prirodni pomaci u sastojinama sputavaju te se procesi prirodne dinamike vraćaju na početak. Prirodni pomladak često se nalazi u nepovoljnem socijalnom položaju, što dovodi do njegova gubitka (odumiranja) ili smanjenja kvalitete (zastarčenost). Prema istom autoru oplodne sječe na malim površinama u obliku krugova (grupimično skupinasta) gdje stanišne prilike to dozvoljavaju, uz redovite radove njege jedini je ispravan način obnove i uzbajanja smrekovih šuma.

Tablica 1. Iskaz površina, drvne zalihe i prirasta sastojina obične smreke u Republici Hrvatskoj (izvor: ŠGO 2016-2025)

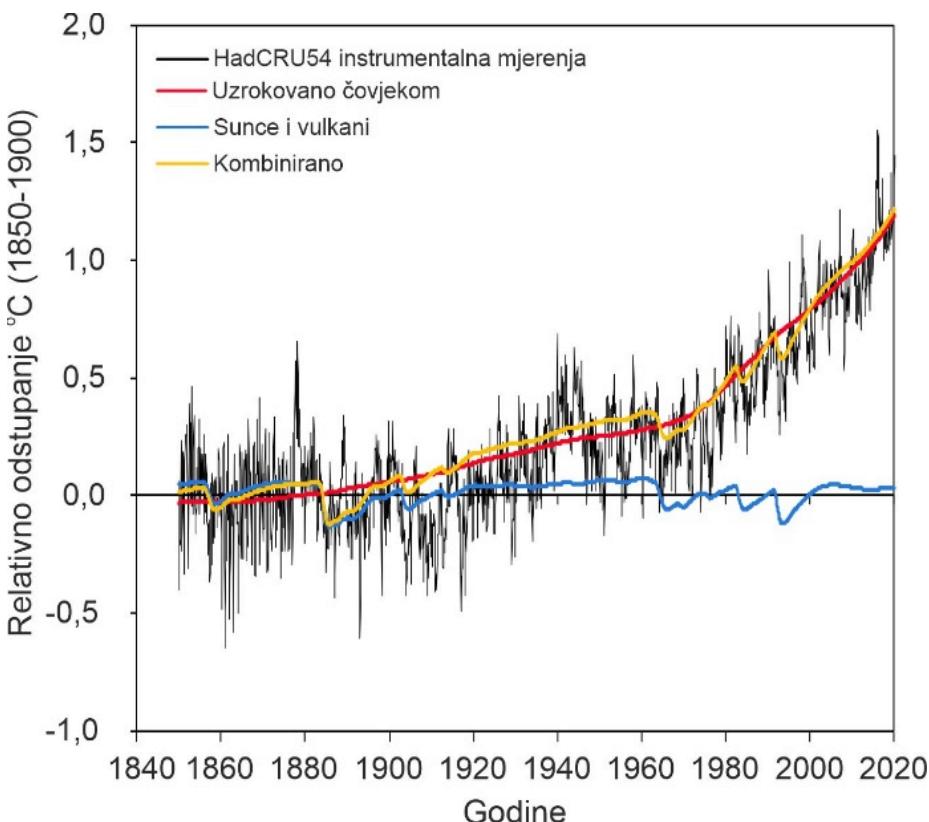
Kategorije	Državne šume								
	Sjemenjača smreke			Kultura smreke			Sjemenjača smreke i jele		
	Površina ha	Drvna zaliha m3	Prirost m3	Površina ha	Drvna zaliha m3	Prirost m3	Površina ha	Drvna zaliha m3	Prirost m3
Gospodarske šume	1166.4	281415.0	7357.0	9211.6	1585508.0	61187.0	3343.4	1288027.0	23566.0
Šume posebne namjene	3037.0	777458.0	15998.0	1252.3	291032.0	10593.0	1259.1	609059.0	11832.0
Zaštitne šume	26.3	3061.0	128.0	260.5	50404.0	1740.0	187.4	59826.0	1331.0
Ukupno državne	4229.7	1061934.0	23483.0	10724.4	1926944.0	73520.0	4789.8	1956912.0	36729.0
Privatne Šume									
Kategorije	Sjemenjača smreke			Kultura smreke			Sjemenjača smreke i jele		
	Površina ha	Drvna zaliha m3	Prirost m3	Površina ha	Drvna zaliha m3	Prirost m3	Površina ha	Drvna zaliha m3	Prirost m3
	1016.5	223838.0	7102.0	257.7	54075.0	1711.0	-	-	-
Šume posebne namjene	-	-	-	18.0	4136.0	109.0	-	-	-
Zaštitne šume	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ukupno privatne	1016.5	223838.0	7102.0	275.7	58211.0	1820.0	-	-	-
Ukupno (Državne + Privatne)	5246.3	1285772.0	30585.0	11000.1	1985155.0	75340.0	4789.8	1956912.0	36729.0

2.3. Ugroze i prijetnje

2.3.1. Klimatske promjene – abiotski čimbenici

Klimatske promjene predstavljaju značajan izazov za održivost šuma obične smreke (Carrer i dr., 2012; Seidl i dr., 2017). Promjene u temperaturi, obrascima oborina i učestalosti ekstremnih vremenskih događaja utječu na vitalnost, produkciju i otpornost ovih šuma (Altman i dr., 2017; Patacca i dr., 2023; Zang i dr., 2014).

Brzina i intenzitet klimatskih promjena znatno nadmašuju sposobnost šumskih ekosustava da se prilagode tim promjenama u kratkom vremenskom razdoblju (Lindner i dr., 2010). Za dugovječne organizme, poput stabala i šuma, ubrzana dinamika klimatskih promjena znači da će u posljednjoj fazi svog životnog ciklusa doživjeti klimatske uvjete koji se značajno razlikuju od onih pod kojima su se razvijali.. Takav scenarij sve veće neprilagođenosti šuma na promjene vjerojatno će negativno utjecati na osiguravanje širokog spektra usluga koje ovi vrijedni ekosustavi pružaju te će u konačnici dovesti do brojnih nepovoljnih ekoloških i ekonomskih posljedica za cijelo gospodarstvo i društvo u cjelini. Kada govorimo o utjecaju klimatskih promjena na šumske ekosustave oni mogu biti direktni i indirektni (CIFOR, 2020). Utjecaj klimatskih promjena na šumske ekosustave možemo podijeliti u dvije skupine. Prva skupina obuhvaća spore promjene uzrokovane konstantnim porastom temperature zraka, povećanjem suše te povećanom koncentracijom CO₂ u odnosu na predindustrijsko razdoblje i nazivamo ih indirektni utjecaji. Druga skupina obuhvaća neočekivane i nepredvidive ekstremne klimatske događaje (elementarne nepogode) kao što su: poplave, suše, orkanski vjetrovi, oluje, ledolomi, snjegolomi, požari i sl. koji nanose direktne ekološke (promjene biološke raznolikosti, usluga ekosustava i dr.) i materijalne štete.



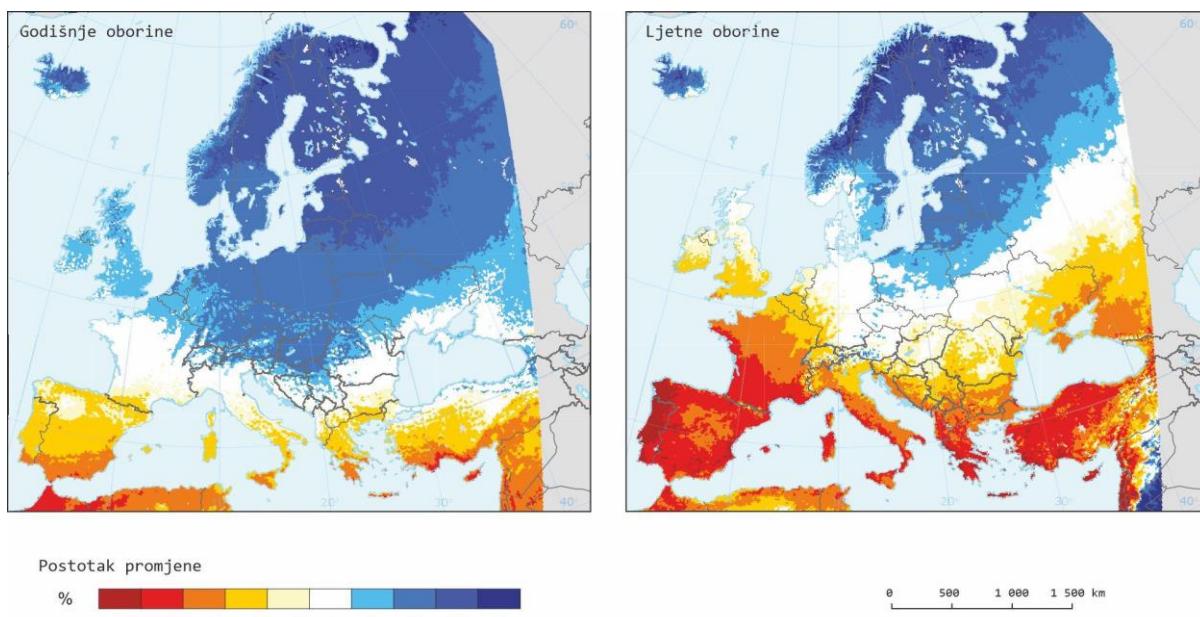
Slika 7. Indeks globalnog zatopljenja (GWI) od 1850. do 2020. godine. Antropogeni doprinos globalnom zagrijavanju prikazan crvenom bojom. Prirodni doprinos (sunce i vulkani) u plavoj boji. Žuta linija prikazuje kombiniranu (ukupnu) promjenu temperature.

Utjecaj klimatskih promjena na šumske ekosustave posebno je izražen kod vrsta koje su osjetljive na promjene temperature i dostupnost vode (Lindner i dr., 2010). Obična smreka spada među vrste čiji rast i vitalnost snažno ovise o klimatskim uvjetima, što je čini posebno osjetljivom na promjene u režimu oborina i temperature te sušne periode (Lévesque i dr., 2013). Veliki broj istraživanja klimatske osjetljivosti obične smreke provedeno je u centralnoj i zapadnoj Europi. Tako Savva i dr., (2006) ukazuju na pozitivan odnos prirasta stabala obične smreke i srednje mjesecne temperature u ožujku i travnju, te lipnju i srpnju tekuće godine, dok sa povećanjem nadmorske visine međuzavisnost prirasta i proljetne temperature (ožujak-travanj) opada, a korelacija ljetnih temperatura (lipanj-srpanj) pozitivno raste. Na nižim nadmorskim visinama rast smreke je limitiran visokim temperaturama u vegetacijskoj sezoni dok na višim nadmorskim visinama pozitivno reagira na toplije uvijete (Altman i dr., 2017; Hartl-Meier i dr., 2014; Lévesque i dr., 2013).

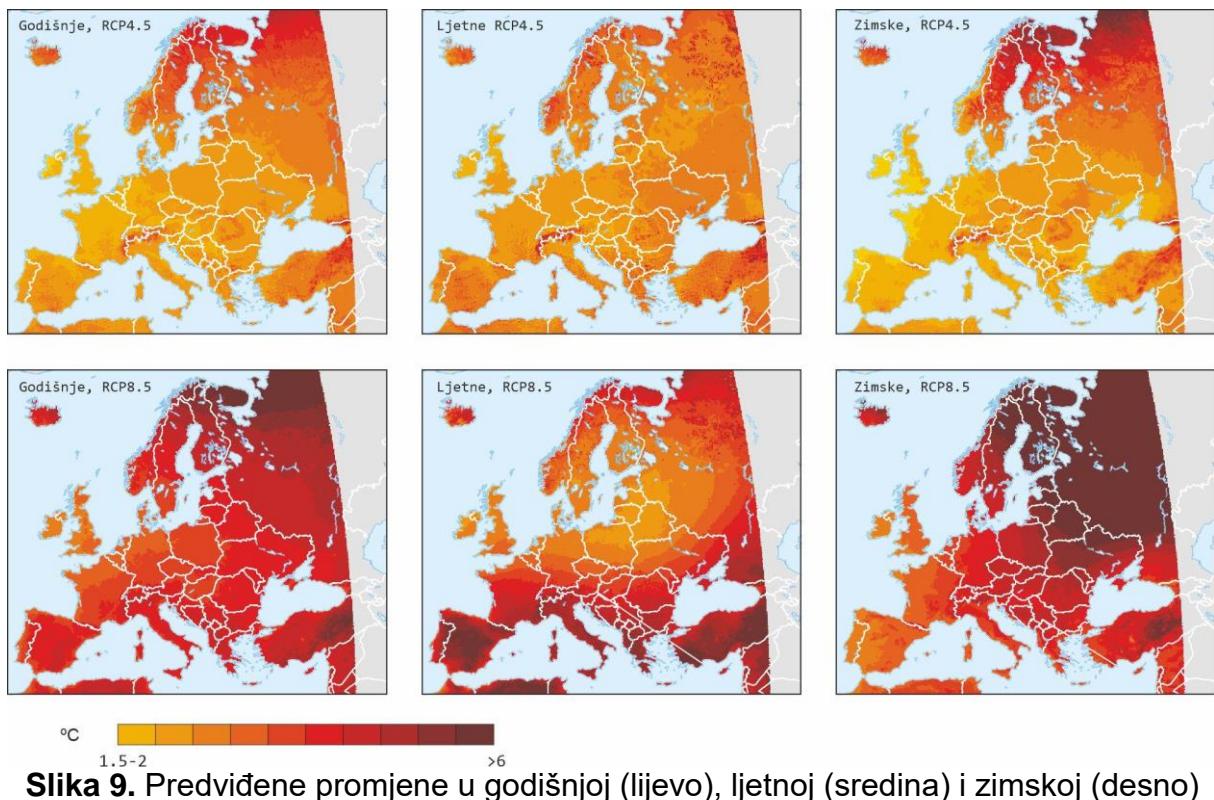
Dosadašnja malobrojna istraživanja klimatske osjetljivosti obične smreke na području Dinarida ukazuju na jasan negativan utjecaj ljetnih temperatura te pozitivan utjecaj

oborina i vlage, što ukazuje da je rast smrekovih sastojina na ovom području limitiran dostupnosti vlage (Begović i dr., 2020; Orešković i dr., 2024). Sve ovo ukazuje na to kako ove promjene mogu uzrokovati velike štete te ozbiljno ugroziti stabilnost šumskih ekosustava (Patacca i dr., 2023). Ključni izazovi u gospodarenju smrekovim šumama su prilagodba sve većim pritiscima, primjenjujući strategije usmjerene na povećanje njihove otpornosti i prilagodljivosti, očuvanje bioraznolikosti te osiguravanje usluga koje ovi ekosustavi pružaju (Pach i dr., 2022).

Šume imaju značajnu ulogu u ublažavanju klimatskih promjena, a njihova otpornost na klimatske promjene može se poboljšati primjenom ciljanih šumskouzgojnih mjera (Pach i dr., 2022). Ove mjere predstavljaju snažan alat za prilagodbu i otpornost šumskih ekosustava, omogućujući njihovu veću funkcionalnost i stabilnost u uvjetima sve dinamičnijeg okoliša



Slika 8. Projicirane promjene godišnjih (lijevo) i ljetnih (desno) oborina (%) u razdoblju 2071.-2100. u usporedbi s osnovnim razdobljem 1971.-2000. za scenarij forsiranja RCP 8.5. Simulacije modela temelje se na prosjeku ansambla više modela RCM simulacija iz inicijative EURO-CORDEX (izvor: EEA, prema Jacob i dr., 2014)



Slika 9. Predviđene promjene u godišnjoj (lijevo), ljetnoj (sredina) i zimskoj (desno) temperaturi zraka blizu površine ($^{\circ}\text{C}$) u razdoblju 2071.-2100., u usporedbi s osnovnim razdobljem 1971.-2000. za scenarije forsiranja RCP 4.5 (gore) i RCP 8.5 (dolje). Simulacije modela temelje se na prosjeku ansambla više modela RCM simulacija iz inicijative EURO-CORDEX.

2.3.2. Štetni insekti– biotski čimbenici

Potkornjaci predstavljaju raznoliku skupinu vrsta prisutnih na gotovo svim vrstama drveća. S ekološke strane gledišta, potkornjaci imaju ključnu ulogu u funkcioniranju šumskih ekosustava. Njihova aktivnost inicira i ubrzava procese razgradnje drva, stvarajući povoljne mikrouvjete za druge organizme. Osim toga, njihov utjecaj na ciklus dušika i povećanje bioraznolikosti doprinosi stabilnosti i otpornosti šumskih ekosustava (Kasumović, 2015). S druge strane, s gospodarskog stajališta, potkornjaci su među najznačajnijim šumskim štetnicima naročito ako govorimo o vrstama potkornjaka koji pri visokim populacijama uspijevaju masovno napadati, oštećivati i ubijati zdrava stabla (Biedermann i dr., 2019; Raffa i dr., 2008).

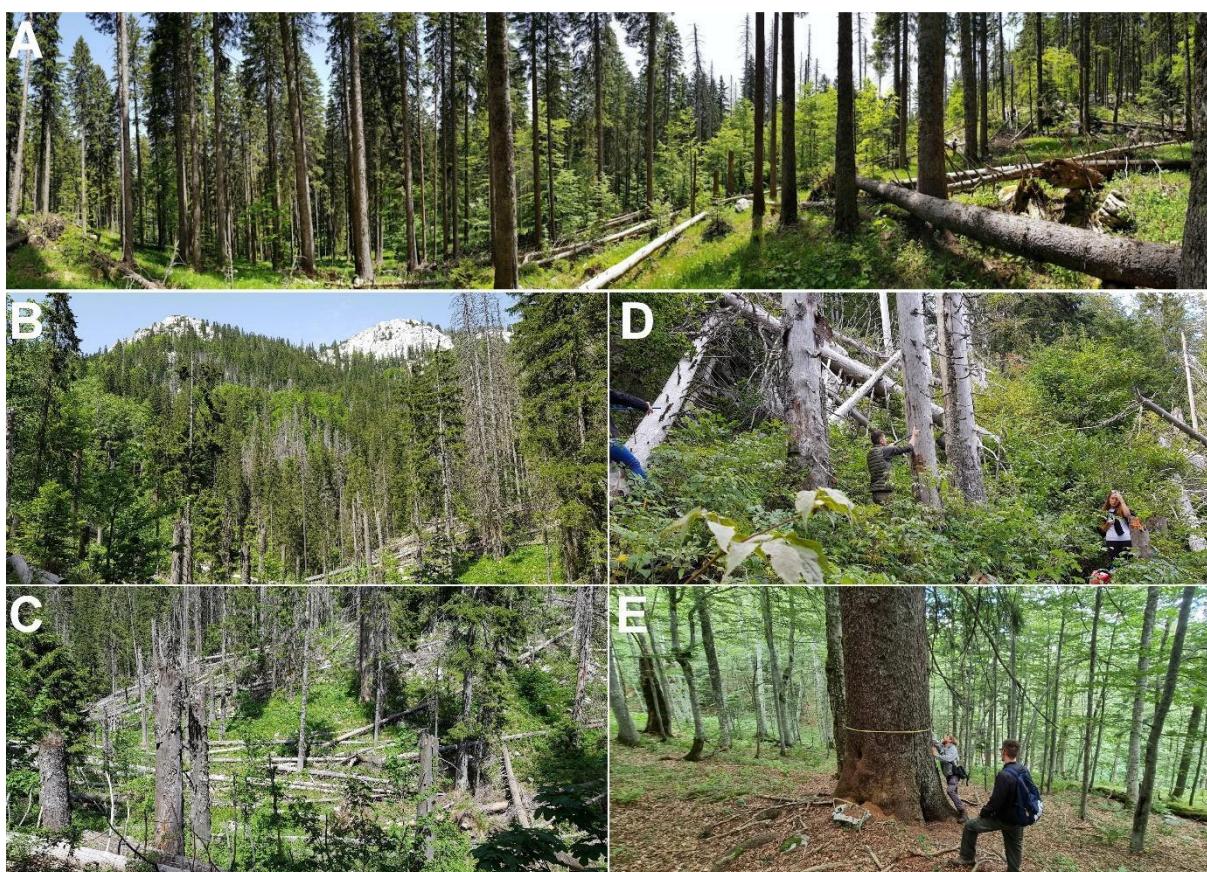
Odrasli potkornjaci pronalaze i ulaze u pogodna stabla, gdje polažu jaja ispod kore. Ličinke se hrane i razvijaju u floemu, a zrele jedinke izlaze u potrazi za novim domaćinima. Uspješna infestacija često dovodi do smrti stabla jer veliki broj potkornjaka uništava floem, prekidajući transport hranjivih tvari (Hlásny i dr., 2021). Osim toga, potkornjaci unose fitopatogene gljive koje narušavaju obrambeni kemizam stabla i ometaju transport vode u ksilemu (Kausrud i dr., 2012).

Među evropskim vrstama potkornjaka, smrekov potkornjak (*Ips typographus* L.) ističe se kao glavni uzročnik masovnog odumiranja smrekovih stabala. Njegov areal rasprostranjen je diljem Euroazije i uvelike se podudara s arealom obične smreke, njegovog glavnog domaćina. Smrekov potkornjak pokazuje visoku fenološku plastičnost, prilagođavajući broj generacija godišnje lokalnim klimatskim uvjetima, što mu omogućuje da u toplijim regijama ima i više generacija godišnje (Baier i dr., 2007; Bentz i dr., 2019). Izbijanja populacija smrekovog potkornjaka često započinju nakon velikih poremećaja poput vjetroizvala, koje stvaraju obilje pogodnog materijala za razmnožavanje. Ove progradacije dodatno pogoršavaju suho i vruće vrijeme, koje smanjuje otpornost stabala na napade (Hlásny i dr., 2021).

Napadi potkornjaka pojavljuju se epizodno i izmjenjuju između razdoblja niske gustoće populacije („endemična faza“) i razdoblja visoke gustoće populacije („epidemijska faza“). Tijekom endemične faze, populacije su ograničene otpornošću stabala, strukturom šuma, klimatskim uvjetima, konkurencijom i prirodnim neprijateljima (Biedermann i dr., 2019). Međutim, veliki poremećaji, poput oluja, suša ili toplinskih

valova, mogu izazvati prijelaz u epidemiju fazu obilježenu masovnim napadima na zdrava stabla i brzim porastom populacije (Marini i dr., 2017; Mezei i dr., 2017).

Obična smreka razvila je niz obrambenih mehanizama koji uključuju kemijske, anatomske i fiziološke strategije poput stvaranje nekrotičnih lezija oko mesta napada potkornjaka, proizvodnja terpena i drugih toksičnih spojeva te izlučivanje smole, što zajedno čini učinkovitu barijeru protiv zaraze (Celedon i Bohlmann, 2019). Međutim, pri niskim gustoćama populacije potkornjaci obično ciljaju oslabljena, prelomljena ili na drugi način stresom pogodjena stabla, čija je sposobnost obrane značajno smanjena. Takva stabla, zbog narušene fiziološke ravnoteže, pružaju povoljnije uvjete za kolonizaciju i razmnožavanje potkornjaka.



Slika 10. Površine zahvaćene odumiranjem smreke zbog djelovanja potkornjaka na području sjevernoga Velebita (Foto: S. Mikac).

Dakle, pojava potkornjaka nije primarni uzrok odumiranja smreke već je to posljedica drugih stresora koji smanjuju obrambenu sposobnost stabala. Velike površine čistih, zrelih smrekovih sastojina, zajedno sa sinkroniziranim ekstremnim vremenskim događajima – osobito ekstremnim sušama zadnjih desetljeća (2003, 2012, 2018) (Ionita i Viorica, 2021) vjetroizvalama omogućila je gradaciju smrekovog potkornjaka

te velike štete na smrekovim sastojinama na području cijele Europe pa tako i na području sjevernoga Velebita.

Klimatske promjene povećavaju učestalost masovnih pojava potkornjaka. Projekcije za budućnost ukazuju na to da će napadi smrekovog potkornjaka vjerojatno rasti u opsegu i ozbiljnosti zbog klimatskih promjena (Mezei i dr., 2017). Porast temperatura zraka i sve češća i duža sušna razdoblja ubrzavaju razvoj potkornjaka, slabe obranu stabala i omogućuju potkornjacima kolonizaciju novih područja.

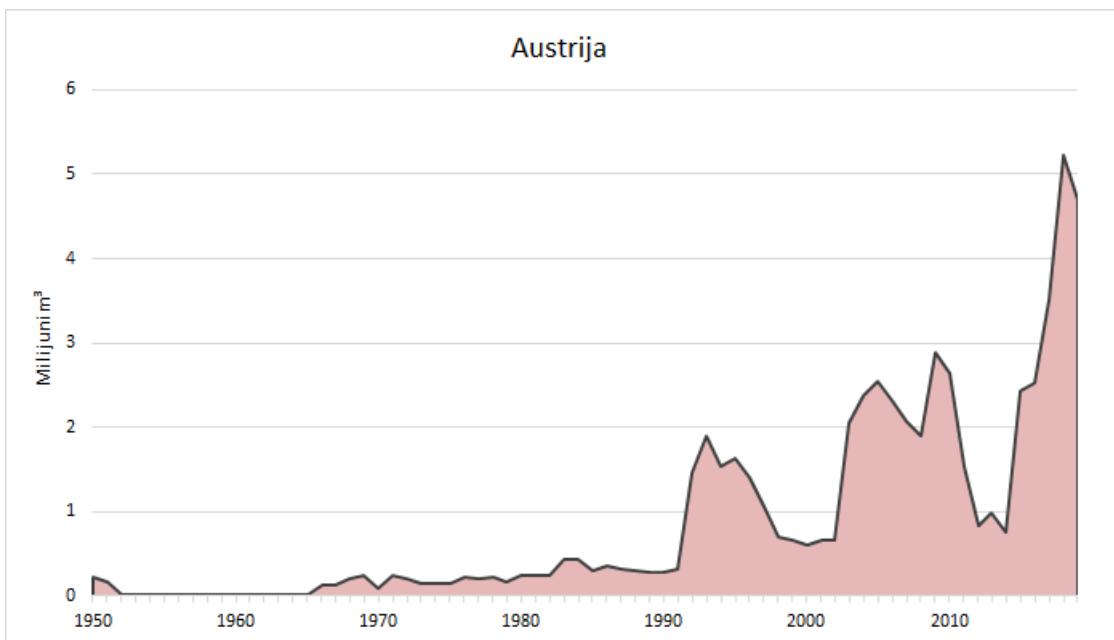
2.4. Trenutno stanje smrekovih šuma u Europi

Smrekove šume jedan su od najvažnijih šumskih ekosustava u Europi, no posljednjih desetljeća suočene su s ubrzanim degradacijskim procesima uzrokovanim klimatskim promjenama, biotskim faktorima i širenjem izvan prirodnog areala pod utjecajem čovjeka. Ovo poglavlje pruža pregled aktualnog stanja smrekovih šuma u europskim zemljama, s posebnim naglaskom na štete.

2.4.1. Austrija

Šume u Austriji prostiru se na približno 4 milijuna hektara, što čini 48% ukupne površine zemlje (Jandl, 2020). Šumski ekosustavi kategorizirani su na „proizvodne šume,“ u kojima je proizvodnja kvalitetnih drvnih sortimenata primarni cilj gospodarenja, i „zaštitne šume“. Iako udio čistih smrekovih šuma u Austriji kontinuirano opada od 1980-ih godina, one i dalje dominiraju, čineći oko 50% ukupne površine proizvodnih šuma (Jandl, 2020). Obična smreka je često sađena na staništima gdje su uvjeti omogućavali njen rast. Posljedica tih aktivnosti je postojanje približno 355.000 hektara (15% ukupnih smrekovih šuma) koje pripadaju kategoriji tzv. „sekundarnih smrekovih šuma“ (Gschwantner i dr., 2010). Dendrokronološka istraživanja ukazuju na dugogodišnji trend opadanja prirasta smrekovih šuma u Gornjoj i Donjoj Austriji, što se povezuje s promjenama klimatskih uvjeta. Klimatske analize pokazuju da smreke u sjevernoj Austriji sve češće pate od sušnog stresa (Nothdurft i Engel, 2020). Tijekom posljednjih 30 godina porast temperature u Austriji doveo je do povećanja stope evapotranspiracije za približno 70 mm (Blöschl i dr., 2018).

Uz klimatske promjene, značajnu ulogu u smanjenju stabilnosti smrekovih šuma imaju i nepovoljne strukturne karakteristike ovih ekosustava, poput prevelike gustoće i starosti stabala, koje su rezultat loših odluka u gospodarenju šumama (Seidl i dr., 2016). Dodatno, istraživanja dinamike populacije smrekova potkornjaka (*Ips typographus*) predviđaju sve češće i intenzivnije masovne napade ovih štetnika, što predstavlja ozbiljan izazov za očuvanje stabilnosti smrekovih šuma (Biedermann i dr., 2019).



Slika 11. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Austriji od 1950. godine

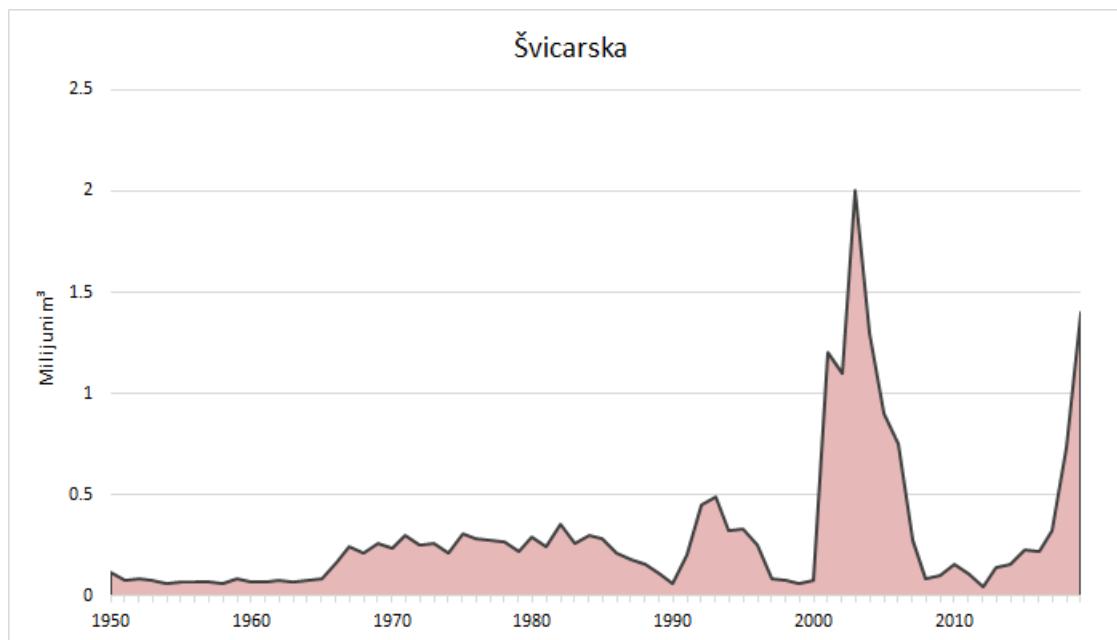
2.4.2. Švicarska

Obična smreka (*Picea abies*) najraširenija je vrsta drveća u Švicarskoj, čineći 43,2% ukupne drvne zalihe ($\sim 171,6 \pm 0,4$ milijuna m^3) (Abegg i dr., 2014; Guidotti, 2020). Prirodno je rasprostranjena u sjevernim dijelovima Alpa, dok je u nizinske krajeve unesena krajem 17. i početkom 18. stoljeća lako njezin udio opada, obična smreka i dalje je gospodarski najvažnija vrsta drveća u Švicarskoj (Tresch i dr., 2023).

Glavni uzroci smanjenja udjela smreke su sve masovniji napadi potkornjaka, koji su dodatno potaknuti sušnim stresom, te zagađenje zraka, poput ozona i taloženja dušika (Christiansen i Horntvedt, 1983; Eatough Jones i dr., 2011). Od 1900. godine u južnim Švicarskim Alpama zabilježen je značajan porast temperature od $0,1^\circ\text{C}$ do $0,2^\circ\text{C}$ po desetljeću, dok se od 1961. godine taj trend intenzivirao, sa značajnim porastom temperature do $0,5^\circ\text{C}$ po desetljeću tijekom ljeta i proljeća (Guidotti, 2020). Ove klimatske promjene, uz promjenu elevacijske fenologije smrekovih potkornjaka, vjerojatno će dovesti do češćih i intenzivnijih izbijanja (Jakoby i dr., 2019).

Istraživanja temeljena na dinamičkim modelima šumskih ekosustava ukazuju da odumiranje obične smreke uzrokovano sušom neće biti adekvatno kompenzirano drugim vrstama drveća (Guidotti, 2020). Očekuje se da će smanjenje površine

smrekovih šuma postupno omogućiti širenje manje konkurentnih i gospodarski manje vrijednih vrsta drveća poput mediteranskih hrastova (*CH2014-Impacts*).



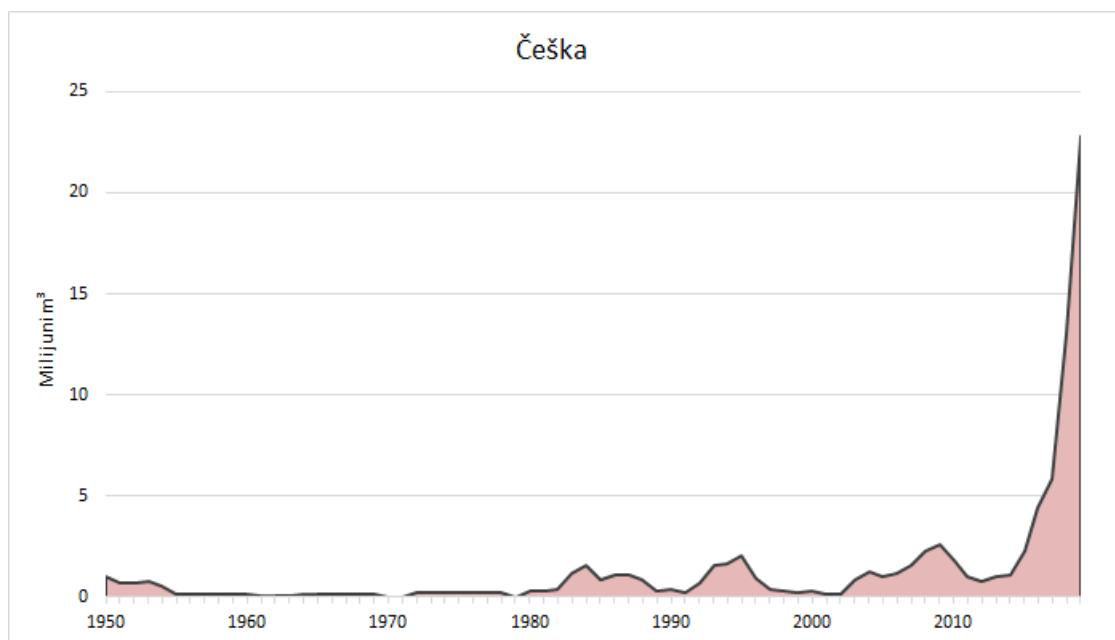
Slika 12. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Švicarskoj od 1950. godine

2.4.3. Češka

Šume pokrivaju oko 2,7 milijuna hektara ili 33,1% površine Republike Češke (Ministerie van Landbouw, 2020). Oko 74% ukupne površine šuma su gospodarske šume, dok ostatak čine zaštitne šume (2%) i šume posebne namjene (24%). Prema sastavu dominiraju četinjače (71%), od kojih je najzastupljenija i socioekonomski najznačajnija vrsta obična smreka koja pokriva 50% površine i zauzima više od 1,3 milijuna hektara. Budući da prirodni udio smreke u sastavu vrsta čeških šuma iznosi samo oko 11% (Mansfeld, 2011), jasno je da se smreka često sadila daleko izvan granica svog prirodnog areala.

Ljetne suše u Europi od 2015. imale su razoran učinak na sastojine obične smreke (Čermák i dr., 2021). Republika Češka jedna je od europskih zemalja najteže pogodjenih napadom potkornjaka, što je rezultat visokog udjela obične smreke, ekstremnih suša i toplih klimatskih uvjeta. Količina drvne mase posjećena sanitarnim

sijekom nakon napada potkornjaka iznosila je više od 41 milijun m³ u Češkoj tijekom razdoblja od 2017. do 2019. godine, dok je 2020. narasla na 26,2 milijuna m³ (Čermák i dr., 2021). Prema istim autorima samo 16,1% sastojina s više od 30% smreke rasti će u klimatski pogodnim uvjetima (uvjetima koji omogućuju relativno sigurno uzgajanje) u Češkoj do 2040. godine.

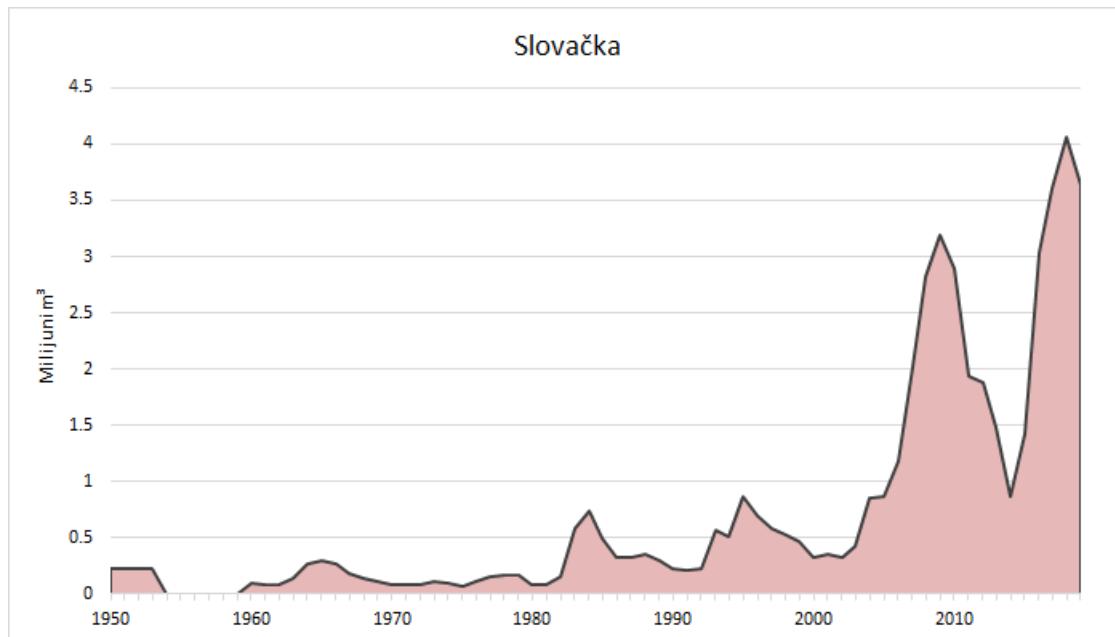


Slika 13. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Češkoj od 1950. godine

2.4.4. Slovačka

Šume u Slovačkoj pokrivaju 41% teritorija, što odgovara površini od 20.128 km², a dominantne vrste drveća su bukva (34,2%), obična smreka (22,1%) i hrastovi (10,5%) (Potterf i dr., 2023). Šume obične smreke u Slovačkoj su kroz posljednja tri desetljeća pretrpjeli značajna oštećenja, prvenstveno uslijed vjetroloma i masovnih napada smrekovog potkornjaka (Nikolov i dr., 2014; Økland i dr., 2016) što je dovelo do velike količine drvne mase posjećene sanitarnim sjekom (Kunca i dr., 2019). Iz tih razloga, udio smrekovih šuma u Slovačkoj smanjen je s 26% u 1970. na trenutnih 22,1% (Potterf i dr., 2023). Prvobitno, obična smreka rasla je na 4,9% šumskog zemljišta, uglavnom na višim nadmorskim visinama (>900 m n.v.). Ostatak površine prekriven je

smrekovim šumama koje su zasađene izvan prirodnog areala smreke tijekom 19. i 20. stoljeća. Posljedice nepogoda odražavaju se u visokom postotku sanitarnih sječa koje su činile čak 84% ukupne sječe šuma obične smreke u razdoblju od 2005. do 2017. godine (Kunca i dr., 2019).



Slika 14. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Slovačkoj od 1950. godine

2.4.5. Slovenija

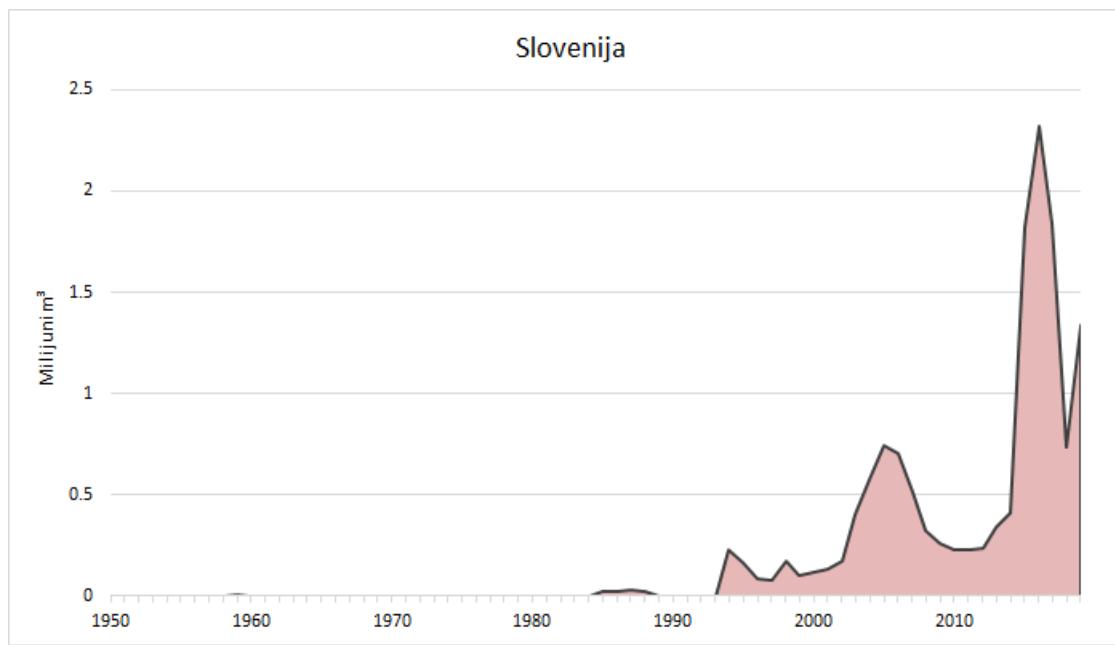
Sloveniju karakterizira visoka šumovitost, s obzirom na to da šume prekrivaju 58 % njezine površine. Većina šuma nalazi se u zoni bukovih, bukovo-jelovih i bukovo-hrastovih šuma.

U drvnoj zalihi prevladavaju bukva (32,9 %) i smreka (30,1 %), dok ostale vrste imaju manji udio: jela (7,4 %), hrastovi (7,1 %), borovi (5,4 %), ostale vrste tvrdog drva (8,5 %) te plemenite bjelogorice (5,4 %). Ukupno, listopadne vrste čine 56 % drvne zalihe, dok četinjače zauzimaju preostalih 44 %. Sastav vrsta značajno varira među regijama: bukva dominira u Dinarskoj regiji i istočnoj Sloveniji, dok su četinjače, osobito smreka, najzastupljenije u sjevernim planinskim područjima i na visokim visoravnima (Pohorje, Julisce i Kamniško-Savinjske Alpe, Pokljuka, Jelovica, Mežakla) (Zavod za Gozdove, 2023). Prirodne sastojine obične smreke (*Picea abies* L. Karst.) uglavnom su ograničene na alpski prostor na sjeveru zemlje, dok su u znatno manjoj mjeri prisutne

u hladnim dolinama i krškim depresijama dinarskog područja na jugu (Kutnar i dr., 2021). Tijekom proteklih stoljeća kao u većem dijelu Europe smreka je intenzivno pošumljavana izvan svog prirodnog areala, prvenstveno zbog visoke ekološke prilagodljivosti, relativno niskih troškova uzgoja te značajne gospodarske vrijednosti drveta (Kermavnar i dr., 2023).

Tijekom posljednjeg desetljeća slovenske šume bile su izložene značajnim degradacijskim procesima, uglavnom uzrokovanim ekstremnim vremenskim događajima. Prema Zavodu za gozdove Slovenije, (2014.) godine katastrofalna ledena oluja oštetila je više od polovice slovenskih šuma, pri čemu je stradalo više od 9 milijuna m³drvne mase. Krajem 2017. snažan vjetrolom prouzročio je dodatnu štetu, s gubitkom od približno 3 milijuna m³. Nadalje, tijekom izrazito vrućeg i sušnog ljeta 2022. godine, u Sloveniji je zabilježen najveći šumski požar u povijesti, pri čemu je u krškom području izgorjelo 2.900 hektara šuma.

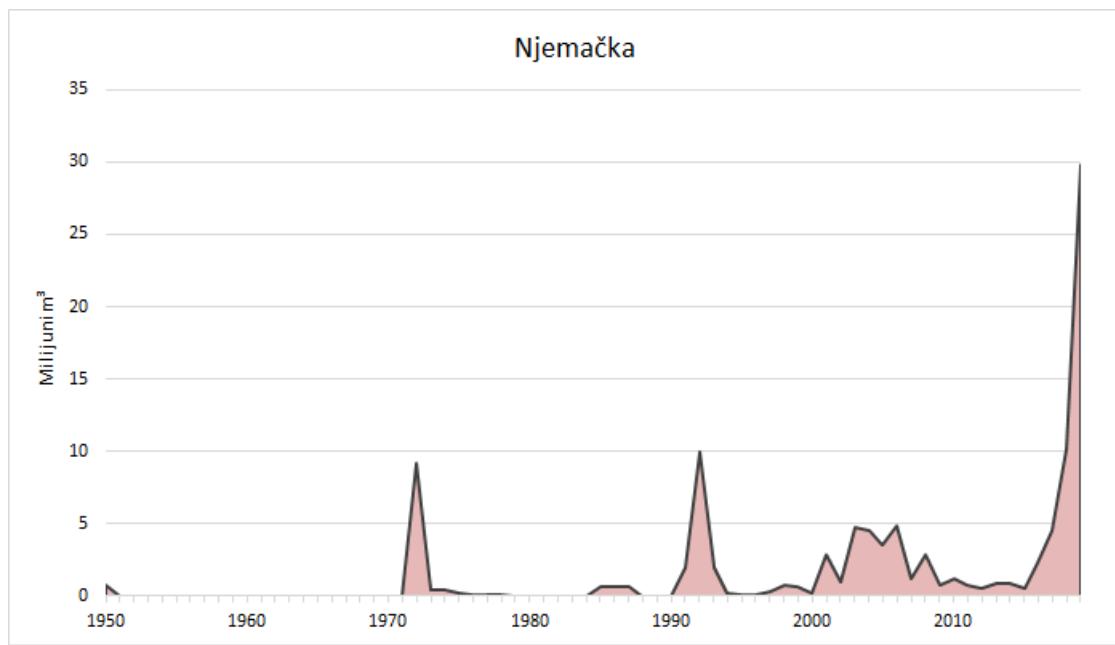
Pored vremenskih ekstrema, slovenske šume suočavaju se s ozbiljnim biotskim ugrozama, prvenstveno napadima potkornjaka. Nakon ledene oluje 2014. godine, tijekom sljedeće tri godine (2015.–2017.) zbog progradacije potkornjaka posjećeno je 7 milijuna m³drvne mase. Slično tome, nakon vjetroloma 2017. godine, tijekom 2018. i 2019. sječa zbog potkornjaka premašila je 2 milijuna m³. Tijekom 2023. godine zabilježena je sječa od 755.576 m³, pri čemu je najveći udio otpadao na običnu smreku (96,7 %). U razdoblju od 2014. do 2023. godine prirodne katastrofe i napadi potkornjaka bili su odgovorni za sječu ukupno 24 milijuna m³drvne mase, što čini 46 % ukupne drvne mase posjećene u Sloveniji u tom razdoblju.



Slika 15. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Sloveniji od 1950. godine

2.4.6. Njemačka

Najčešće vrste u njemačkim šumama su obični bor (22 %), smreka (21 %), bukva (17 %) i hrast (12 %). Površina šuma u kojima dominiraju listopadne vrste povećala se za 7 % u odnosu na posljednju inventuru šuma iz 2012. godine, što se može pripisati provedbi uzgojnih mjera koje su usmjerene na promjenu sastojinskog oblika čistih monokultura obične smreke, s ciljem povećanja njihove otpornosti na klimatske promjene (*Thünen: The German National Forest Inventory*,). Obična smreka prirodno se javlja u montanskim i subalpskim područjima, no od 18. stoljeća intenzivno je zasađena i u nizinama (Seim i dr., 2022). Ta su područja, na kojima smreka raste izvan svog prirodnog areala, najviše pogodjena olujama, sušama i posljedičnim masovnim razmnožavanjem potkornjaka od 2018. godine. U usporedbi s Nacionalnom inventurom šuma iz 2012. godine, površine pod smrekom smanjile su se za 460.000 hektara, te sada smreka pokriva 2,3 milijuna hektara, odnosno 20,9 % ukupne šumske površine. Također, drvna zaliha smreke smanjila se za 190 milijuna kubičnih metara (*Thünen: Forest damage due to drought and heat*).

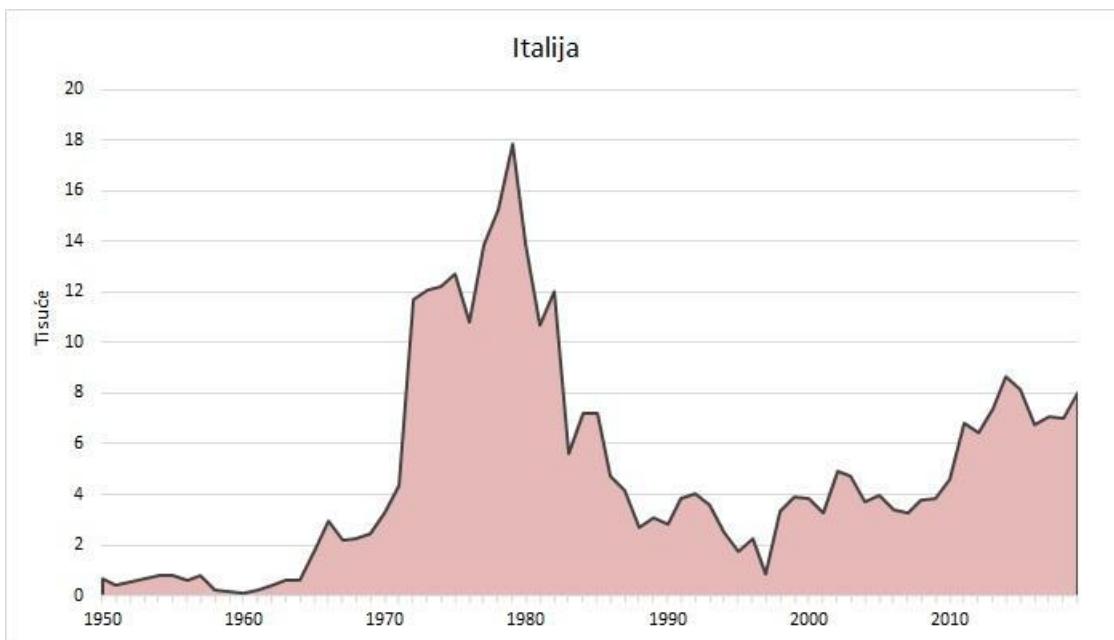


Slika 16. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Njemačkoj od 1950. godine

2.4.7. Italija

Obična smreka jedna je od najvažnijih vrsta u Italiji, posebno u Alpama, gdje pokriva površinu od 586.700 hektara (Gasparini i dr., 2022). Najveće površine nalaze se upravo u Alpskom području, dok je u Apeninima prisutna samo lokalno. Većina smrekovih šuma (76,8 %) ima jednodobnu strukturu, dok su stare šume rijetke. Ukupna drvna zaliha smreke iznosi 388,7 milijuna m³, a godišnji prirast iznosi 37,8 milijuna m³, što smreku svrstava među najproduktivnije šumske vrste u zemlji (Gasparini i dr., 2022).

Međutim, smreka je vrlo osjetljiva na klimatske promjene, osobito na porast temperatura i sušni stres (Carrer i dr., 2012). Najveću prijetnju predstavljaju napadi smrekovog potkornjaka (*Ips typographus*), koji se širi u oslabljenim sastojinama, te ekstremni vremenski događaji poput oluje Vaia 2018. godine, koja je uništila preko 8 milijuna m³ (Carrer i dr., 2012; Gasparini i dr., 2022).



Slika 17. Količina drvne zalihe oštećena napadom potkornjaka u Italiji od 1950. godine

2.4.8. Hrvatska

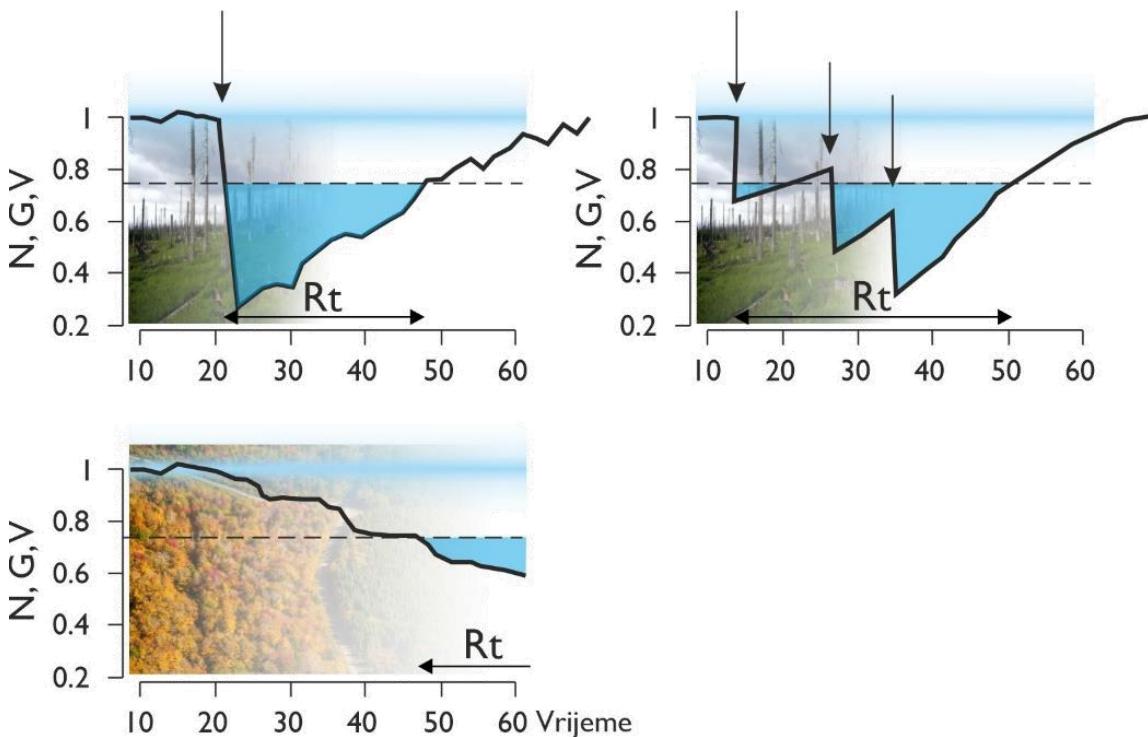
Prema Šumsko gospodarskoj osnovi područja Republike Hrvatske (2016.-2025.) čiste smrekove sastojine zauzimaju površinu od 16 246 ha, sa drvnom zalihom od 3 270 927 m³ te godišnjim prirastom od 105 925 m³ drva. Od toga čiste prirodne smrekove šume zauzimaju oko 32% površine dok 68% otpada na smrekove kulture. Najveći i najcjelovitiji kompleksi prirodnih smrekovih sastojina u Hrvatskoj rasprostiru u subalpinskom vegetacijskom pojasu na nadmorskim visinama od 1100 do 1600 m uglavnom na području Gorskog kotara i Velebita. U posljednjih 20 godina samo na šumskim ekosustavima u Republici Hrvatskoj štete koje su nastale kao izravna ili neizravna posljedica klimatskih promjena višestruko nadmašuju sve zabilježene štete u posljednjem stoljeću. Analizom posjećene količine drvne mase koja je nastala kao posljedica štetnog djelovanja potkornjaka od 2001. do 2021. godine ukupno je evidentirano oko 1.600.000 m³ štete kao izravna posljedica klimatskih promjena diljem Hrvatske što iznosi oko 30% ukupne drvne zalihe ove vrste u nas (Mikac i dr., 2023).

2.5. Sanacija i prirodna obnova sastojina nakon prirodnih nepogoda

Prirodne nepogode najčešće se promatraju kroz iznos (količinu) štete koje uzrokuju, no njihova dinamika je složena, a ekosustavi su im se prilagodili tijekom evolucije. Otpornost šuma na prirodne nepogode može se definirati kao sposobnost šumskih ekosustava da apsorbiraju, podnose i oporave se od ekstremnih prirodnih događaja poput oluja, požara, suša, poplava, štetnika i bolesti, uz minimalan gubitak ekoloških funkcija, produktivnosti i biološke raznolikosti.

Otpornost se sastoji od tri ključna aspekta:

- **Otpornost na poremećaj (resistance)** – sposobnost šume da izdrži vanjski stres bez značajnih promjena u strukturi i funkciji.
- **Oporavak nakon poremećaja (resilience)** – brzina i uspješnost regeneracije šume nakon nepogode.
- **Prilagodljivost (adaptive capacity)** – sposobnost šume da se dugoročno prilagođava promjenama u okolišu kao i učestalim ekstremnim događajima, bilo kroz prirodne evolucijske procese ili aktivne mjere gospodarenja.



Slika 18. Jačina utjecaja prirodne nepogode na određenu hipotetsku sastojinu promatrano putem standardnih indikatora strukture (N – broj stabala, G – temeljnica, V – volumen).

Ako npr. Uzmemo kao indikator neke od pokazatelja strukture šuma kao što su: volumen (V), temeljnica (G) ili broj stabala (N) sastojina (slika 18). Crna krivulja označava normalnu vrijednost volumena sastojine, koja nakon nepogode može pasti ispod početne (normalne) vrijednosti. Vrijeme potrebno za prirodnu obnovu i povrat volumena na početnu vrijednost (R_t) definira otpornost sastojine. Uzastopne nepogode produljuju oporavak (slika gore desno), dok dugoročni postepeni pad volumena, primjerice zbog sušenja stabala, otežava procjenu trajanja obnove (slika 18).

Za potpuno razumijevanje prirodnih nepogoda ključno je poznavanje osnovnih termina i definicija korištenih u njihovoj analizi i praćenju. Prirodne nepogode (Natural Disturbances) mogu se opisati kroz niz pokazatelja koji karakteriziraju njihov režim:

Područje/Veličina – ukupna površina zahvaćena nepogodom, uključujući veličinu pojedinačnih pogođenih područja.

Prostorna distribucija – raspored nepogoda u odnosu na topografiju, tlo i druge čimbenike, što određuje njihovu karakterističnu prostornu skalu.

Frekvencija – prosječan broj nepogoda u određenom vremenskom razdoblju na nekom području.

Interval ponavljanja (IP) – prosječno vrijeme između dvije nepogode na istom lokalitetu, ključno za procjenu vremena oporavka ekosustava.

Predvidivost – povezana s intervalom ponavljanja; manja varijabilnost omogućuje preciznije prognoze budućih događaja.

Opseg poremećaja – uključuje:

Intenzitet – fizička snaga nepogode po jedinici vremena i površine.

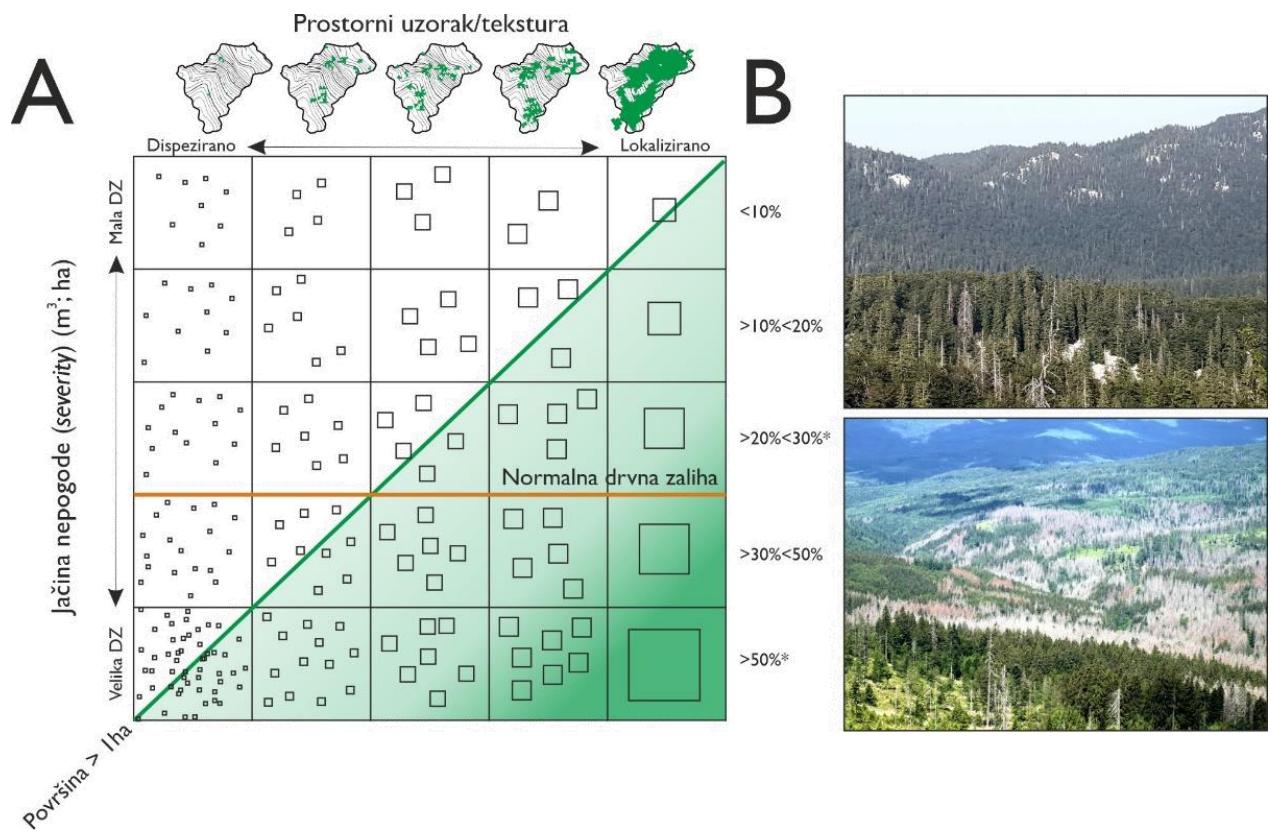
Jačina – stupanj utjecaja na ekosustav.

Sinergija – međusobna povezanost nepogoda, npr. interakcija požara i štetnika ili vjetroloma i kukaca.

Feedback – sposobnost nepogoda da potaknu ili inhibiraju druge nepogode, primjerice utjecaj požara na buduće požare ili granice pogođenog područja.

Za provedbu interventnih mjera sanacije nakon prirodnih nepogoda ključna su dva atributa: jačina nepogode i veličina zahvaćenog područja. U gospodarenju šumama štete od prirodnih nepogoda najčešće se izražavaju kroz oštećenu drvnu masu (m^3) na određenoj površini. Na temelju ta dva elementa jednostavno se može izračunati

intenzitet štete na sastojini. Shematski prikaz odnosa jačine nepogode (m^3) i prostorne distribucije šteta u sastojini prikazan je na slici xxx



Slika 19. Shematski prikaz odnosa jačine prirodne nepogode (uslijed različitih intenziteta napada potkornjaka) te prostorni uzorak koji na razini jedne hipotetske sastojine A. Fotografije i primjeri desperziranog uzorka i lokaliziranog na razini gotovo cijele sastojine B.

2.5.1. Mjere sanacije smrekovih šuma u Europi

Sanacija smrekovih šuma na europskoj razini zahtijeva integrirani pristup koji kombinira preventivne, operativne i mjere obnove šuma kako bi se smanjili negativni učinci napada potkornjaka (*Ips typographus*) i vjetroloma. Klimatske promjene značajno povećavaju ranjivost smrekovih sastojina, potičući češće i intenzivnije napade potkornjaka te povećavajući učestalost ekstremnih vremenskih nepogoda, poput vjetroloma i vjetroizvala (Hlásny i dr., 2021).

Napadi potkornjaka uzrokuju ekološke i ekonomske štete, uključujući smanjenje pohrane ugljika, povećanje rizika od sekundarnih napada te destabilizaciju tržišta drvom zbog prekomjerne ponude i pada cijena (Hlásny i Haas, 2023). Kako bi se sanirale ove posljedice, ključne mjere uključuju proaktivno upravljanje, poput

kontinuiranog monitoringa, sanitarnih sječa zaraženih stabala te primjene feromonskih zamki za praćenje populacija potkornjaka (Haas, 2023). Dugoročno, diversifikacija sastojina kroz povećanje udjela otpornijih vrsta drveća i sadnju klimatski prilagodljivih vrsta od ključne je važnosti za stvaranje budućih otpornijih šumskih ekosustava (Hlásny i Haas, 2023).

Vjetrolomi i vjetroizvale predstavljaju dodatni izazov, često stvarajući uvjete za sekundarne napade potkornjaka i uzrokujući ozbiljne ekološke i gospodarske gubitke (Biedermann i dr., 2019). Preventivne mjere, poput prostornog planiranja, definiranja zona visokog rizika i sadnje vrsta drveća otpornijih na vjetar, ključne su za smanjenje šteta od budućih nepogoda. Nakon vjetroloma, sanitarna sječa oštećenih stabala, logistička podrška za skladištenje i transport drvne mase te brza obnova zaraženih područja nužne su kako bi se smanjile ekološke i ekonomski posljedice (Hlásny i Haas, 2023).

Obnova šuma predstavlja najprirodniju i dugoročnu strategiju koja uključuje poticanje prirodne regeneracije te sadnju i uzgajanje vrsta drveća prilagođenih lokalnim klimatskim uvjetima.



Slika 20. Prostroni obrazac sušenja smreke napadom potkornjaka

2.5.2. Urod sjemena obične smreke

Kod prirodne obnove svake sastojine, prvi je uvjet da sastojina proizvodi sjeme dobre kvalitete u dovoljnim količinama te da je tlo spremno za prihvat tog sjemena i omogućavanje nesmetanog klijanja (Anić, 2009). Osim obilnog uroda sjemena, ključno je da sjeme posjeduje odgovarajuću klijavost. Godina punog uroda sjemena u nepravilnim intervalima je ključna reproduktivna strategija mnogih drvenastih biljaka, uključujući i običnu smreku. Rast i reprodukcija drvenastih vrsta endogeni su procesi koji upravljaju dinamikom šumskih ekosustava (Hacket-Pain i dr., 2019). Rast stabala značajno je utjecan klimatskim uvjetima koji kontroliraju procese formiranja drva (Carrer i dr., 2017) te složeno utječu na akumulaciju i dostupnost resursa (Mencuccini i dr., 1995). Raspoljiva resursa za reprodukciju također je pod snažnim utjecajem klime (Vacchiano i dr., 2017). Dostupnost tih istih resursa inicira cvjetanje i utječe na učinkovitost opašivanja (Koenig i dr., 2015). Rast i reprodukcija međusobno su povezani u raspodjeli resursa (Barringer i dr., 2013). Prema Hacket-Pain i dr. (2019) plodonošenje karakterizirano visokom proizvodnjom sjemena, negativno utječe na rast stabala obične smreke. Tijekom godina punog uroda, resursi se više usmjeravaju prema reprodukciji nego prema rastu, što dovodi do smanjenog prirasta. Postoji značajna varijabilnost u tome kako pojedina stabla obične smreke reagiraju na temperaturu i plodonošenje. Ova varijabilnost sugerira da drugi čimbenici, poput genetskih razlika, lokalnih mikroklimatskih uvjeta i fizioloških osobina specifičnih za svako pojedino stablo igraju značajnu ulogu u moduliranju odgovora na rast (Hacket-Pain i dr., 2019; Mencuccini i dr., 1995).

Kada govorimo o periodičnosti plodonošenja obične smreke pojava punog uroda u Europi događa se u intervalima svakih 2 do 8 godina, što je uvjetovano nadmorskom visinom, geografskom širinom i naravnim klimatskim uvjetima koji prevladavaju na određenom lokalitetu (Chałupka, 2007). Prema Oršaniću (2001) periodicitet plodonošenja odnosno godine dobrog uroda smrekovih sastojina na području sjevernog Velebita događaju se u periodu od 3-13 godina.

2.5.3. Prirodna obnova

Sklop krošanja ključan je regulator dostupnosti svjetlosti mladom naraštaju, čime izravno utječe na uspjeh prirodne obnove (Bače i dr., 2015, 2017). Prirodni poremećaji poput vjetroizvala i progradacije potkornjaka narušavaju sklop sastojine, stvarajući manje ili veće progale, čime se povećava dostupnost svjetla i potencijalno potiče prirodna obnova (Bače i dr., 2017; Franklin i dr., 2002). Međutim, poremećaji uzrokovani potkornjacima stvaraju bitno drukčije uvjete u odnosu na požare ili oluje, budući da sastojine ne odumiru naglo, već postepeno, tijekom nekoliko godina (Červenka i dr., 2016, 2020; Sproull i dr., 2015). U tom se razdoblju mikroklimatski uvjeti unutar sastojine postupno mijenjaju kako matična sastojina propada (Metslaid i dr., 2007). Šuma dostiže fazu starosti nakon dugih razdoblja s niskim intenzitetom poremećaja, pri čemu se razvija stabilna preborna struktura, koja odražava kontinuirano stvaranje progala i regeneraciju (Bače i dr., 2017; Peet i Christensen, 1987). U prirodnim smrekovim šumama regeneracija se rijetko događa prije faze propadanja sastojine, koja obično nastupa u dobi od 200 do 250 godina (Tjoelker i dr., 2007). Tijekom ove faze dolazi do značajnih promjena u šumskoj strukturi, uključujući povećanu dostupnost svjetlosti i vode zbog otvaranja sklopa te formiranje mikroreljefnih elemenata poput humaka i ležećeg mrtvog drva. Ti elementi osiguravaju stabilnu vlažnost, dobru drenažu i smanjenu konkureniju s drugim biljnim vrstama, stvarajući optimalne uvjete za regeneraciju smreke (Oršanić, 2001; Modrzyński, 2007). Ova povezanost prirodne dinamike i mikroreljefa ključna je za stabilnost šumskih ekosustava te se često oponaša u šumskouzgojnim sustavima kako bi se osigurala uspješna regeneracija (Holeksa, 1998). Obnova planinskih smrekovih šuma složen je proces koji ovisi o nizu ekoloških čimbenika, uključujući temperaturu, dostupnost klijavog sjemena, vegetacijsku konkureniju, pedološke uvjete, mraz i sušu (Oršanić, 2001). Kompleksno međudjelovanje ovih čimbenika značajno utječe na uspješnost prirodne obnove, što zahtijeva prilagodbu mjera pomlađivanja specifičnim stanišnim uvjetima i lokalnim karakteristikama šumskih zajednica.

3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Glavni cilj istraživanja je analizirati dinamiku prirodne obnove i razvoja smrekovih šuma zahvaćenih sušenjem te istražiti koji klimatski čimbenici najviše utječu na njihov rast i razvoj na području sjevernog Velebita.

Specifični ciljevi predloženog istraživanja:

1) Analizirati strukturu i dinamiku prirodne regeneracije smreke u odumrlim sastojinama

(H0: *dinamika regeneracije smreke tijekom životnog vijeka sastojine značajno ovisi o dinamici razvoja populacija potkornjaka*)

(2) Analizirati utjecaj geomorfologije terena, strukturnih i mikrostanišnih čimbenika na pojavljivanje odumiranja i stanje pomlatka

(H0: *uspješna prirodna regeneracija smreke značajno je utjecana mikrostanišnim prilikama*)

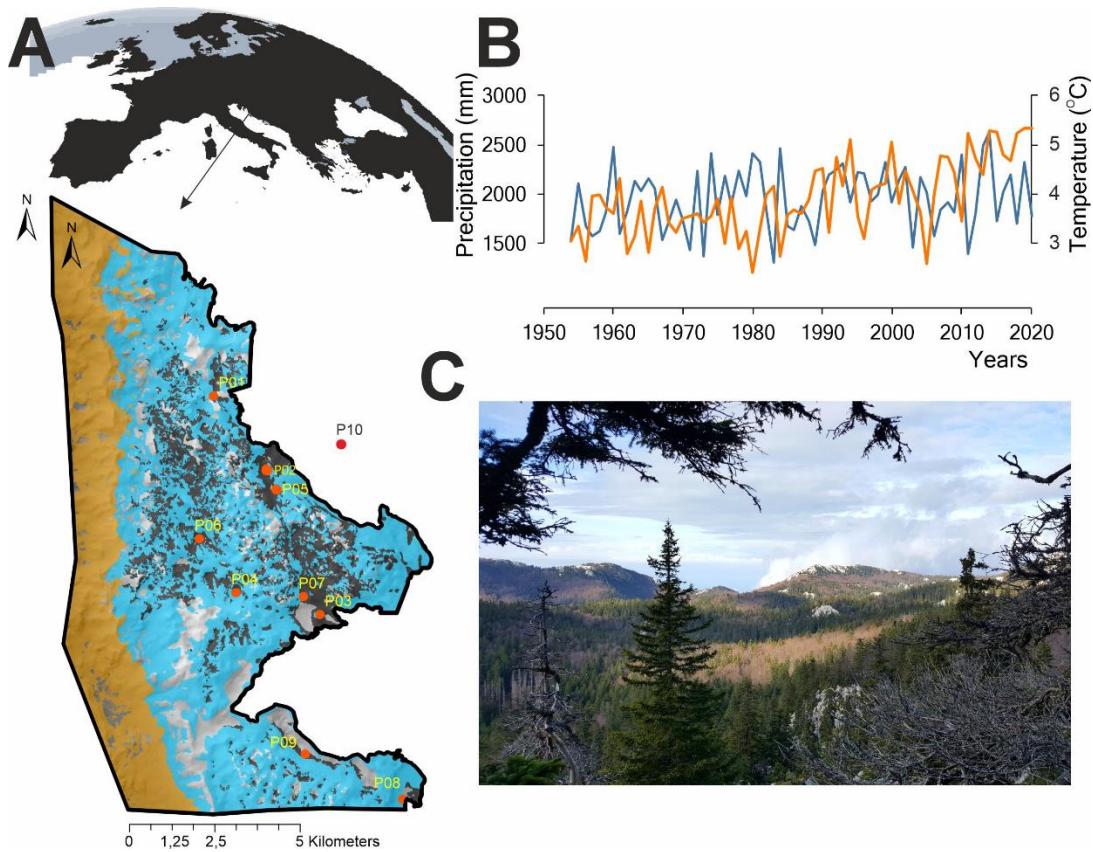
(3) analizirati utjecaj geometrije progala na pojavnost pomlatka smreke i drugih vrsta drveća

(H0: *površinom veće progale i jednostavnije geometrije povoljnije su za pomlađivanje smreke*)

4. MATERIJALI I METODE RADA

4.1. Područje istraživanja

Dinaridi, najveći planinski lanac u mediteranskoj regiji, proteže se duž Balkanskog poluotoka, od rijeke Soče i Trnovskog gozda u Sloveniji na sjeveru, preko Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Crne Gore i Sjeverne Makedonije, sve do rijeke Drim i Prokletija u sjevernoj Albaniji. Ovaj lanac čini najprostraniji i morfološki najraznolikiji krški kompleks u Europi, obuhvaćajući područje od gotovo 60.000 km² (Prelovsek i dr., 2010). Unutar ovog kompleksa nalazi se Nacionalni park Sjeverni Velebit, smješten u sjeverozapadnom dijelu Dinarida na masivu sjevernog Velebita, gdje je provedeno istraživanje. Nacionalni park Sjeverni Velebit, najmlađi nacionalni park u Hrvatskoj, osnovan je 1999. godine te su od tada gospodarske aktivnosti na tom području prekinute. Područje parka (45,24° N, 17,07° E), koje obuhvaća 10.900 hektara, označava prijelaz između mediteranske i kontinentalne biogeografske regije (Slika 21A). U parku prevladavaju čiste bukove šume, mješovite bukovo-jelove šume, submontanske bukove šume, šume obične smreke te, na najvišim nadmorskim visinama, šume planinskog bora klekovine (*Pinus mugo*). Čiste gorske šume obične smreke zauzimaju oko 2.200 hektara, a javljaju se na nadmorskim visinama između 900 i 1600 metara (Vukelić 2005).



Slika 21. Područje istraživanja i položaj pokusnih ploha (Crvene točke) A, Prosječne godišnje vrijednosti oborina i temperatura sa mjerne postaje Zavižan B, Izgled smrekovih sastojina na sjevernom Velebitu C.

Opstanak obične smreke na ovom području, gdje konkurira s bukvom, omogućen je specifičnim krškim reljefom, koji uključuje oblike poput vrtača, udolina, mrazišta i sjevernih padina koje značajno modificiraju makroklimatske uvjete regije.

Tablica 2. Popis istraživanih lokaliteta

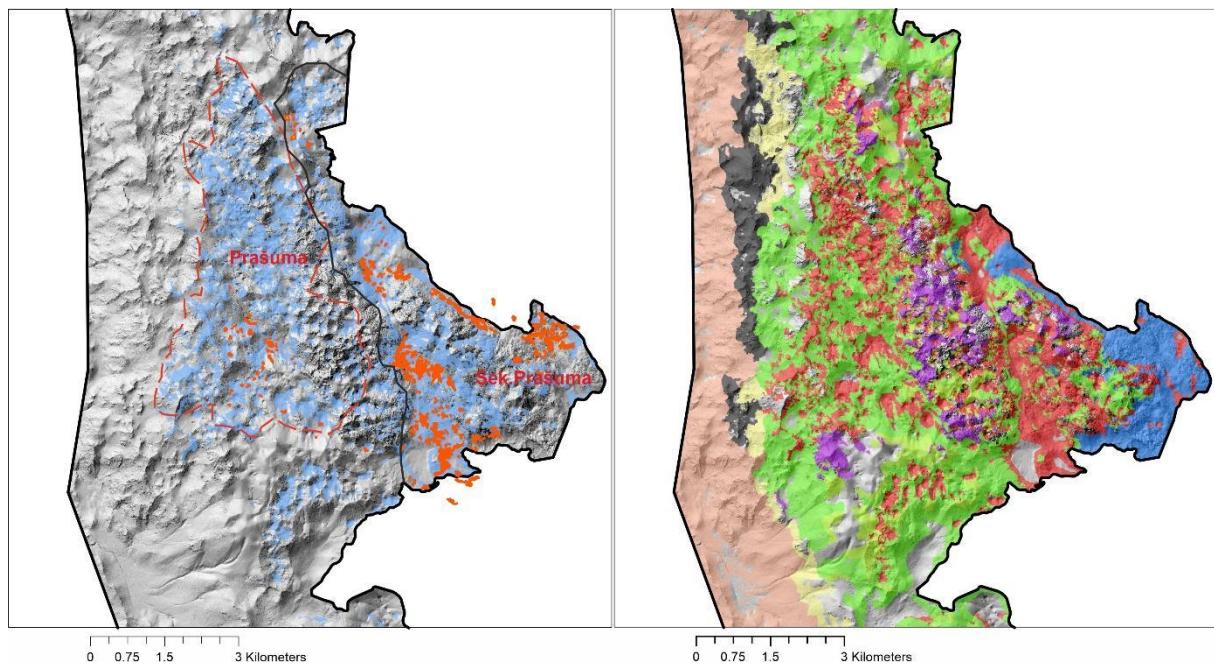
Lokalitet	ID	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina (m)	Šumska zajednica
Icinac	P01 K	44.80°	14.97°	1545	Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>)
	P01 S				
Škrbine drage	P02 K	44.77°	15.00°	1340	Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>)
	P02 S				
Mali Lubenovac	P03 K	44.74°	15.01°	1295	Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>)
	P03 S				
Krajačev kuk	P04 K	44.75°	14.98°	1455	Preplaninska smrekova šuma s alpskom pljuskavicom (<i>Hyperico grisebachii-Piceetum</i>)
Škrbine drage-Lubenovac	P05 K	44.77°	15.00°	1358	Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>)
	P05 S				
Varnjača (Cipale)	P06 K	44.76°	14.97°	1350	Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>)
	P06 S				
Veliki Lubenovac	P07 K	44.74°	15.01°	1315	Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>)
	P07 S				
Štirovača	P08 K	44.69°	15.05°	1135	Gorska smrekova šuma sa šumskim pavlovcom (<i>Aremonio-Piceetum</i>)
Šegotski padež	P09 K	44.70°	15.02°	1325	Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>)
	P09 S				
Katalinac	P10 K	44.78°	15.02°	1470	Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>)

4.2. Klimatska obilježja područja istraživanja

Nacionalni park Sjeverni Velebit nalazi se na prijelazu između dvaju biogeografskih regija, čime postaje sjecištem kontinentalne i maritimne klime, s čestim snažnim vjetrovima, kao što je bura, koja može doseći brzine veće od 150 km/h. Prema Köppenovoj klasifikaciji, u Nacionalnom parku Sjeverni Velebit prisutna su dva tipa klime: umjereno topla kišna klima i snježno-šumska klima. Veći dio Parka obuhvaća umjereno toplu kišnu klimu s toplim ljetom, pri čemu se prosječne srpanjske temperature kreću između 20 i 22 °C, dok su prosječne siječanske temperature između 0 i 3 °C. Najviši dijelovi Parka nalaze se u zoni snježno-šumske klime, koja je karakterizirana hladnim, snježnim zimama s prosječnom siječanskim temperaturom nižom od -3 °C, dok su ljeta kratka i svježa, s prosječnim srpanjskim temperaturama između 15 i 20 °C. Prema Thornthwaiteovoj klasifikaciji, koja se temelji na odnosu između oborina i potencijalne evapotranspiracije, područje Parka pripada perhumidnoj klimi, što znači da su oborine veće od evapotranspiracije. Reljefna i geomorfološka razvedenost Velebita uzrokuje značajne razlike u klimatskim uvjetima na relativno malim udaljenostima. Jugozapadne padine Velebita pod utjecajem su mora, dok sjeveroistočne strane imaju kontinentalna obilježja. Zbog toga su prisutne izražene klimatske razlike između suprotnih strana Velebita koje se očituju u temperaturi zraka, vlažnosti, smjeru i intenzitetu vjetrova, te oborinama i naoblaci. Viši dijelovi Velebita, kao i njegova sjeveroistočna strana, karakterizirani su visokim postotkom relativne vlažnosti zraka. Područje istraživanih smrekovih sastojina odlikuje se tipičnom planinskom klimom. Prosječna godišnja temperatura zraka iznosi 3,7 °C, dok je ukupna godišnja količina oborina 1937 mm. Srpanj je najsušniji i najtoplji mjesec, s prosječnom količinom oborina od 92 mm. Apsolutna minimalna temperatura zabilježena tijekom promatranog razdoblja iznosi -28,6 °C, dok je apsolutna maksimalna temperatura 28,3 °C.

4.3. Fitocenološke značajke istraživanog područja

Područje sjevernog Velebita karakterizira izuzetna raznolikost vegetacijskih zajednica kao rezultat složene interakcije klimatskih uvjeta, geomorfoloških obilježja i raznolikih tipova tla. Na ovom području susreću se elementi kontinentalne i mediteranske klime te izražena reljefna raznolikost, što omogućuje razvoj brojnih biljnih zajednica specifično prilagođenih lokalnim ekološkim uvjetima. Područje Velebita obuhvaća dvije vegetacijske regije – mediteransku i eurosibirsku-sjevernoameričku te pet vegetacijskih pojasa. U horizontalnom smislu, područje se može podijeliti na više vegetacijskih zona koje uključuju srednjoeuropske vegetacijske elemente, kao i specifične dinarske zajednice povezane s ilirskom flornom provincijom (Vukelić, 2012). Fitocenološke značajke sastojina smreke na području Velebita opisane su temeljem vegetacijskih istraživanja smrekovih zajednica sjevernog Velebita objavljenih u znanstvenoj knjizi „Šumska vegetacija Hrvatske“ autora prof. J.Vukelića.



Slika 22. Prikaz područja primarne prašume Smrčeve doline i seknudarne prašume, narnčastom bojom područja zahvaćena sušenjem (lijevo), fitocenološka karta istraživanog područja, smrekove zajednice obojane crvenom bojom (desno)

Gorska smrekova šuma sa šumskim pavlovcem (*Aremonio-Piceetum* Horvat 1938)

Najveće površine šuma koje pripadaju ovoj asocijaciji nalaze se u uvali Štirovača na Velebitu, dok se nešto manje površine nalaze na području Apatišana. Sinekološki uvjeti ovih šuma karakteristični su za široke udoline (mrazišta) smještene na nadmorskim visinama između 900 i 1100 metara, u kojima dolazi do koncentracije hladnog zraka. Mikroklima ovih staništa ključan je faktor koji determinira rasprostranjenost smrekovih šuma. Čak i tijekom ljetnih mjeseci, absolutne minimalne temperature u ovim udolinama često padaju ispod nule.

Reljefna konfiguracija područja pogodnih za razvoj ove fitocenoze uglavnom je ravničarska, dok čak i manji nagibi terena, odnosno padine, potiču obilniju prisutnost bukve, što rezultira prijelazom u šume bukve i jеле.

U sloju drveća smreka dominira i predstavlja osnovno obilježje asocijacije. Prate je jela (*Abies alba*) i bukva (*Fagus sylvatica*), iako su obje vrste slabije vitalnosti, dok je jarebika (*Sorbus aucuparia*) redovito prisutna. Povijesno gledano, ove šume su bile mnogo raširenije, no značajne su površine iskrčene zbog ravnog terena i povoljne konfiguracije staništa za razvoj pašnjaka površina i košanica. Na mjestima gdje su šume iskrčene često su nastajala stočarska ili trajna naselja.

Danas, uslijed napuštanja tradicionalnog stočarstva, mnoge od ovih površina ponovno koloniziraju smrekove sastojine. Smreka na ovim lokalitetima postiže vrlo pravilan rast i značajne dimenzije, pri čemu se posebno ističu sastojine u Štirovači.



Slika 23. Izgled sastojine obične smreke u Štirovači (Foto: M. Orešković)

Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (*Laserpitio krappii-Piceetum* Vukelić, Alegro et Šegota 2010)

Ova zajednica pripada visokogorskem i preplaninskom vegetacijskom pojasu dinarskog područja Hrvatske. Ove šume razvijene su pretežno na strmim, sjevernim ekspozicijama, unutar hladnih, zatvorenih ponikava i dolina, u uvjetima značajnih i dugotrajnih snježnih oborina. Raspon nadmorskih visina na kojima se pojavljuju je između 1100 i 1500 metara. Najvažniji lokaliteti uključuju na području Sjevernog Velebita su područja Loma, Zavižana, Smrčevih dolina, Katalinca i Lubenovca.

Iako ova fitocenoza dijeli makroklimatske uvjete preplaninskih bukovih šuma, njezinu specifičnu pojavnost uvjetuje mikroklima, koja je primarno oblikovana reljefnim obilježjima, nadmorskom visinom i geomorfološkim čimbenicima.

Zajednica se izdvaja po većoj florističkoj raznolikosti vrsta reda *Fagetalia* u odnosu na ostale smrekove asocijacije. Razvija se kao trajni stadij na hladnjim, vlažnjim i sjenovitijim staništima te se često spušta u vrtače i donje padine, prelazeći u bukovo-

jelove šume (*Omphalodo-Fagetum*). Najčešće je, međutim, uklopljena u preplaninske bukove šume s bijelim žabnjakom (*Ranunculo platanifolii-Fagetum*). Utjecaj bukovog vegetacijskog pojasa na manje komplekse crnogoričnih šuma unutar ovog područja izrazito je snažan, što objašnjava "fagetalni" karakter zajednice. U njoj se pojavljuju vrste karakteristične za bukove šume, koje su rijetke ili odsutne u drugim smrekovim asocijacijama.

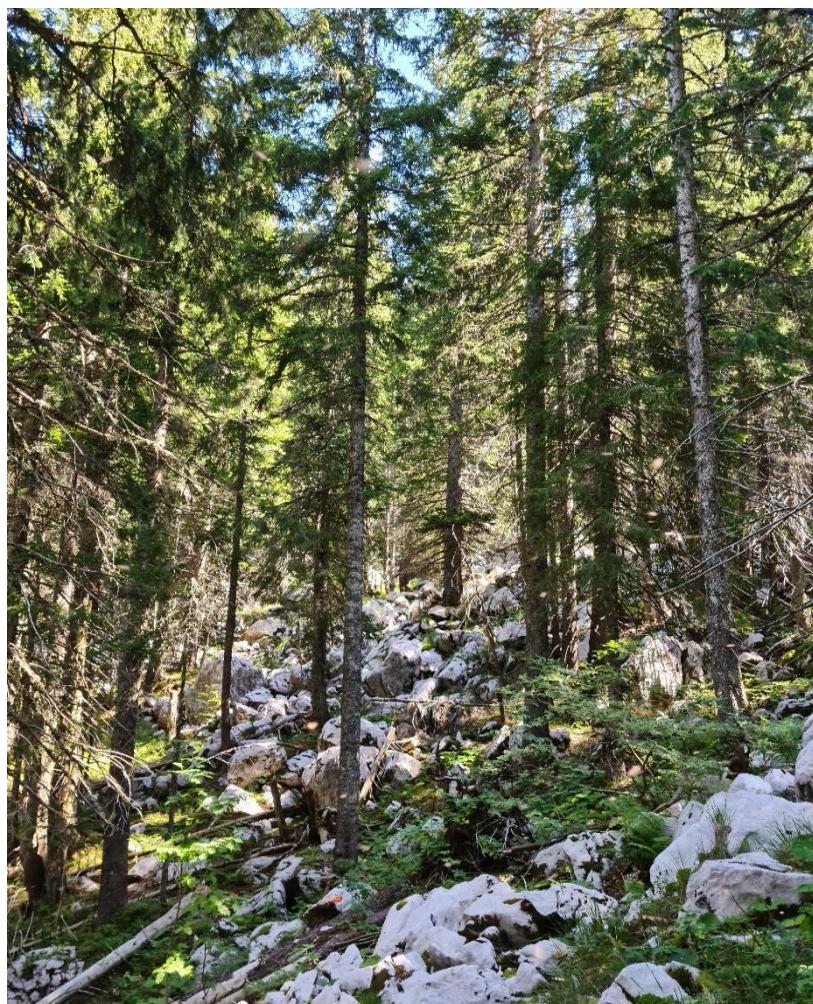
Od 2006. godine do danas zabilježeno je značajno sušenje dijela gospodarskih smrekovih sastojina, ali i onih unutar Nacionalnog parka Sjeverni Velebit.



Slika 24. Izgled Altimontansko-subalpinske smrekove šuma s obrubljenim gladcem na lokalitetu Lubenovačka vrata (Foto: M. Orešković)

Pretplaninska smrekova šuma s alpskom pljuskavicom (*Hyperico grisebachii-Piceetum* (Bertović 1975) Vukelić, Alegro, Šegota et Šapić 2010)

Fitocenoza *Hyperico grisebachii-Piceetum* prostire se na nadmorskim visinama iznad 1400 metara, premda se na području Samarskih stijena javlja i nešto niže. Ova šumska zajednica karakteristična je za teško pristupačne i izrazito stjenovite terene, uključujući vrhove, grebene, kukove, škrape te strme gornje prisojne padine. Kamenitost tla, koja uvijek prelazi 50%, ključna je značajka staništa te značajno utječe na prekinut sklopa drveća, kao i na specifičan sastav grmlja i prizemne vegetacije. U sloju drveća dominira smreka (*Picea abies*), dok sloj grmlja, uz vrste iz sloja drveća, čine *Lonicera caerulea* ssp. *borbasiana*, *Clematis alpina*, *Vaccinium myrtillus*, *Rosa pendulina*, *Salix appendiculata*, *Rubus idaeus*, *Sambucus racemosa* i *Juniperus communis* ssp. *alpina*. Premda ova fitocenoza nema gospodarsku vrijednost, od iznimnog je značaja s aspekta zaštite prirode i znanstvenog istraživanja.



Slika 25. Pretplaninska smrekova šuma s alpskom pljuskavicom na lokalitetu Krajačev kuk (Foto: M. Orešković)

4.4. Edafske značajke smrekovih zajednica na području sjevernog Velebita

Edafske značajke sastojina smreke na području Velebita opisane su temeljem pedološko-vegetacijskih istraživanja smrekovih zajednica sjevernog Velebita i Štirovače obavljenih u okviru tipoloških istraživanja šuma okoliša Zavižana (Cestar i dr., 1978) i profila Štirovača-Lešće (Cestar i dr., 1977) te pedoloških istraživanja koje su proveli Vrbek i Pilaš, 2006a i b) te Bakšić i dr., (2011), dok su značajke geološke podloge preuzete s Osnovnih geoloških karata i tumača RH M 1:100 000 (Listovi Otočac, Velić i sur. 1974; Gospić, Sokač i sur. 1974, s pripadajućim tumačima Sokač i sur. 1976).

Prikaz edafskih značajki temelji se na rezultatima navedenih istraživanja provedenih na području sjevernog i srednjeg Velebita u tri smrekove zajednice na 19 otvorenih pedoloških profila:

- gorska smrekova šuma sa šumskim pavlovcem (*Aremonio-Piceetum Horvat 1938*) – 8 profila
- altimontansko-subalpska smrekova šuma s obrubljenim gladcem (*Laserpitio krapfii-Piceetum Vukelić, Alegro et Šegota 2010*) – 5 profila i
- pretplaninska smrekova šuma s alpskom pljuskavicom (*Hyperico grisebachii-Piceetum* (Bertović 1975) Vukelić, Alegro, Šegota et Šapić 2010) – 6 profila.

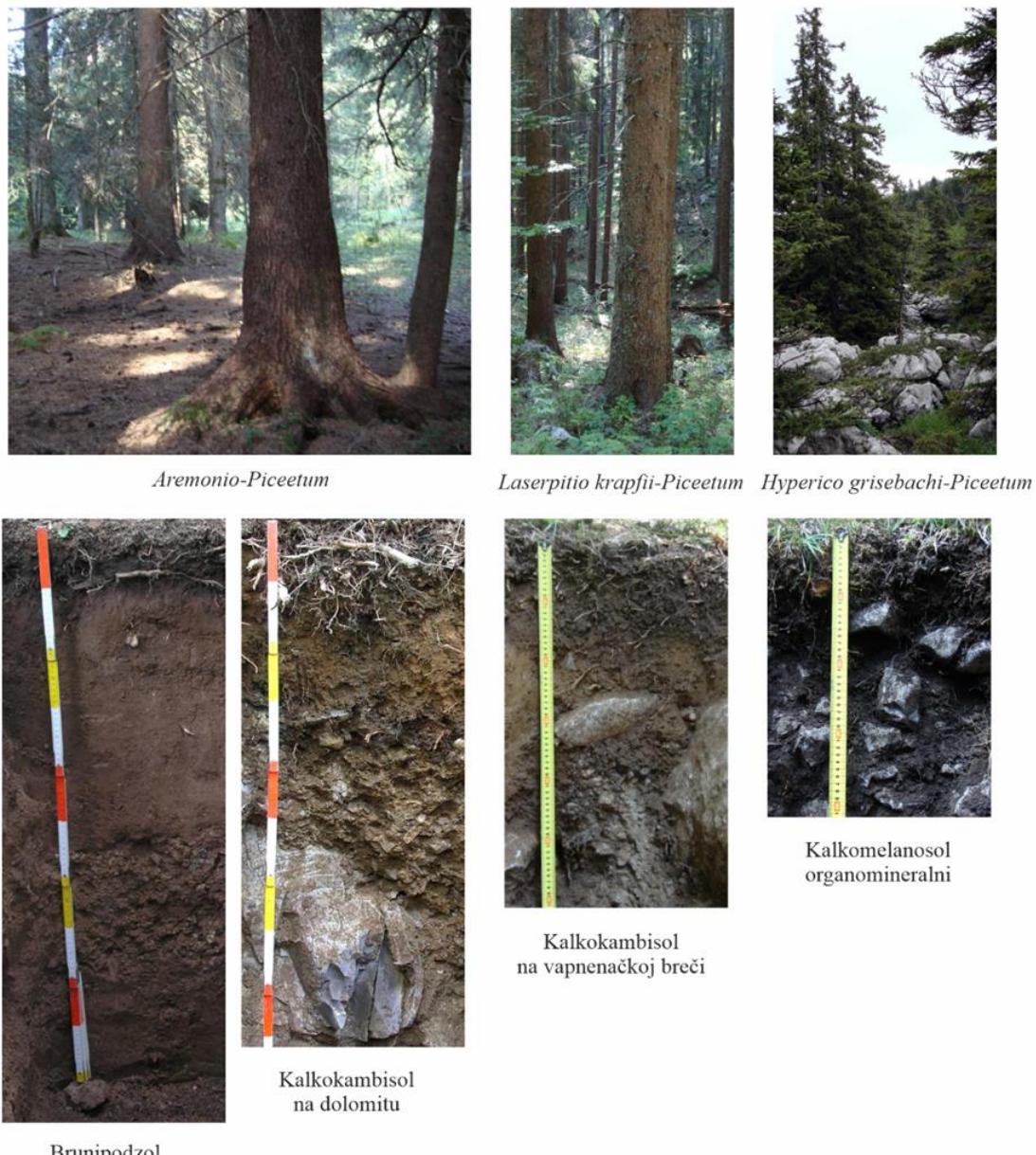
Zajednica: **Gorska smrekova šuma sa šumskim pavlovcem** (*Aremonio-Piceetum Horvat 1938*)

Najveće površine ove zajednice u Hrvatskoj nalaze se u uvali Štirovača i manje na Apatišanu (Vukelić 2012). Ona uspijeva na različitim litološkim podlogama i tipovima tla. U području Apatišana ova zajednica javlja se na karbonatnoj podlozi, na vagnencima i dolomitima jurske starosti na tlima različite dubine od kalkokambisola tipičnog i ilimeriziranog (formi od plitke do duboke) pa do luvisola. Na području Štirovače rasprostire se na nadmorskoj visini od oko 1100 do 1250 m. Matični supstrat dominatno čine trijaski klastiti izgrađeni od tufitičnih lapor i pješčenjaka izrazito crvene boje koji su u kontaktu s dolomitnim naslagama gornjeg trijasa. Dominantni matični

supstrat i položaj u reljefu, uz specifične klimatske prilike uvjetovali su nastanak dubokih, u površinskom sloju jako kiselih tala, u kojima mogu biti i izraženi znakovi podzolizacije. Najzastupljeniji tip tla je distrični kambisol, značajno su manje zastupljeni brunipodzol (slika A) i podzol (s oko 10 %, odnosno 5 % – prema OPK 1:50 000, Vranković 1974), a eutrični kambisol vrlo se rijetko pojavljuje. Prema istraživanjima Vrbeka i Pilaša (2006b) ova se zajednica u rubnim dijelovima Štirovače može naći i na kalkokambisolu na dolomitu (slika A).

Tla zajednice *Artemonio-Piceetum* na području Štirovače, u usporedbi s druge dvije navedene smrekove zajednice, su najdublja. Na distričnim kambisolima, brunipodzolima i podzolima dubina profila je u rasponu od 55 cm do 100 cm, a često i preko 100 cm. Količina šumske prostirke ($N = 6$) u rasponu je od 21,95 Mg ha $^{-1}$ do 41,90 Mg ha $^{-1}$, s aritmetičkom sredinom od 29,58 Mg ha $^{-1}$. Debljina humusnoakumulativnog horizonta u rasponu je od 3 do 11 centimetara. Ovaj horizont uglavnom je bogato humozan i vrlo bogato opskrbljen dušikom. Udjel organskog ugljika u rasponu je od 72,9 g kg $^{-1}$ do 249,4 g kg $^{-1}$, udjel ukupnog dušika u rasponu je od 7,0 g kg $^{-1}$ do 12,6 g kg $^{-1}$, a srednja vrijednost C:N 14. Humusnoakumulativni horizont slabo je opskrbljen pristupačnim fosforom, a osrednje do dobro opskrbljen kalijem.

U humusnoakumulativnom horizontu pH (H₂O) kreće se od 3,88 do 4,89 (više pH vrijednosti zabilježene su na kalkokambisolima na dolomitu). Porastom dubine pH vrijednost raste. Tako se u E horizontu pH (H₂O) kreće u rasponu od 4,30 do 5,30 s aritmetičkom sredinom 4,77, dok se u B horizontu kreće u rasponu od 4,75 do 5,89, odnosno aritmetička sredina iznosi 5,32. Ova su tla u humusnoakumulativnom horizontu vrlo jako do jako kisela, a dubinom se kiselost smanjuje pa su E i B horizonti jako do osrednje kiseli. Po granulometrijskom sastavu tla (FAO, 2006) u humusnoakumulativnom horizontu radi se o glinastoj ilovači, dok se s dubinom udjel pjeskovite frakcije povećava pa prelazi u ilovaču.



Slika 26. Odnos smrekovih zajednica i pripadajućih tala na području Velebita (Foto: D. Bakšić)

Zajednica: **Altimontansko-subalpinska smrekova šuma s obrubljenim gladcem** (*Laserpitio krapfii-Piceetum* Vukelić, Alegro et Šegota 2010) javlja se na većim nadmorskim visinama, između 1200 i 1500 m. Uglavnom pridolazi na kalkokambisolu (slika A) čija je dubina uvjetovana razvedenošću i položajem u reljefu. Maticnu podlogu čine karbonatne jelar breče i vapnenačko-dolomitni blokovi, a u nižim dijelovima Lomske duljibe i Velikog i Malog Lubenovca karbonatni koluvij. Na 12 ploha određena je količina šumske prostirke koja se za ovu zajednicu kretala od 10,17 Mg ha⁻¹ do 67,18 Mg ha⁻¹, s aritmetičkom sredinom 26,44 Mg ha⁻¹. Debljina

humusnoakumulativnog horizonta u rasponu je od 3 do 20 centimetara. Ovaj je horizont jako do bogato humozan i vrlo bogato opskrbljen dušikom. Udjel organskog ugljika u rasponu je od 44,5 g kg⁻¹ do 160,6 g kg⁻¹, udjel ukupnog dušika u rasponu je od 4,0 g kg⁻¹ do 13,0 g kg⁻¹, a srednja vrijednost C:N 12. Humusnoakumulativni horizont slabo je opskrbljen pristupačnim fosforom, a osrednje opskrbljen kalijem. U humusnoakumulativnom horizontu pH (H₂O) vrijednost kreće se od 4,62 do 7,08, u B horizontu pH (H₂O) vrijednost kreće se od 6,60 do 7,68, a aritmetička sredina iznosi 7,18. Tla u ovoj zajednici manje su kisela od tala zajednice *Aremonio-Piceetum*. U humusnoakumulativnom horizontu dominantno su osrednje kisela, ali imaju široki raspon od jako do slabo kiselog, dok su u B horizontu dominantno slabo kisela s rasponom od vrlo slabo kiselog do vrlo slabo bazičnog. Po granulometrijskom sastavu tla u humusnoakumulativnom horizontu radi se o praškasto-glinastoj ilovači, dok se s dubinom udjel glinovite frakcije povećava pa prelazi u glinastu ilovaču.

Zajednica: **Pretplaninska smrekova šuma s alpskom pljuskavicom** (*Hyperico grisebachii-Piceetum* (Bertović 1975) Vukelić, Alegro, Šegota et Šapić 2010) pridolazi na nadmorskim visinama iznad 1400 m, na najvrletnijem terenu obilježenom vapnenačkim blokovima izgrađenim od karbonatnih jelar breča. Na ovakovom vrletnom terenu i u ekstremnim klimatskim prilikama razvijaju se najplića tla, kalkomelanosol organogeni i organomineralni (slika A), te kalkokambisol plitki. Na 12 ploha određena je količina šumske prostirke koja se za ovu zajednicu kretala od 16,82 Mg ha⁻¹ do 49,25 Mg ha⁻¹, s aritmetičkom sredinom 27,79 Mg ha⁻¹. Debljina humusnoakumulativnog horizonta u rasponu je od 2 do 26 centimetara. Ovaj je horizont vrlo jako do bogato humozan i vrlo bogato opskrbljen dušikom. Udjel organskog ugljika u rasponu je od 83,3 g kg⁻¹ do 317,7 g kg⁻¹, udjel ukupnog dušika u rasponu je od 6,2 g kg⁻¹ do 16,7 g kg⁻¹, a srednja vrijednost C:N 14. Humusnoakumulativni horizont slabo je opskrbljen pristupačnim fosforom, a osrednje opskrbljen kalijem. U humusnoakumulativnom horizontu pH (H₂O) kreće se od 4,95 do 6,49, s aritmetičkom sredinom od 5,63 što upućuje da se dominantno radi o osrednje kiselim tlima. Značajke površinskog sloja tla (0-5 cm), A i O/A horizonata za sve tri zajednice smreke prikazane su u tablici A.

Tablica 3. Značajke površinskog sloja tla u smrekovim zajednicama na Velebitu.
Prikazane su vrijednosti aritmetičke sredine i standardne devijacije.

Šumska zajednica	<i>Aremonio-Piceetum</i>	<i>Aremonio-Piceetum</i>	<i>Laserpitio krapfii-Piceetum</i>	<i>Hyperico grisebachii-Piceetum</i>
Lokalitet	Štirovača	Štirovača	Sjeverni Velebit	Sjeverni Velebit
Broj uzoraka	N = 3	N = 3	N = 5	N = 6
Dominantan tip tla	Distrični kambisol Brunipodzol	Kalkokambisol na dolomitu	Kalkokambisol	Kalkomelanosol Kalkokambisol
Dubina tla	55 - preko 100 cm	25 - 70 cm	40 - 70 cm	20 - 60 cm
Sklop profila	A-B-C O/A-B-C	A-B	A-B	O-A A-B
Dominantan matični supstrat	Trijaski klastiti (lapor i pješčenjak)	Dolomit	Karbonatne jelar breče i vapnenačko-dolomični blokovi	Karbonatne jelar breče
Površinski sloj tla (0-5 cm), A horizont, O/A horizont				
Debljina horizonta	cm	7,3 ± 4,1	8,3 ± 0,6	7,5 ± 8,3
pH (H ₂ O)	-	4,23 ± 0,41	5,55 ± 0,43	5,79 ± 0,80
pH (CaCl ₂)	-	3,64 ± 0,54	4,55 ± 0,71	5,36 ± 0,83
Corg	g kg ⁻¹	134,0 ± 74,9	114,0 ± 32,4	96,2 ± 31,8
Nuk	g kg ⁻¹	9,1 ± 2,5	8,0 ± 2,1	8,0 ± 2,8
P ₂ O ₅	mg kg ⁻¹	87,7 ± 24,5	39,2 ± 18,3	16,5
K ₂ O	mg kg ⁻¹	310,0 ± 127,3	151,0 ± 19,4	170,1
190,8 ± 16,0				

4.5. Način/metoda uzorkovanja

4.5.1. Odabir lokaliteta i uspostava ploha za uzorkovanje

Kriteriji za odabir i postavljanje pokusnih ploha za uzorkovanje temeljili su se na nekoliko ključnih čimbenika: nadmorskoj visini, prisutnosti i intenzitetu sušenja smrekovih stabala, vremenu u kojem su se stabla odumrila, veličini progala, starosti sastojina te utjecaju gospodarenja, osobito u kontekstu sanacijskih mjera poduzetih nakon odumiranja. Ovakav višekriterijski pristup omogućio je detaljnu analizu različitih ekoloških i gospodarskih aspekata povezanih s odumiranjem ali i s analizom dinamike prirodne obnove smrekovih sastojina.

Kako bi se istražila klimatska osjetljivost smrekovih sastojina duž gradijenta nadmorske visine, pokusne plohe postavljene su na visinama između 1000 i 1600 metara. Ovaj gradijent osigurava pokrivanje širokog raspona ekoloških uvjeta, od nižih gorskih do viših pretplaninskih staništa, pružajući uvid u promjene u klimatskoj osjetljivosti unutar različitih visinskih zona.

Za istraživanje dinamike prirodne obnove smrekovih sastojina pogođenih sušenjem, plohe su strateški postavljene u središtu progala nastalih uslijed sušenja te u najbliže zdrave sastojine kao kontrolne plohe.

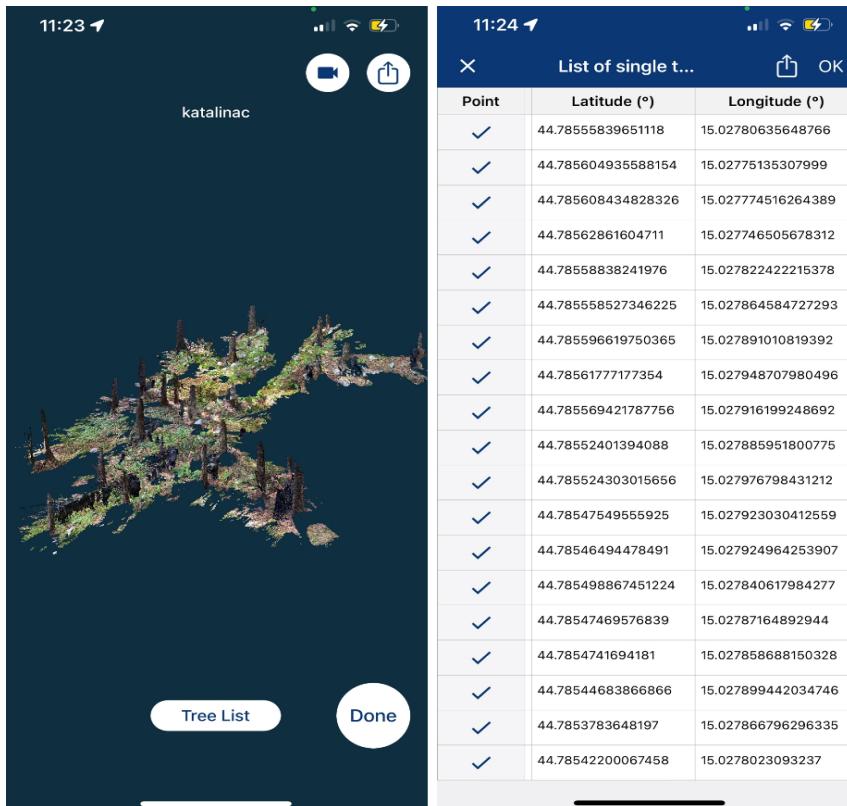
Transekst sa kružnim pokusnim plohami postavljen je u gospodarskim šumama gdje je nakon masovnog sušenja stabala proveden sanitarni sijek. U tim su područjima uklonjena sva zaražena i suha stabla, čime je omogućeno proučavanje utjecaja gospodarskih zahvata na obnovu sastojina.

4.5.2. Prikupljanje podataka

Prikupljanje podataka provedeno je primjenom standardnih dendroekoloških i šumarskih metoda za mjerjenje elemenata strukture sastojina te prikupljanje uzoraka za dendrokronološke analize. Strukturni elementi sastojina mjerili su se pomoću π-vrpce za prsne promjere stabala, dok su visine stabala određivane pomoću visinomjera Vertex Haglöf IV.

Na svim plohami provedeno je precizno određivanje pozicija svih stabala čiji je prsni promjer veći od 10 cm, korištenjem mobilne aplikacije ForestScanner (Tatsumi i dr., 2022). Ova aplikacija koristi LiDAR tehnologiju, integriranu u uređaje poput iPhonea i iPada, za precizno mjerjenje i mapiranje stabala. Princip rada aplikacije temelji se na

aktivnom senzorskom sustavu koji emitira laserske impulse i mjeri vrijeme njihovog povratka, čime se stvara trodimenzionalna slika prostora. Za svako izmjereno stablo određene su točne xy koordinate unutar pokusne plohe te precizna nadmorska visina.



Slika 27. Izgled sučelja programa ForestScanner za terensko prikupljanje podataka o prostornom položaju i dimenzijsama stabala s 3D prikazom pokusne plohe

Osim promjera i visine, stabla su klasificirana prema protokolu razvijenom u projektu CroFEM. Prema protokolu stabla su razvrstavana u šest kategorija koje odražavaju njihovo zdravstveno stanje i stupanj propadanja. Kategorije su definirane kako slijedi:

Kategorija 0: Živo i zdravo stablo.

Kategorija 1: Živo stablo s oštećenjima (bez znakova truleži, s mrtvim ili slomljenim vrhom te mrtvim granama).

Kategorija 2: Mrtvo dubeće stablo s većinom zdravih grana, malom unutarnjom truleži i obično slomljenim vrhom.

Kategorija 3: Mrtvo dubeće stablo s većinom odumrlih grana, slomljenim vrhom i značajnom truleži srži.

Kategorija 4: Mrtvo dubeće stablo s gornjom trećinom ili više slomljenom, bez preostalih grana.

Kategorija 5: Mrtvo ležeće stablo.

Za svako stablo svrstano u kategorije 2 do 5 zabilježen je uzrok odumiranja. Nadalje, svako stablo je kategorizirano kao zastarčeno ili stablo oslobođenog rasta nakon nastanka progale.

Također, stabla su raspoređena prema sloju krošnje kojem pripadaju:

Gornji sloj: Stabla čija visina iznosi 80% ili više visine najvišeg stabla u sastojini.

Srednji sloj: Stabla čija visina iznosi 50% ili više visine najvišeg stabla, ali manje od 80%.

Donji sloj: Stabla čija visina iznosi manje od 50% visine najvišeg stabla.

Unutar svake plohe uspostavljeno je pet podploha radijusa 1,5 m, smještenih u središtu plohe te na četiri rubne točke (istok, zapad, sjever, jug). Na svakoj podplohi bilježen je broj ponika dok je broj pomlatka bilježen na cijeloj površini plohe po vrstama. Ponik i pomladak svrstavani su u kategorije do tri godine starosti brojanjem internodija, te su klasificirane prema visinskim razredima u rasponu od 0,5 m do 4 m, čime je omogućena detaljna analiza strukture prirodne obnove.

Veličina ploha prilagođavana je specifičnim uvjetima sastojine kako bi se osigurala reprezentativnost prikupljenih podataka. Površine ploha iznosile su 500 m² ili 1.000 m², ovisno o karakteristikama i heterogenosti sastojine. Svi prikupljeni podaci naknadno su preračunati i izraženi kao vrijednosti po hektaru radi usporedbe među plohama.



Slika 28. Shema pokusne plohe

Na područjima kojim gospodare Hrvatske šume d.o.o., unutar gospodarskih jedinica Lom (odsjek 54b), Padeži-Lubenovac (odsjek 37b) i Begovača (odsjek 42b), uspostavljene je transekt sa pokusnim plohamama za istraživanje procesa prirodne obnove nakon provedenog sanitarnog sijeka.



Slika 29. Izgled transekta u gospodarskim šumama

Primarni cilj sanitarnog sijeka bio je uklanjanje svih zaraženih stabala kako bi se smanjio rizik od dalnjeg širenja bolesti i štetnika te očuvalo zdravstveno stanje preostalih sastojina te iskorištavanje zaražene drvne mase. Na ovim plohamama zabilježena je pojavnost ponika i pomlatka drvenastih vrsta. Cilj istraživanja bio je analizirati uspješnost prirodne regeneracije te identificirati čimbenike koji utječu na obnovu nakon sanitarnog zahvata. Uz to, na svim plohamama su zabilježeni i izmjereni opsezi panjeva uklonjenih stabala. Na temelju prikupljenih podataka o opsegu panjeva izračunata je drvna zaliha uklonjena tijekom sanacije.



Slika 30. Prikupljanje podataka na transektu

Za dendrokronološke analize, na svakoj kontrolnoj plohi uzorkovano je najmanje 15 dominantnih, vitalnih stabala dok su na plohama zahvaćenim sušenjem, uzorkovana sva odumrla stabla kako bi se dobio što potpuniji uzorak koji omogućuje detaljnu analizu utjecaja klimatskih čimbenika na dinamiku smrekovih sastojina. Uzorci su uzeti pomoću Pressler-ovog svrdla proizvođača Haglöf promjera 5.15 mm na približnoj visini 1.30 m od razine tla. Na svakom stablu uzeta su minimalno 2 nasuprotna uzorka.



Slika 31. Prikupljanje uzoraka iz stabla za potrebe dendrokronološke analize

Podaci za gospodarske šume preuzeti su iz odjela za uređivanje šuma UŠP Senj (Osnove gospodarenja i dendrometrijski listovi-broj stabala po debljinskim stupnjevima, temeljnica, volumen). Za potrebe istraživanja korišteni su i podaci iz projekta „Uspostava trajnog monitoringa ekosustava smreke (*Picea abies* Karst.) u Nacionalnom parku Sjeverni Velebit“, dodatno podaci o prašumskim ekosustavima preuzeti su iz baze podataka projekta „Remote – Primary Forests“,

4.6. Obrada i analiza podataka

4.6.1. Analiza utjecaja klimatskih promjena na prikladnost staništa obične smreke u RH

Rasprostranjenost određene vrste drveća može se definirati kao prikladnost staništa za tu vrstu u odnosu na trenutne i buduće okolišne čimbenike, poput klime, tla, hidrografskih i orografskih značajki. Modeliranje prikladnosti staništa metoda je kojom se procjenjuje pogodnost određenog područja za rast pojedine vrste ili skupine vrsta, temeljem njihovog dosadašnjeg odnosa prema okolišnim uvjetima.

Razumijevanje buduće dinamike i prostorne distribucije pogodnosti staništa obične smreke ključno je za planiranje mjera prilagodbe u kontekstu klimatskih promjena. Ovi podaci mogu poslužiti kao znanstvena osnova za donošenje odluka o izboru vrsta pri pošumljavanju neobraslih proizvodnih površina te pri biološkoj sanaciji područja pogođenih elementarnim nepogodama. Podaci o trenutnoj rasprostranjenosti obične smreke u Hrvatskoj preuzeti su iz baze prve Nacionalne inventure šuma (CRONFI) (Čavlović, 2010). Ova baza sadrži informacije o geografskom položaju ploha (geografska širina i dužina), nadmorskoj visini te različite biometrijske podatke, uključujući promjere i visine stabala. Za potrebe analize preuzeti su podaci za svaku pojedinu plohu, pri čemu su uzeti u obzir njezin prostorni položaj (širina i dužina) te prisutnost smreke, označena binarnim kodom (0 – vrsta nije prisutna, 1 – vrsta je zabilježena). Klimatski podaci korišteni u ovoj analizi preuzeti su iz baze ClimateEU (Marchi i dr., 2020), koja sadrži homogenizirane nizove osnovnih i izvedenih varijabli temperature zraka i oborina. Ova baza izvorno je izrađena u prostornoj rezoluciji od 1 km² te je korištena za modeliranje utjecaja klimatskih promjena na prikladnost staništa za rast i razvoj obične smreke.

Za prostorno modeliranje staništa i rasprostranjenosti vrste korišteni su prostorno interpolirani klimatski podaci rezolucije 1 × 1 km u Albersovoj projekciji. Analiza obuhvaća klimatske projekcije za referentno razdoblje 1961.–1990. te za dva buduća vremenska odsječka: 2020-e (2011.–2040.) i 2050-e (2041.–2070.). Ove projekcije temelje se na prosječnim vrijednostima 15 modela opće cirkulacije atmosfere i oceana (AOGCM), koji su dio IPCC-ovog petog izvješća o procjeni.

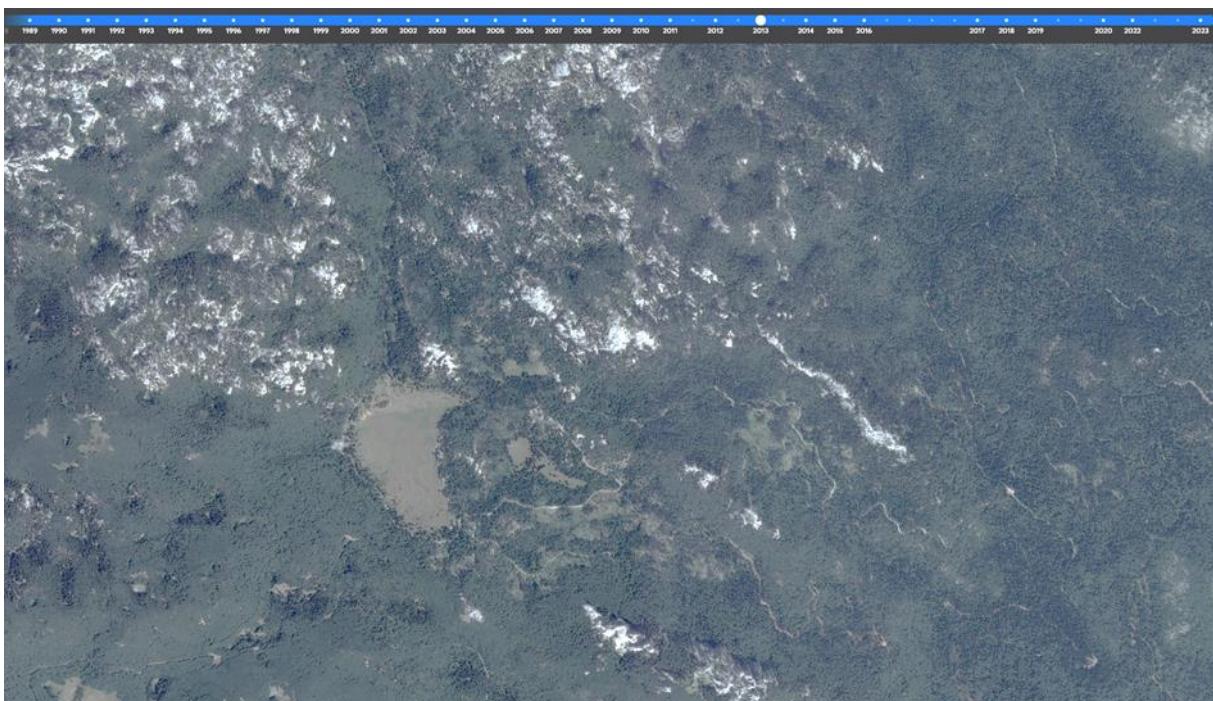
Klimatske projekcije izrađene su za reprezentativni put koncentracije (RCP) s vrijednošću zračenja od $+8,5 \text{ W/m}^2$, što rezultira procijenjenim globalnim zagrijavanjem od približno $+2,0^\circ\text{C}$ ($\pm 0,6$) do 2050-ih i $+3,7^\circ\text{C}$ ($\pm 0,9$) do 2080-ih (Marchi i dr., 2020). Podaci o fizičkim i kemijskim svojstvima tla korišteni u ovoj analizi preuzeti su iz baze SOILGRIDS v2.0 (Poggio i dr., 2021). Analizirani podaci predstavljaju prosječne vrijednosti za sve slojeve tla do dubine od 60 cm, što odgovara glavnoj zoni ukorjenjivanja većine drvenastih vrsta u istraživanom području.

Izvorno generirani u prostornoj rezoluciji od 250 m, podaci su naknadno uprosječeni na rezoluciju od 1 km^2 pomoću bilinearne interpolacije, čime su usklađeni s klimatskim podacima korištenima u analizi. U procjeni prikladnosti staništa analizirana su fizička i hidrološka svojstva tla, uključujući gustoću tla (BDOD), kapacitet izmjenjivih kationa (CEC), sadržaj gline (Clay), pijeska (Sand) i praha (Silt), poljski kapacitet tla za vodu (FC), sadržaj ukupnog dušika (Nitro), biljci pristupačnu vodu (PAW), reakciju tla (pH), sadržaj vode pri potpunom zasićenju tla (THS) te sadržaj vode u točki uvenuća (WP). Za modeliranje trenutne i buduće pogodnosti staništa za običnu smreku korištena je platforma BIOMOD2, koja se često primjenjuje u istraživanjima utjecaja klimatskih promjena na šume i druge taksonomske skupine. U analizi su korištena četiri modela distribucije vrsta: generalizirani linearni modeli (GLM), generalizirani aditivni modeli (GAM), generalizirani modeli pojačanja (GBM) i slučajna šuma (RF). Model je kalibriran na temelju trenutnih podataka o rasprostranjenosti vrste, a buduća potencijalna distribucija izrađena je u obliku karata vjerojatnosti pogodnosti staništa, skaliranih u rasponu 0–1000 radi optimizacije memorije potrošnje. Konsenzusni model izračunat je kao medijan projekcija pojedinačnih modела, dok su prisutnosti i odsutnosti jednakno ponderirane (prevalencija BIOMOD2 = 0,5). Modeli su projicirani u budućnost prema scenarijima emisija RCP 4.5 i RCP 8.5 za dva 40-godišnja razdoblja. Iz skupa potencijalnih prediktora (klimatskih i edafskih varijabli) odabrane su one koje najbolje objašnjavaju varijabilnost prisutnosti i odsutnosti vrste, primjenom rekurzivne eliminacije varijabli (RFE) unutar algoritma slučajne šume (Breiman 2001). Iterativno su uklonjene manje značajne varijable, pri čemu su identificirane one s visokom međusobnom korelacijom ($VIF > 5$). Od kolinearnih varijabli, za daljnji razvoj modela zadržane su one s nižim Akaikeovim informacijskim kriterijem (AIC) (Akaike, 1974). Konačni podskup nekoreliranih klimatskih i edafskih varijabli korišten je za izradu skupnih modela distribucije vrste.

4.6.2. Analiza prostorne distribucije i intenziteta sušenja smrekovih sastojina na području NP Sjeverni Velebit

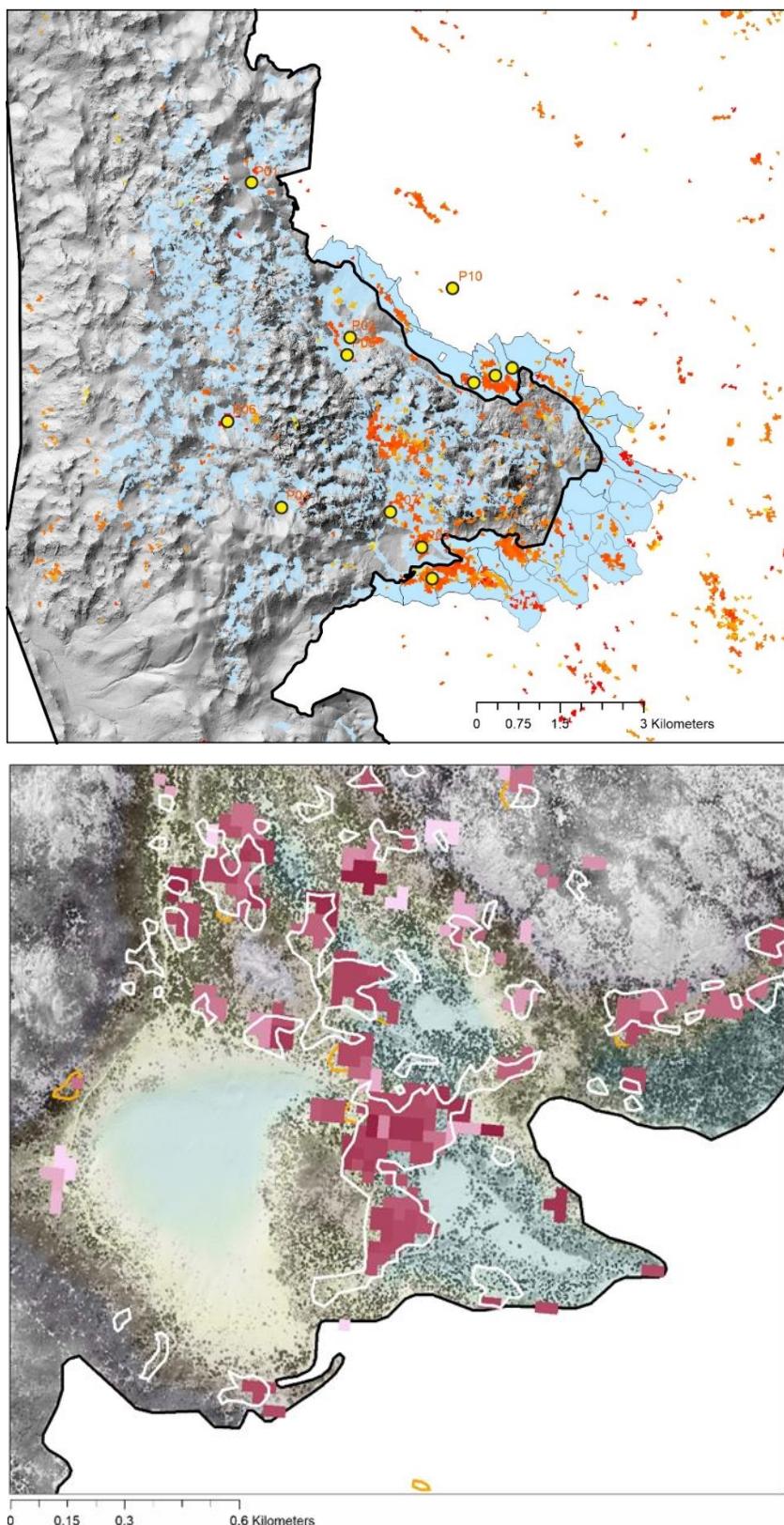
Za potrebe prostorno-vremenske analize dinamike odumiranja sastojina smreke uslijed progredacije potkornjakom, korišteni su javno dostupni satelitski podaci programa LANDSAT za razdoblje od 1985. godine do danas. Ove višespektralne snimke omogućile su detaljnu analizu dinamike odumiranja unutar cijelog istraživanog područja, uključujući i rubne zone parka te gospodarske sastojine, čime je osigurana cjelovita prostorna pokrivenost i uvid u prostorno-vremenske obrasce odumiranja šumskih ekosustava.

Satelitske snimke korištene u analizi imaju prostornu rezoluciju od 30×30 m, što znači da svaki pojedini piksel na rasteru predstavlja površinu od 900 m^2 . Kako bi se osigurala visoka razina točnosti u detekciji odumrlih dijelova sastojina, referentni podaci su dobiveni iz ortofoto snimaka snimljenih 2007. i 2011. godine, koje su korištene za vizualnu interpretaciju i digitalizaciju degradiranih površina. Tako generirani poligoni odumiranja poslužili su kao trening skup za potrebe nadgledane klasifikacije satelitskih snimaka, omogućujući prepoznavanje uzoraka povezanih s procesima propadanja smrekovih sastojina.



Slika 32. Prikaz detalja za područje Lubenovca s godinama snimaka u zaglavljtu

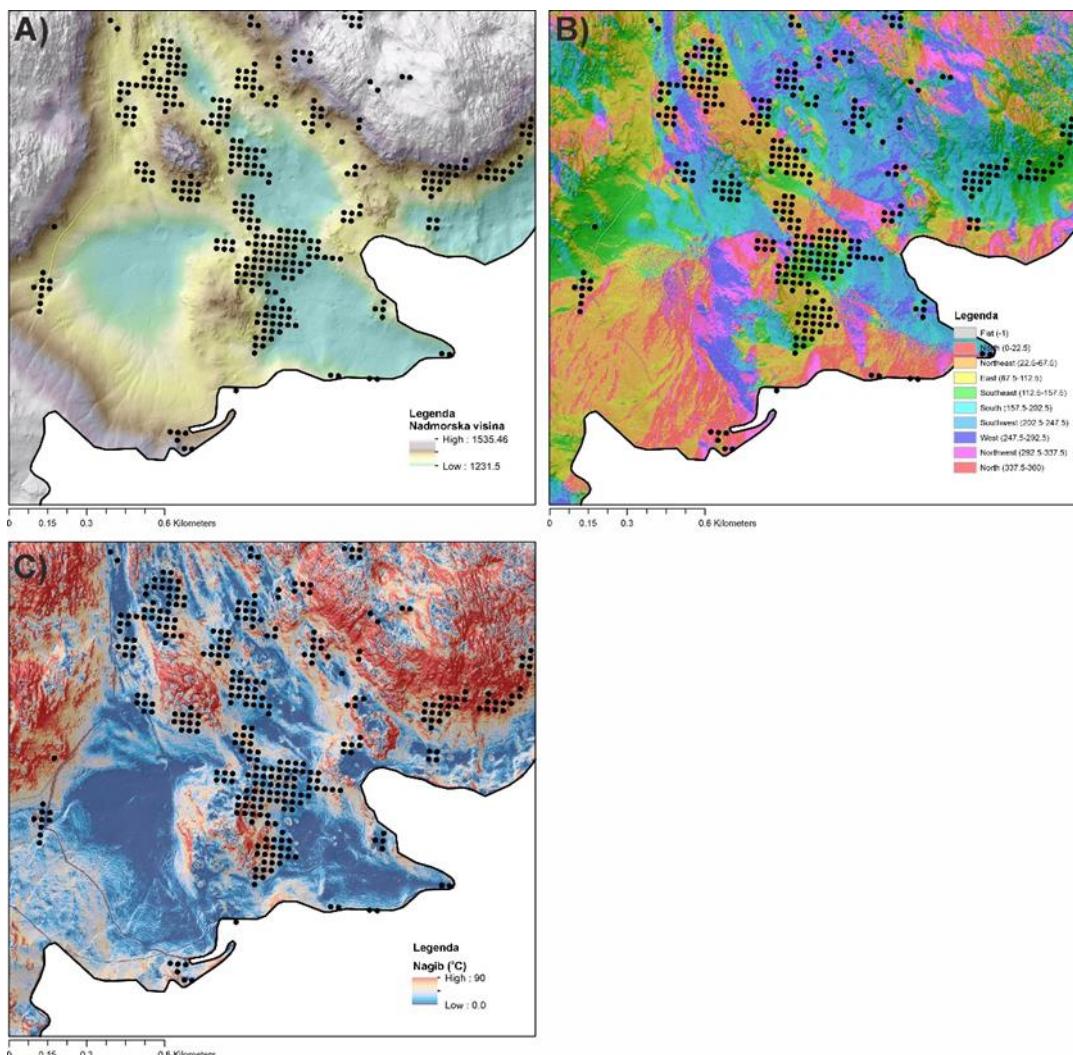
Za analizu vegetacijskih promjena ključni prediktor bio je Normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI), izračunat za svaku pojedinu satelitsku snimku. NDVI je omogućio kvantifikaciju promjena u fotosintetski aktivnoj vegetaciji te identifikaciju područja smanjenog vegetacijskog pokrova, što je od presudne važnosti za ranu detekciju i praćenje nepogoda izazvanih biotskim stresorima u ovom slučaju potkornjaka.



Slika 33. Prikaz postavljenih pokusnih ploha i transekata unutar zaštićenog područja i područja gospodarskih šuma, narančastom bojom označene površine zahvaćene sušenjem (gore) i Usporedba klasifikacije (crveni grid) LANDSAT-ovih snimaka s vizualno interpretiranim progalarmama (dijelovima sastojina odumrlih djelovanjem potkornjaka) digitaliziranim na ortofotosnimcima (bijeli poligoni) (dolje).

4.6.3. Analiza utjecaja geomorfoloških čimbenika na odumiranje smreke

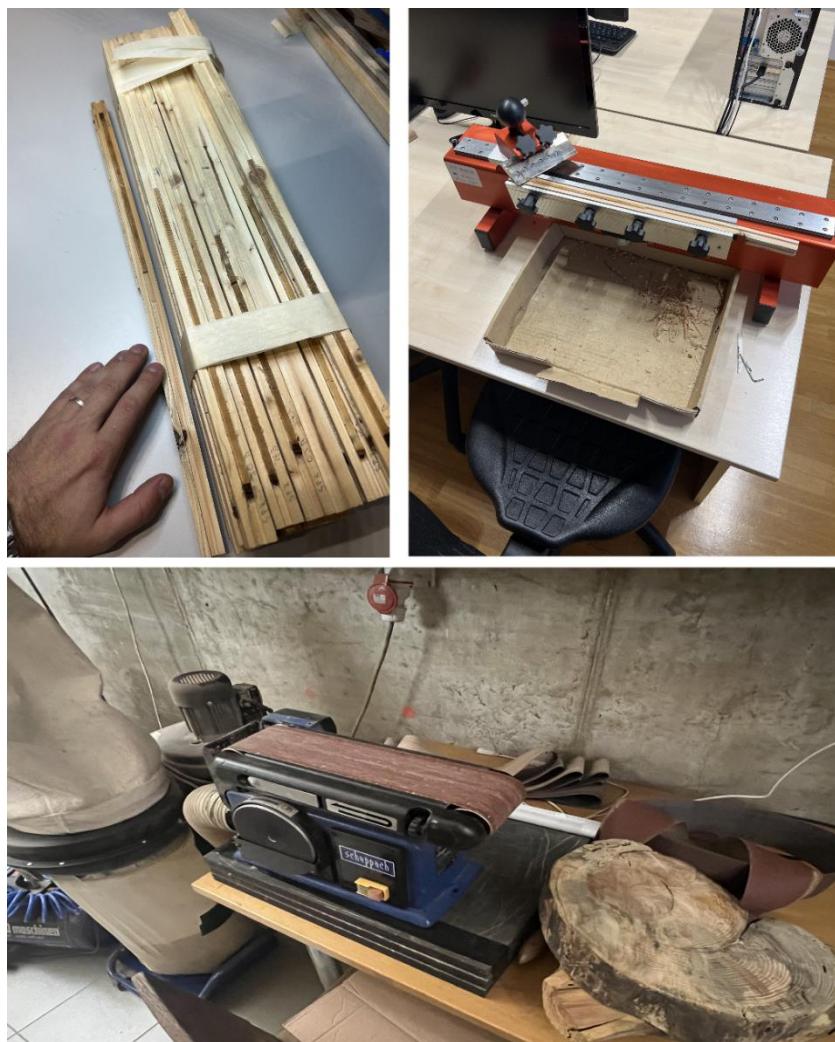
Za svaku prostornu jedinicu (raster dimenzija 30 x 30 m) koji predstavljaju odumrla područja po godinama dobiveni ekstrahirani su podaci s digitalnog modela terena dobiveni multisenzorskim zračnim snimanjem Republike Hrvatske (2023) i to: nadmorske visine, ekspozicije i nagibi terena. Ovi podaci su poslužili za analizu frekvencija pojave sušenja prema navedenim geomorfološkim čimbenicima kao i usporedbu s površinama koje nisu zahvaćene odumiranjem.



Slika 34. Detalj područja istraživanja s položajem odumrlih sastojina (crne točke) prema nadmorskim visinama A), ekspoziciji B) i nagibu terena C).

4.6.4. Istraživanja osjetljivosti i otpornosti šuma obične smreke na klimatske promjene u prošlosti

Proces pripreme uzoraka za dendrokronološke analize proveden je u Laboratoriju za dendroekologiju Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Uzorci su najprije izvađeni iz transportnih spremnika, te su ostavljeni na sušenje na sobnoj temperaturi tijekom 24 sata kako bi se stabilizirali za daljnju obradu. Po završetku sušenja, uzorci su zalijepljeni na drvene podloške. Brušenje je provedeno na tračnoj brusilici, koristeći brusni papir različitih granulacija, od grubljih (100) do finijih (600), čime je osigurana glatka i ujednačena površina uzorka. Nakon osnovne pripreme, uzorci su dodatno obrađeni pomoću uređaja Core Microtome (WSL) koji omogućava visokoprecizno rezanje i izradu uzoraka s jasno vidljivim godovima. Ova završna faza mehaničke pripreme značajno poboljšava kvalitetu uzorka.



Slika 35. Mehanička priprema prikupljenih uzoraka

Mehanički pripremljeni uzorci digitalizirani su pomoću sustava ATRICS (Advanced Tree Ring Image Capturing System) (Levanić, 2007), koji omogućava visokoprecizno digitalno bilježenje širine godova. Sustav ATRICS sastoji se od automatiziranog mjernog stola (Isel MS200HT), binokularnog mikroskopa (Zeiss Stemi 305) i digitalne kamere (Infinity Lumenera 1), povezanih s računalom. Tijekom procesa digitalizacije, serije fotografija uzetih automatskim pomicanjem mjernog stola spojene su u jedinstveni kompozit, čime se dobiva cjeloviti digitalni prikaz svakog uzorka. Radi osiguravanja točnosti pri očitavanju širina godova, na uzorcima je postavljeno kalibracijsko stakalce. Ovo stakalce omogućuje preciznu konverziju dimenzija iz piksela u stotinke milimetra.

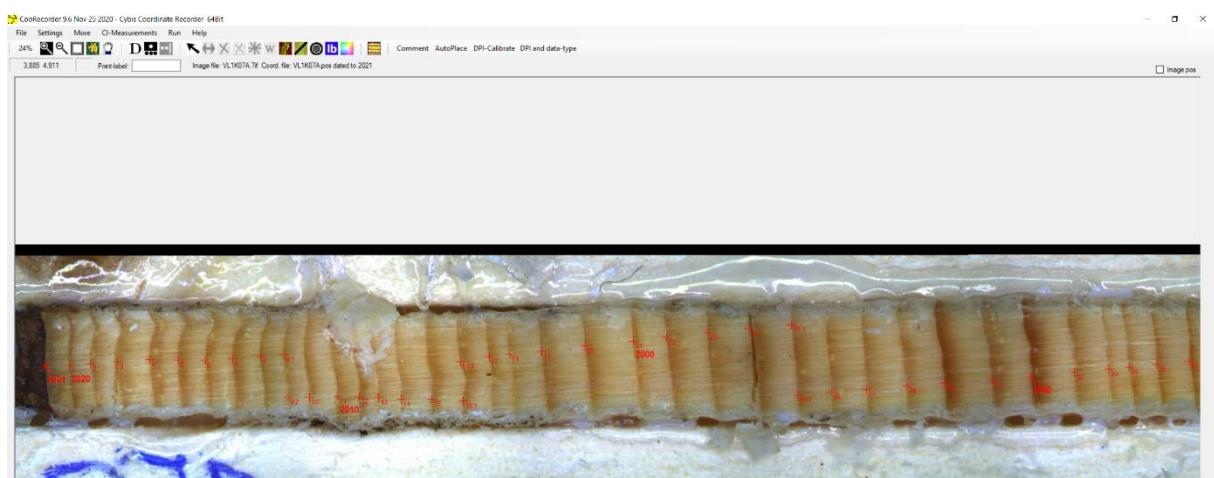


Slika 36. Analiza skeniranih uzoraka pomoću sustava ATRICS

4.6.4.1. Očitavanje širina godova i procjena kambijalne starosti

Širine godova (Tree Ring Widths, TRW) određene su korištenjem specijaliziranih softverskih alata CooRecorder i CDendro (www.cybis.se), koji su standardni alati u

području dendrokronoloških istraživanja. Ovi softverski paketi omogućuju visoku razinu preciznosti (0,01 mm). Softver koristi princip kontrasta između ranog i kasnog drveta za automatsko prepoznavanje granica godova, što se pokazalo vrlo učinkovitim kod uzorka s jasnom razlikom u gustoći drvnih elemenata. Međutim, kod uzorka s izrazito uskim godovima ili složenom anatomskom strukturu, precizniji rezultati postižu se ručnim određivanjem granica pojedinih godova. Ova metoda, iako vremenski zahtjevnija, osigurava veću točnost u situacijama gdje automatsko očitavanje nije pouzdano.



Slika 37. Prikaz očitavanja širine godova na uzorku

Starost svakog uzorka, odnosno pripadajućeg stabla, određuje se analizom širina godova. Pri uzorkovanju često nije moguće savršeno pogoditi geometrijsku os stabla niti precizno odrediti položaj središta stabla. U takvim slučajevima starost uzorka procjenjuje se interpolacijom na temelju položaja geometrijskog centra stabla, uzimajući u obzir prosječne širine godova posljednjih 5–10 godina (Slika xxx). Ovom metodom omogućuje se pouzdana procjena starosti stabla na prsnoj visini, odnosno na visini na kojoj je uzorak prikupljen. Takav pristup osigurava dovoljnu razinu točnosti za potrebe dendrokronoloških istraživanja, unatoč mogućim odstupanjima uzrokovanim nepravilnostima pri uzorkovanju.

4.6.4.2. Datiranje očitanih serija širina godova

Proces uklapanja dobivenih serija širina godova u valjani vremenski okvir (*cross-dating*) započinje određivanjem posljednje godine rasta za svaki uzorak, čime se postavlja vremenska referenca za daljnje analize. Kod živih stabala, godina

posljednjeg goda obično je lako utvrdiva, osobito ako su uzorci uzimani tijekom perioda mirovanja vegetacije, što je preporučeni postupak. Međutim, uzorkovanje tijekom vegetacije, primjerice u ljetnim mjesecima, može izazvati nejasnoće zbog varijacija u vremenu početka i trajanja formiranja novog goda kod različitih vrsta drveća. Datiranje serija širina godova provedeno je pomoću programa TSAP-Win™ (www.rinntech.de), koristeći t-vrijednosti koeficijenta korelacije prema Baillie i Pilcheru, (1973) i Gleichläufigkeit (GLK) koeficijent prema Schweingruberu, (1988). Nakon početnog datiranja, kontrola kvalitete provedena je u programu COFECHA (Holmes, 1983), čime su verificirane točnosti izmjerениh serija. Datiranje započinje usporedbom serija dvaju uzoraka s istog stabla, što je omogućuje smanjenje pogrešaka uzrokovanih oštećenjem uzoraka, nedovoljno kvalitetnom pripremom ili ljudskom greškom. Nakon toga, proveden je postupak usporedbe svih verificiranih serija unutar pokusne plohe ili lokaliteta. Na temelju ovih usporedbi, svi parovi serija uprosječeni su na razini pojedinog stabla kako bi se formirala stabilna individualna kronologija.

Kod odumrlih stabala postupak je složeniji zbog nepoznate godine posljednjeg goda. U tim slučajevima korištene su analize u programima TSAP-Win™ i COFECHA, koje su omogućile prepoznavanje podudarnosti između kronologija na temelju statističkih metoda i vizualnih kriterija. Ovakav pristup osigurava pouzdano uklapanje serija u kronološki okvir te postavljanje temelja za daljnje dendrokronološke analize.

4.6.4.3. Standardizacija serija širina godova

Standardizacija podataka provodi se kako bi se uklonila varijabilnost niske frekvencije uzrokovana biološkim trendovima rasta stabala, gospodarskim zahvatima ili prirodnim nepogodama. Cilj standardizacije je očuvanje utjecaja klimatskih čimbenika na radijalni prirast stabala. Biološki trendovi rasta posebno su izraženi u ranim razvojnim stadijima stabala, kada je radijalni prirast intenzivniji zbog prirodnog rasta i smanjene konkurenциje. Takvi podaci često nisu prikladni za analize utjecaja klimatskih čimbenika, kao ni podaci iz godina s neobično velikim prirastima uzrokovanim strukturnim promjenama u sastojini, poput uklanjanja konkurentskih stabala tijekom gospodarskih aktivnosti ili nastalih progala nakon vjetroloma.

Uklanjanje neklimatskog signala i drugih "šumova" u podacima provedeno je korištenjem Spline funkcija s parametrima frekvencije od 60 godina, primijenjena na prethodno izračunate vrijednosti prirasta temeljnice (BAIspl.).

Sve analize provedene su u paketu dplR u programskom okruženju R (Bunn, 2008). Prije primjene standardizacije, za svaki uzorak stabilizirana je varijanca primjenom power funkcije kako bi se smanjio utjecaj heterogenosti varijance kroz serije podataka. Indeksne vrijednosti širina godova (RWI) izračunate su kao reziduali između izmjerениh vrijednosti širina godova i odgovarajuće funkcije rasta. Standardizirane serije širina godova uprosječene su u jedinstvene kronologije primjenom metode Tukey's biweight robust mean (Mosteller i Tukey, 1977) u programskom okruženju R. Ova metoda omogućila je uklanjanje ekstremnih vrijednosti koje bi mogle značajno utjecati na prosječnu vrijednost, čime su dobivene stabilne i pouzdane kronologije za daljnje analize.

Kvaliteta dobivenih kronologija procijenjena je korištenjem standardnih dendrokronoloških pokazatelja:

- Prosječna osjetljivost (MS): Mjeri varijabilnost iz godine u godinu unutar niza rasta stabala, definirana kao prosječna relativna razlika između širina susjednih godova (Douglass, 1920; Fritts, 1976). Ovaj pokazatelj odražava utjecaj stanišnih čimbenika na radijalni prirast.
- Standardna devijacija (SD): Opisuje varijabilnost podataka unutar kronologije; niže vrijednosti ukazuju na veću stabilnost niza.
- Autokorelacija prvog reda (AR1): Prikazuje ovisnost rasta u tekućoj godini o rastu iz prethodne godine, što je ključan aspekt za razumijevanje dinamike rasta stabala (Speer, 2013).
- Srednja međuserijska korelacija (Rbar): Mjeri sličnost između širina godova iz različitih uzoraka, što odražava konzistentnost signala unutar kronologije.
- Izraženi populacijski signal (EPS): Koristi se za procjenu pouzdanosti kronologije. Vrijednosti EPS-a iznad 0,85 ukazuju na visok stupanj reprezentativnosti kronologije u odnosu na hipotetsku populaciju (Wigley i dr., 1984).

Ovi pokazatelji omogućili su procjenu kvalitete i pouzdanosti kronologija, osiguravajući da one adekvatno predstavljaju rast populacije stabala. Tako dobivene kronologije služile su kao temelj za analizu klimatske osjetljivosti, omogućujući istraživanje odnosa između klimatskih čimbenika i radijalnog prirasta smreke.

4.6.4.4. Analiza utjecaja klime na radijalni prirast

Za analizu odnosa između indeksnih kronologija širina godova (RWI) i klimatskih čimbenika korišteni su podaci s obližnjih državnih hidrometeoroloških postaja i javno dostupnih baza. Podaci su preuzeti s postaje Zavižan (44.81° N, 14.97° E; nadmorska visina: 1594 m), najviše meteorološke postaje u Hrvatskoj, koja kontinuirano bilježi mjesecne količine oborina i prosječne mjesecne temperature zraka od 1954. godine do danas. Osim toga, korišteni su podaci s obližnje postaje Gospic (44.53° N, 15.38° E; nadmorska visina: 573 m), koja mjeri dugoročne klimatske podatke još od 1872. godine.

Klimatski podaci sa spomenutih postaja uspoređeni su s prostorno eksplizitnim podacima temperature i oborina iz baze E-OBS v25.0e prostorne rezolucije 0.25° (Haylock i dr., 2008) te homogenizirane baze CRU KNMI (Harris i dr., 2014) interpoliranim za područje istraživanja, kao i s prosječnim regionalnim vrijednostima. Dodatno, za analizu oborina korišteni su podaci iz baze GPCC v2020 analysis (land) prostorne rezolucije 0.25° (Markus i dr., 2022).

Kako bi se procijenio utjecaj suše na radijalni prirast, izračunate su vrijednosti SPEI indeksa (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), koji se temelji na mjesечноj razlici između količine oborina i potencijalne evapotranspiracije (PET). Indeks je izračunat pomoću paketa SPEI u programskom okruženju R (Vicente-Serrano i dr., 2013), pri čemu je za izračun PET-a korištena metoda Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) zbog ograničenosti klimatskih podataka. SPEI je multiskalarni indeks koji se koristi za procjenu suše, pri čemu pozitivne vrijednosti ukazuju na suficit vode, dok negativne vrijednosti predstavljaju deficit (sušu). Kako bi se utvrdio utjecaj klimatskih čimbenika na varijabilnost radijalnog prirasta smreke, izračunati su jednostavni linearni korelacijski koeficijenti (Pearson's) između indeksnih kronologija širina godova (RWI) i odabranih mjesecnih vrijednosti klimatskih čimbenika (sume oborina, prosjeci temperatura i SPEI za 1 i 3 mjeseca) od lipnja prethodne godine do listopada tekuće godine. Analiza je provedena pomoću paketa *treeclim* u programskom okruženju R (Zang i Biondi, 2015). Uz korelaciju mjesecnih vrijednosti, izračunati su i korelacijski koeficijenti za prosječne sezonske vrijednosti klimatskih čimbenika za različite duljine sezona (3 mjeseca).

Pored osnovnih analiza, procijenjena je i stabilnost klimatskog signala pomoću pomičnih korelacija duljine od 30 godina s pomakom od jedne godine, što je omogućilo uvid u promjene osjetljivosti kroz vrijeme (Zang i Biondi, 2015).

Posebna pažnja posvećena je klimatskoj osjetljivosti s obzirom na nadmorsku visinu istraživanih ploha (1000–1600 m), pri čemu je analiziran utjecaj klimatskih čimbenika na radijalni prirast na različitim nadmorskim visinama. Nadalje, uspoređena je klimatska osjetljivost između stabala koja su se prethodno osušila i stabala sa zdravim kontrolnim ploha.

4.6.4.5. Analiza dugoročnih trendova prirasta temeljnice (BAI)

Dugoročni trendovi rasta stabala analizirani su na temelju vremenskih serija godišnjeg prirasta temeljnice (Basal Area Increment, BAI). Prirast temeljnice izračunat je primjenom funkcije bai.in iz paketa dplR u programskom okruženju R (Bunn A, i dr., 2021). Ova metoda omogućila je precizan izračun godišnjeg prirasta temeljnice na temelju serija širina godova i izmjerениh prsnih promjera (Diameter at Breast Height, DBH).

Pojedinačne serije prirasta temeljnice integrirane su u kronologije na razini svake pokusne plohe, čime su dobivene BAI kronologije specifične za različite ekološke uvjete i gospodarske intervencije.

4.6.5. Izračun strukturnih parametara sastojina

Strukturne značajke istraživanih ploha izražene su kroz gustoću stabala (N, kom/ha), temeljnici (G, m²/ha) i volumen (V, m³/ha). Parametri strukturalnih elemenata obrađeni su primjenom standardnih metoda izračuna temeljnice i volumena sastojina. Za izračun volumena stabala korištena je Schumacher-Hall formula.

Na svakoj pokusnoj plohi konstruirane su visinske krivulje, koje su služile za procjenu volumena stabala uklonjenih tijekom sanitarnog sijeka. Izmjereni opsezi panjeva preračunati su u promjere, a zatim su korištenjem odgovarajuće formule izračunati promjeri na visini od 1,3 m. Na temelju tih podataka te visinskih krivulja izračunati su volumeni uklonjenih stabala.

4.6.6. Analiza prirodne obnove

Prirodna obnova analizirana je kroz strukturu ponika i pomlatka. Svaka jedinka zabilježena na pokusnim plohamama identificirana je prema vrsti te je dodijeljena odgovarajućoj dobnoj i visinskoj kategoriji, sukladno kriterijima definiranim u poglavljju 4.5.2. Na temelju prikupljenih podataka za svaku pokusnu plohu izračunata je pokrovnost pojedinih vrsta, te su vrijednosti preračunate na hektarsku razinu.

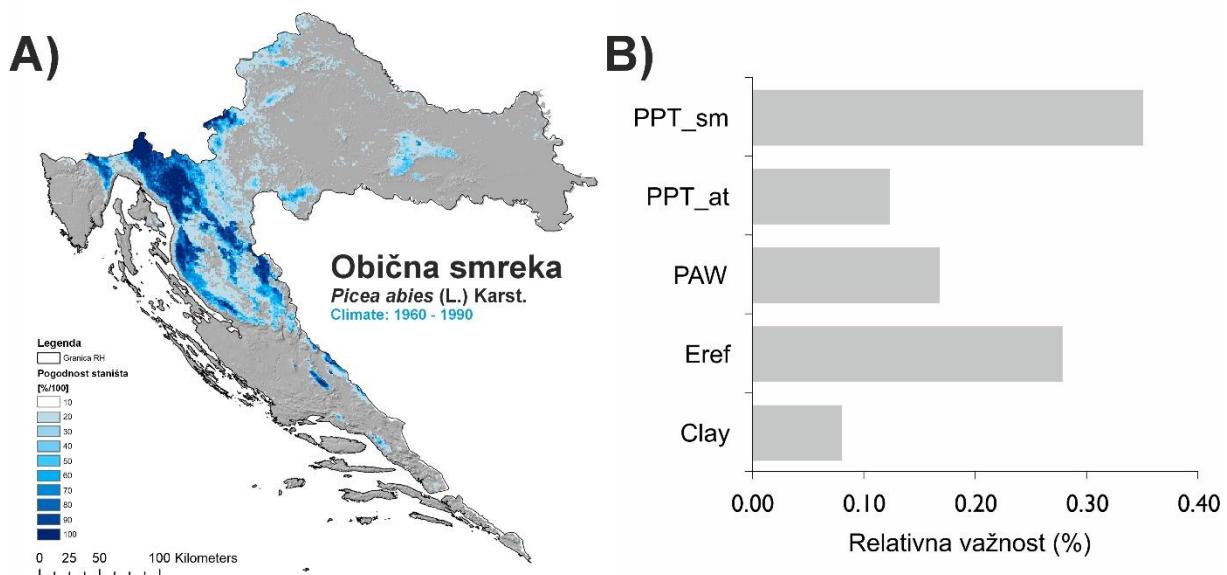
Uz analizu utjecaja nadmorske visine i ekspozicije terena na uspješnost prirodne obnove, provedena je i usporedba prirodne obnove između sastojina zahvaćenih sušenjem i zdravih sastojina. Analiziran je uspjeh prirodne obnove u sastojinama zahvaćenim sušenjem koje nisu sanirane (područja NPSV) u odnosu na sastojine koje su zahvaćene sušenjem i koje su sanirane.

Statističkim metodama procijenjeni su značajni utjecaji različitih faktora, uključujući sanitarnu intervenciju. Posebna pažnja posvećena je razlikama u pokrovnosti, vitalnosti i distribuciji ponika i pomlatka između analiziranih ploha.

5. REZULTATI

5.1. Utjecaj klimatskih promjena na pogodnost staništa obične smreke u Hrvatskoj

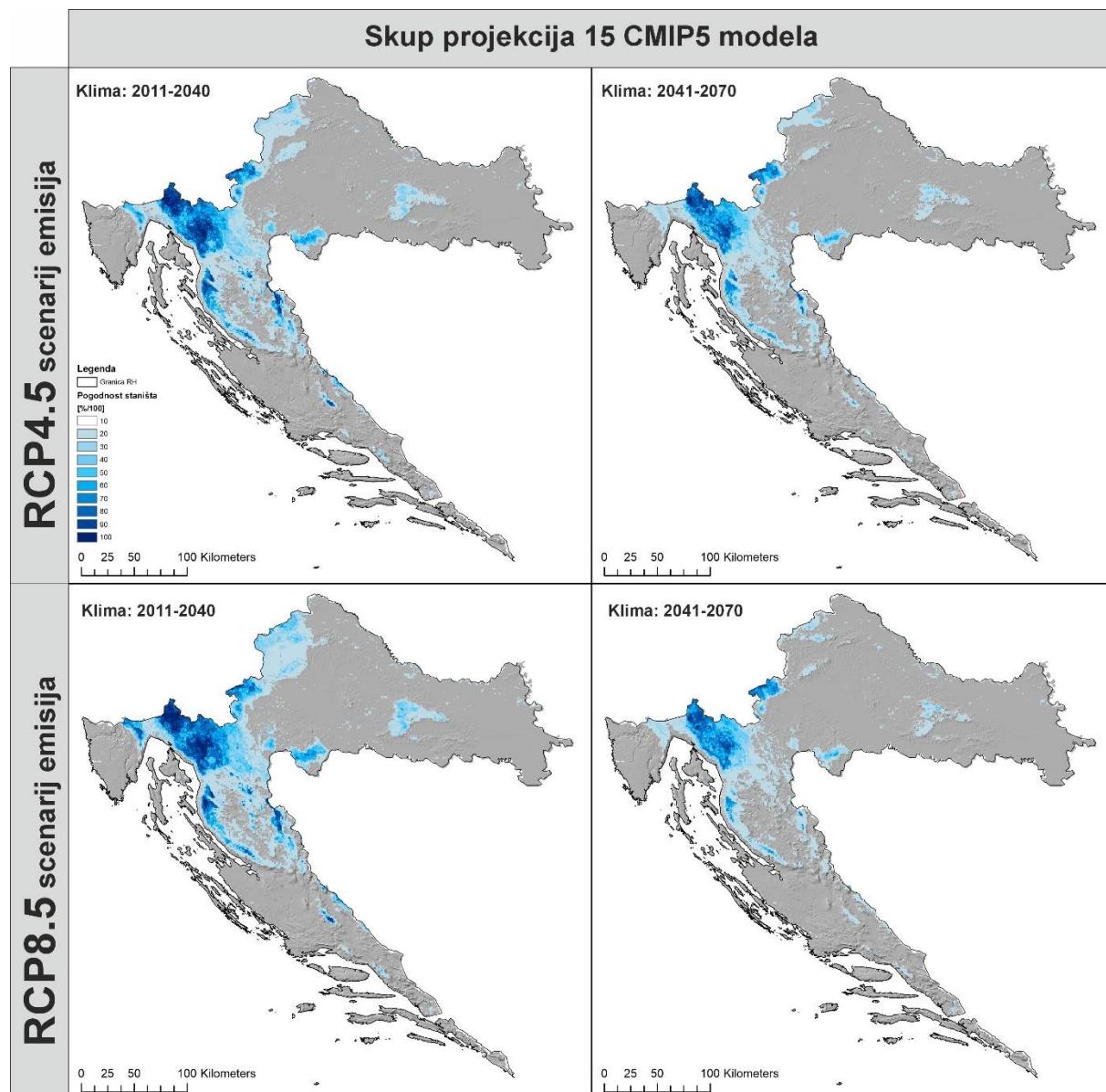
Slika 35 prikazuje trenutnu pogodnost staništa obične smreke za referentno klimatsko razdoblje od 1960.-1990. Rezultati modela dobro koreliraju s njezinom stvarnom rasprostranjenosću, što potvrđuje njegovu pouzdanost u procjeni ekoloških uvjeta pogodnih za rast ove vrste.. Najvažniji ekološki čimbenici koji određuju pogodnost staništa obične smreke su ukupna količina oborina u ljetu (PPT_sm), Evaporacija (Eref) i kapacitet tla za vodu (PAW) (Slika 38B).



Slika 38. Projekcija prostorne razdiobe trenutne pogodnosti staništa obične smreke u Hrvatskoj. Tamno plavom bojom označena su područja visoke pogodnosti staništa obzirom na promatrane okolišne čimbenike A) te najvažniji ekološki prediktori koji određuju pogodnost staništa B)

Buduće projekcije pogodnosti staništa obične smreke u Republici Hrvatskoj, temeljene na dvama scenarijima emisija stakleničkih plinova (RCP4.5 i RCP8.5), ukazuju na značajan gubitak pogodnih staništa, osobito u istočnom dijelu Dinarida (Slika 39). Predviđa se da će trenutačno južni i istočni dijelovi rasprostranjenosti smreke u Hrvatskoj, uključujući područja južnog Velebita, Ličke Plješivice te Velike i Male Kapele, postati manje pogodna ili potpuno nepogodna za rast ove vrste, osobito u drugom promatranom razdoblju (2041.–2070.) u oba scenarija. S druge strane,

područje Gorskog kotara te pojedini dijelovi sjevernog Velebita i dalje će zadržati uvjete koji omogućuju rast i opstanak smreke (Slika 39).



Slika 39. Buduće projekcije pogodnosti staništa za običnu smreku u Republici Hrvatskoj za dva scenarija emisija (RCP4.5 i RCP8.5) za dva razdoblje (od 2011 – 2040. godine, od 2041. – 2070. godine). Plavom bojom su označena područja visoke pogodnosti staništa u rasponu od 0 do 1000 (odnosno od 0-100%)

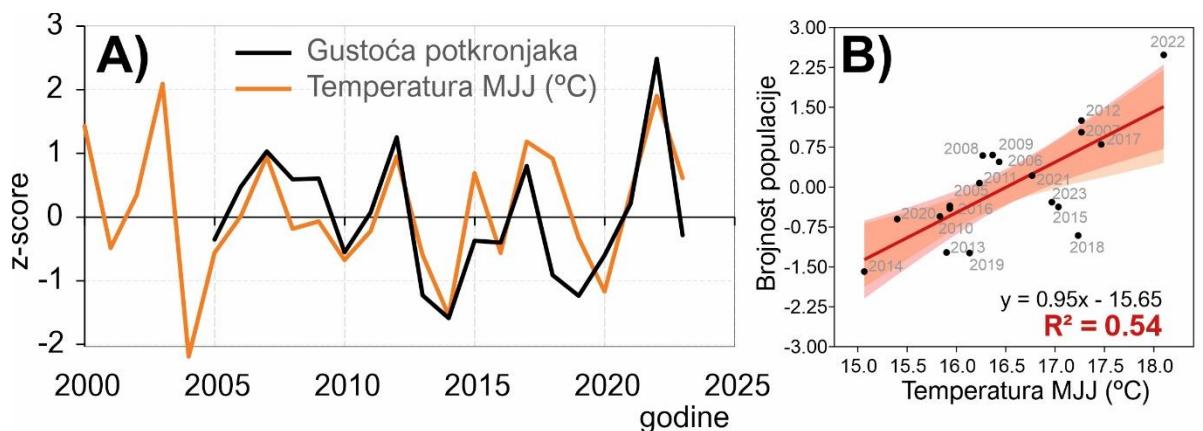
5.2. Dinamika populacije potkornjaka

Rezultati linearne regresije između brojnosti populacije potkornjaka (*Ips typographus* L.) (izražene u broju jedinki) i klimatskih podataka preuzetih iz prostorno eksplisitne baze E-OBS 30, koji obuhvaćaju prosječne maksimalne temperature zraka od svibnja do srpnja za razdoblje 2005. – 2023. godine, prikazani su na slici 40A.

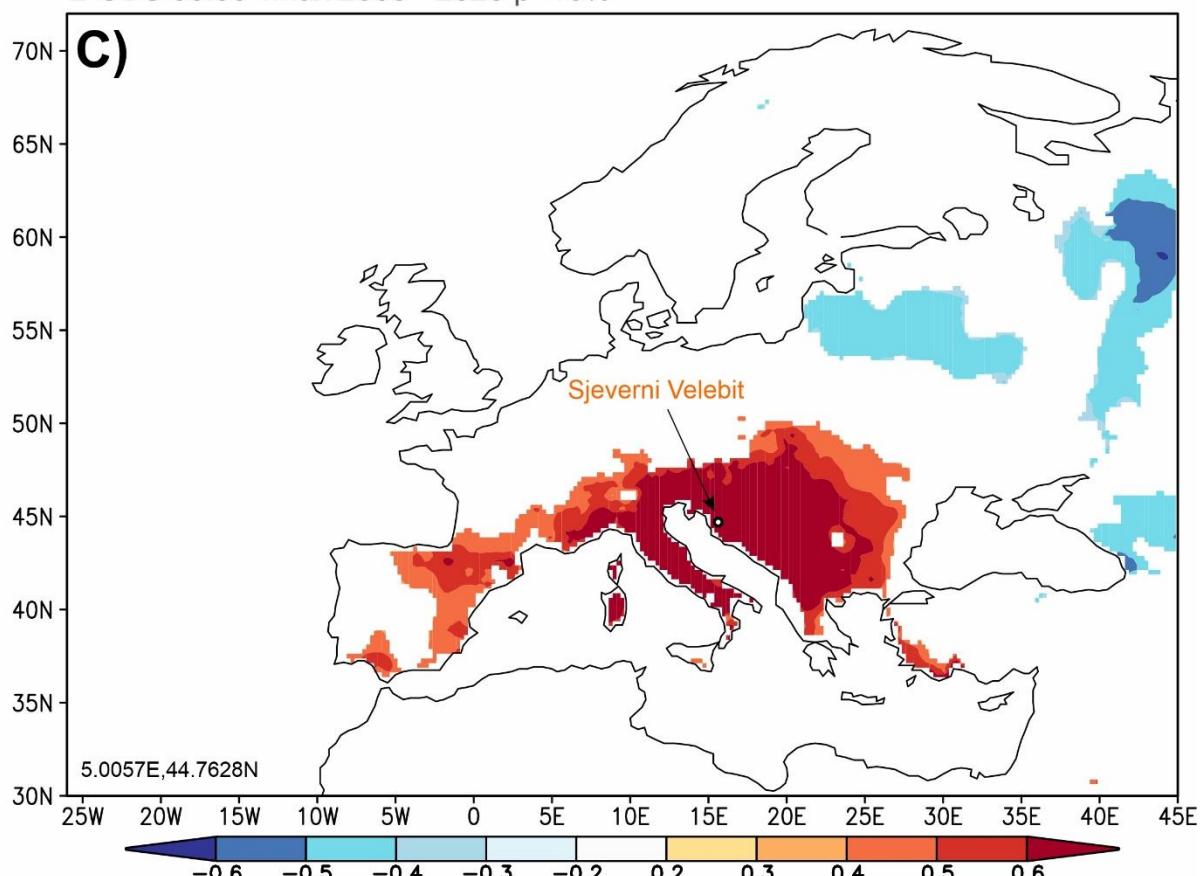
Analiza je pokazala postojanje značajne statističke povezanosti između prosječnih maksimalnih ljetnih temperatura zraka i međugodišnje varijabilnosti brojnosti potkornjaka na području sjevernoga Velebita. Ukupna objašnjena varijabilnost gustoće populacije potkornjaka pomoću temperature zraka iznosi 54%. Statistički pokazatelji linearog regresijskog modela potvrđuju visoku pouzdanost modela ($R = 0,73$; $R^2 = 0,54$; $t = 4,4478$; $p = 0,0004$).

Godine s najvećom brojnošću populacije potkornjaka bile su 2007., 2012., 2017. i 2022. Prosječna brojnost populacije za razdoblje 2005. – 2023. iznosi približno 242 156 jedinki, pri čemu povećanje ljetnih temperatura zraka za 1 °C iznad prosječne vrijednosti rezultira porastom brojnosti populacije za oko 92 500 jedinki.

Prostorna korelacija (Slika 40C) pokazuje prostorni obuhvat regresijskog modela između temperature zraka i brojnosti populacije potkornjaka za promatrano razdoblje. Rezultati upućuju na to da su maksimalne ljetne temperature zraka na širem području jugoistočne Europe dobar prediktor varijabilnosti brojnosti populacije potkornjaka.

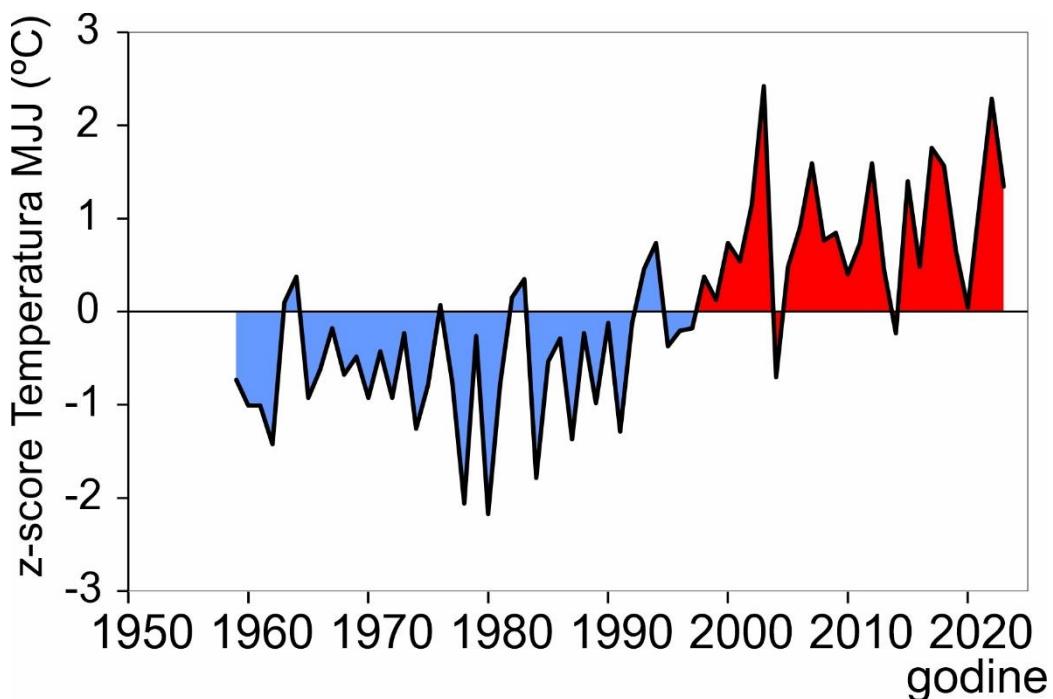


Korelacija May - Jul prosječne temperature zraka i gustoće potkornjaka
E-OBS 30.0e Tmax 2005 - 2023 p<10%



Slika 40. Odnos između prosječnih maksimalnih (svibanj – srpanj) temperatura zraka (Tmax) i gustoće populacija potkornjaka (*Ips typographus*) za razdoblje od 2005 – 2023. godine A). Linearni modeli između prosječnih temperatura zraka gustoće potkornjaka B) te prostorna korelacija s ljetnim temperaturama zraka C).

U razdoblju od 1958. do 2023. godine ljetne temperature zraka kretale su se u rasponu od minimalnih $12,73^{\circ}\text{C}$ do maksimalnih $18,26^{\circ}\text{C}$ (Slika 41). Prosječna ljetna temperatura zraka za razdoblje 1959. – 2023. iznosi $15,35^{\circ}\text{C}$. Međutim, u promatranom razdoblju evidentno je značajno povećanje prosječnih ljetnih temperatura zraka. Posljednja tri desetljeća (od 1992. godine) bila su iznadprosječno topla u odnosu na cjelokupno analizirano razdoblje, pri čemu su pojedine godine – poput 2003., 2022., 2017., 2007., 2012. i 2018. – bile osobito toplije od prosjeka. Rezultati Mann-Kendallove testa trenda ukazuju na statistički značajan rast ljetnih temperatura zraka u promatranom razdoblju ($S = 1099$, $Z = 6,2181$, $p = 5,0323\text{E-}10$), što potvrđuje dugoročnu tendenciju zatopljenja.



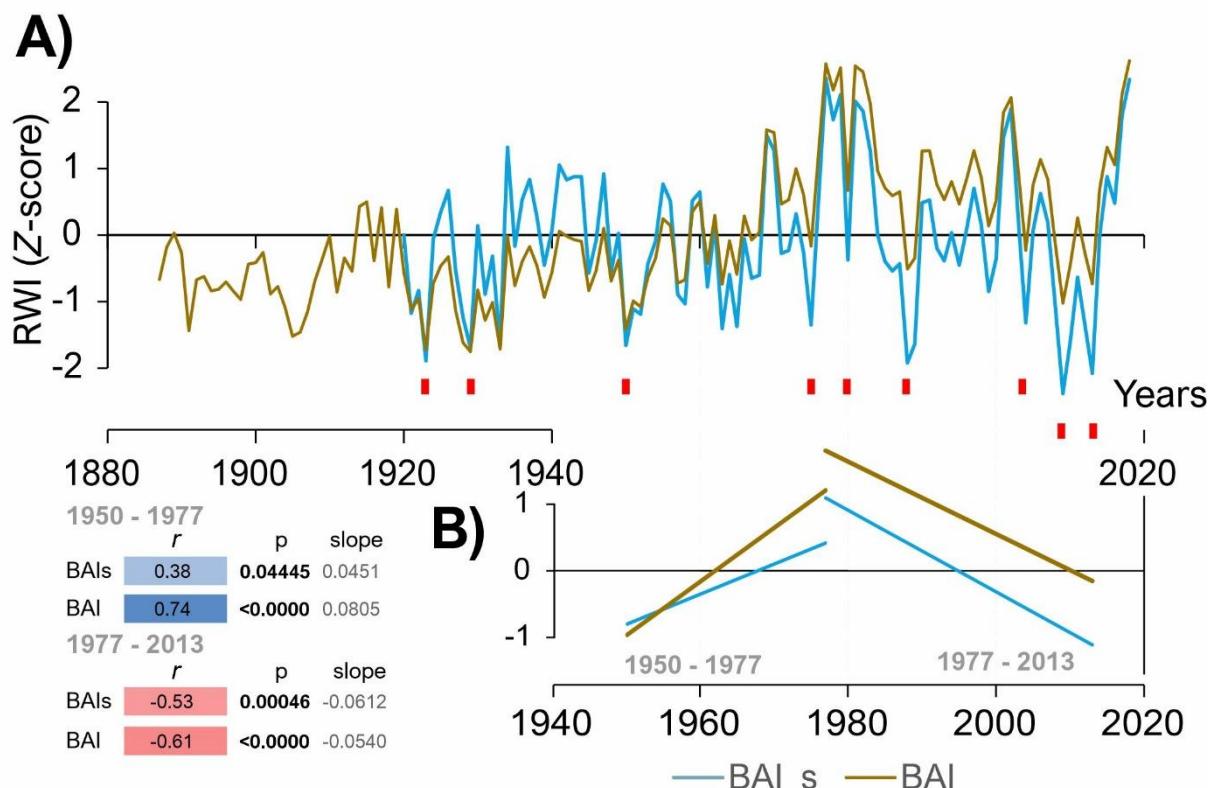
Slika 41. Standardno odstupanje od prosječnih ljetnih maksimalnih temperatura zraka (od svibnja do srpnja) za razdoblje od 1959 – 2023. godine. Crvenom bojom su označene godine s većima plavo s manjim temperaturama zraka od prosječnih vrijednosti za promatrano razdoblje

Tablica 4. Godine s najvećom vrijednosti ljetnih temperatura zraka (MJJ) na području sjevernoga Velebita.

God.	S	V	O	T	S	L	S	K	R	L	S	P	MJJ	z
2003	-	-	4.6	7	15.	18.	20.	22.	14.	6.9	9	0.9	18.27	2.42
	1.6	2.8			6	8	4	2	1			-		
				10.	13.	17.	20.	18.	12.		2.			
2007	3.1	3.4	5.2	8	7	8	3	4	7	8.3	7	1.2	17.27	1.59
	-	-			12.	18.	20.	21.	15.		6.	-		
2012	0.4	4.2	7.1	7.7	7	5	6	4	6	9.8	7	0.7	17.27	1.59
					13.		20.	21.	12.	10.	3.	-		
2017	-4	2.6	6.9	7.6	2	19	2	3	5	1	9	0.1	17.47	1.76
		-		11.	14.	17.	19.	21.	16.	11.	6.			
2018	2.1	3.1	1.9	2	6	3	8	1	4	3	2	0.2	17.23	1.57
	-				14.	19.	20.		14.	12.	5.			
2022	0.1	3	3.1	7.1	2	3	8	20	6	5	8	3.7	18.10	2.29

5.3. Dinamika radijalnog rasta stabala

Na slici 42A) prikazani su dugoročni trendovi rasta stabala koji su analizirani na temelju vremenskih serija godišnjeg prirasta temeljnice (BAI) i standardiziranih vrijednosti godišnjeg prirasta temeljnice (BAI_s) za razdoblje u kojem je EPS > 0.85 (od 1887 – 2018. godine). Obzirom na varijabilnost vrijednosti kronologija uočavamo godine i razdoblja iznad i ispodprosječnog rasta. Najmanje ispodprosječne vrijednosti utvrđene su u recentnom razdoblju i to u godinama 2009 i 2013 no i niz drugih godina kao što su: 2003, 1988, 1980, 1975, 1950, 1929, 1923, 1906 i 1891 (Slika 42A). Također uočavamo i niz godina iznadprosječnog rasta kao što su: 2001, 1990, 1981, 1977, 1976, 1969, 1934 i 1919. Iz oblika trenda varijabilnosti kronologija uočavamo izražena razdoblja pozitivnog trenda od 1950 – 1977 godine te negativnog trenda od 1977 – 2013 godine (Slika 42B).



Slika 42. Regionalna kronologija (prosjek kronologija svih istraživanih lokaliteta) prirasta temeljnice BAI - Basal Araea Increment (smeđa boja) i standardizirana kronologija prirasta temeljnice BAI_s – Basal Araea Increment u kombinaciji sa spline 60 godina A) i linearni trendovi za razdoblje od 1950 - 1977 i od 1977 - 2013. godine sa pripadajućim statističkim pokazateljima B).

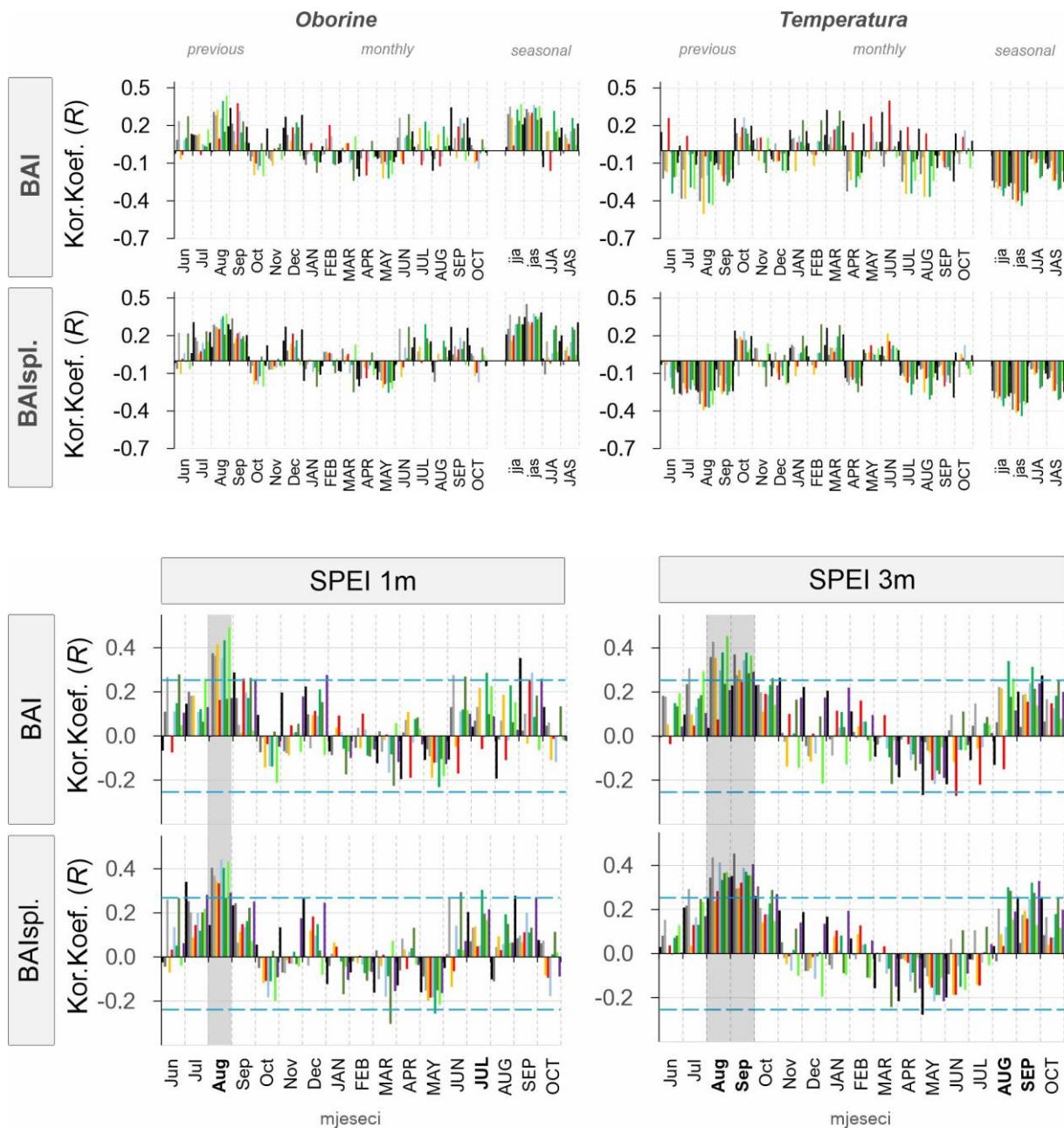
Analizom trendova utvrđeno je da sve kronologije pokazuju značajni ($p < 0.05$) trend pada od 1977 – 2013 godine osim kronologije sa lokaliteta Icinac (P01) i lokaliteta Škrbine drage- Lubenovaca (P05) dok u razdoblju od 1950 – 1977 samo kronologije sa lokaliteta Krajačev kuk (P04) ne pokazuju značajni trend rasta (Tablica 5).

Tablica 5. Osnovni statistički podaci o varijabilnosti kronologija za dva promatrana razdoblja

Span	Plot	Slope	Error	Intercept	Error	r	p
1977- 2013	P01	-0.017	0.014	34.44	28.43	-0.20	0.2468
	P02	-0.077	0.010	153.35	19.79	-0.79	4.29E-09
	P03	-0.075	0.012	149.50	24.12	-0.72	4.35E-07
	P04	-0.043	0.012	85.93	24.47	-0.51	0.0013
	P05	-0.013	0.014	25.68	28.20	-0.15	0.3798
	P06	-0.037	0.009	74.95	17.53	-0.58	0.0002
	P07	-0.043	0.010	86.65	20.23	-0.58	0.0002
	P08	-0.026	0.007	52.38	13.04	-0.55	0.0004
	P09	-0.060	0.014	119.97	27.10	-0.60	9.16E-05
	P10	-0.033	0.012	67.66	23.46	-0.43	0.0075
Span	Plot	Slope	Error	Intercept	Error	r	p
1950- 1976	P01	0.037	0.012	-72.87	23.77	0.52	0.0054
	P02	0.066	0.011	-129.39	22.42	0.75	5.42E-06
	P03	0.100	0.019	-196.97	37.19	0.73	1.74E-05
	P04	-0.017	0.015	33.55	29.13	-0.22	0.2683
	P05	0.054	0.013	-106.90	24.86	0.65	0.0002
	P06	0.049	0.014	-96.16	27.86	0.57	0.0020
	P07	0.049	0.016	-96.01	30.83	0.53	0.0044
	P08	0.037	0.005	-72.10	9.45	0.84	4.92E-08
	P09	0.060	0.019	-117.01	36.49	0.54	0.0036
	P10	0.096	0.011	-189.26	22.49	0.86	9.31E-09

5.4. Klimatska osjetljivost obične smreke

Jednostavni linearni (Pearsons) korelacijski koeficijenti (CC) između kronologija prirasta temeljnica (BAI i BAI_s) i odabranih klimatskih čimbenika (srednje mjesecne temperature zraka, suma oborina po mjesecima te indeks suše za 1 i 3 mjeseca, SPEI1m i SPEI 3m) napravljeni su za svaki lokalitet (kronologiju) posebno. Rezultati analize između klimatskih varijabli i kronologija ukazuju na značajnu ($p < 0,05$) pozitivnu korelaciju rasta s oborinama (Prec) i indeksom suše (SPEI) te negativnu korelaciju s temperaturama zraka (Temp) u ljetu prethodne i tekuće godine. Statistički značajne korelacije ($p < 0,05$) utvrđene su gotovo na svim istraživanim lokalitetima za temperaturu (Temp), oborine (Prec) i indeks suše (SPEI) u pojedinačnim mjesecnim, kao i sezonskim vrijednostima za 3-mjesečni interval u razdoblju 1954. – 2018. Ako uspoređujemo standardizirane vrijednosti prirasta temeljnica (BAI_s) i nestandardizirane vrijednosti obje kronologije pokazuju podjednake vrijednosti korelacijskih koeficijenata s klimatskim čimbenicima. Najveće vrijednosti korelacijskih koeficijenata su utvrđene korištenjem nestandardizirane kronologije (BAI) i to s temperaturom zraka u ljetu (jasT) prethodne godine ($R = -0,43$ prosjek za sve lokalitete). Generalno govoreći od pojedinačnih mjeseci kolovoz prethodne godine ima najviše vrijednosti korelacija, premda su značajne one u maksimumu ne prelaze vrijednosti veće od $R=0,44$ za oborine kao ni $R= -0,52$ za temperaturu zraka i $R=0,51$ za SPEI. Vrijednosti koeficijenta korelacije su više promatraljući 3-mjesečne sezonske vrijednosti u ljetnom periodu prethodne godine (jja-jas).

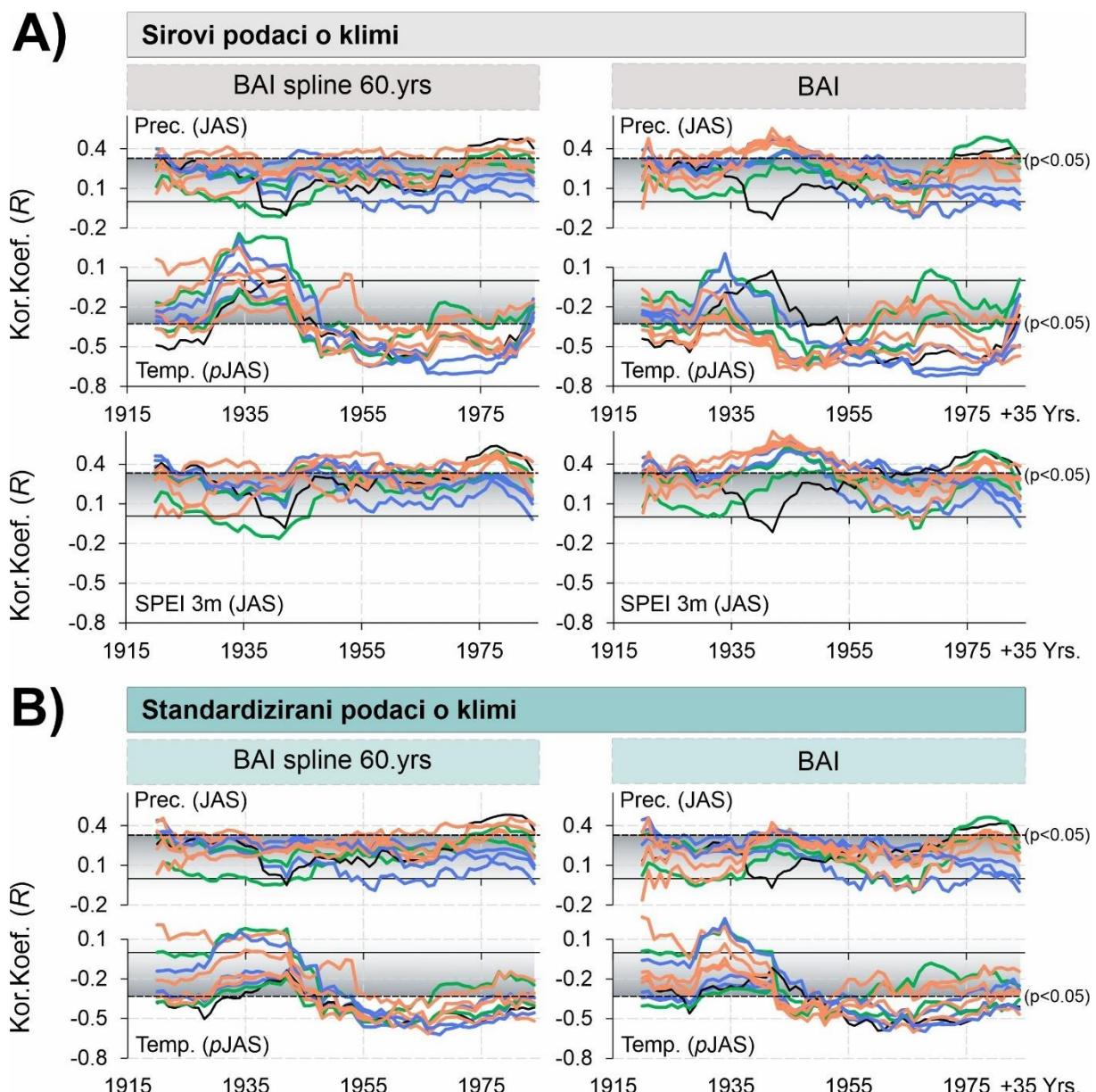


Slika 43. Vrijednosti jednostavnog linearne (Pearson) koeficijenta korelaciije (R) između odabralih klimatskih čimbenika: temperature zraka (TEMP) sume oborina (PREC) i indeksa suše (SPEI) i prirasta temeljnice (BAI i BAI_s) za svaku plohu zasebno za razdoblje od 1954. – 2018. godine

Pomične korelacije napravljene su za 35 godišnji period s pomakom od jedne godine za vrijednosti klimatskih elemenata koje su se pokazale najznačajnije u analizi klimatske osjetljivosti i to: suma oborina u 3 mjeseca (srpanj-rujan), prosječnu vrijednost temperature zraka za 3 mjeseca (srpanj-rujan prethodne godine) te indeks suše (SPEI) za sezonske vrijednosti u ljetu tekuće godine (srpanj-rujan) (Slika 44A). Pomične korelacije su napravljene koristeći klimatske podatke iz homogenizirane baze

CRU KNMI (climexp.knmi.nl) koje smo standardizirali kako bismo dobili uvid u stabilnost što dulje u prošlost (Slika 44B).

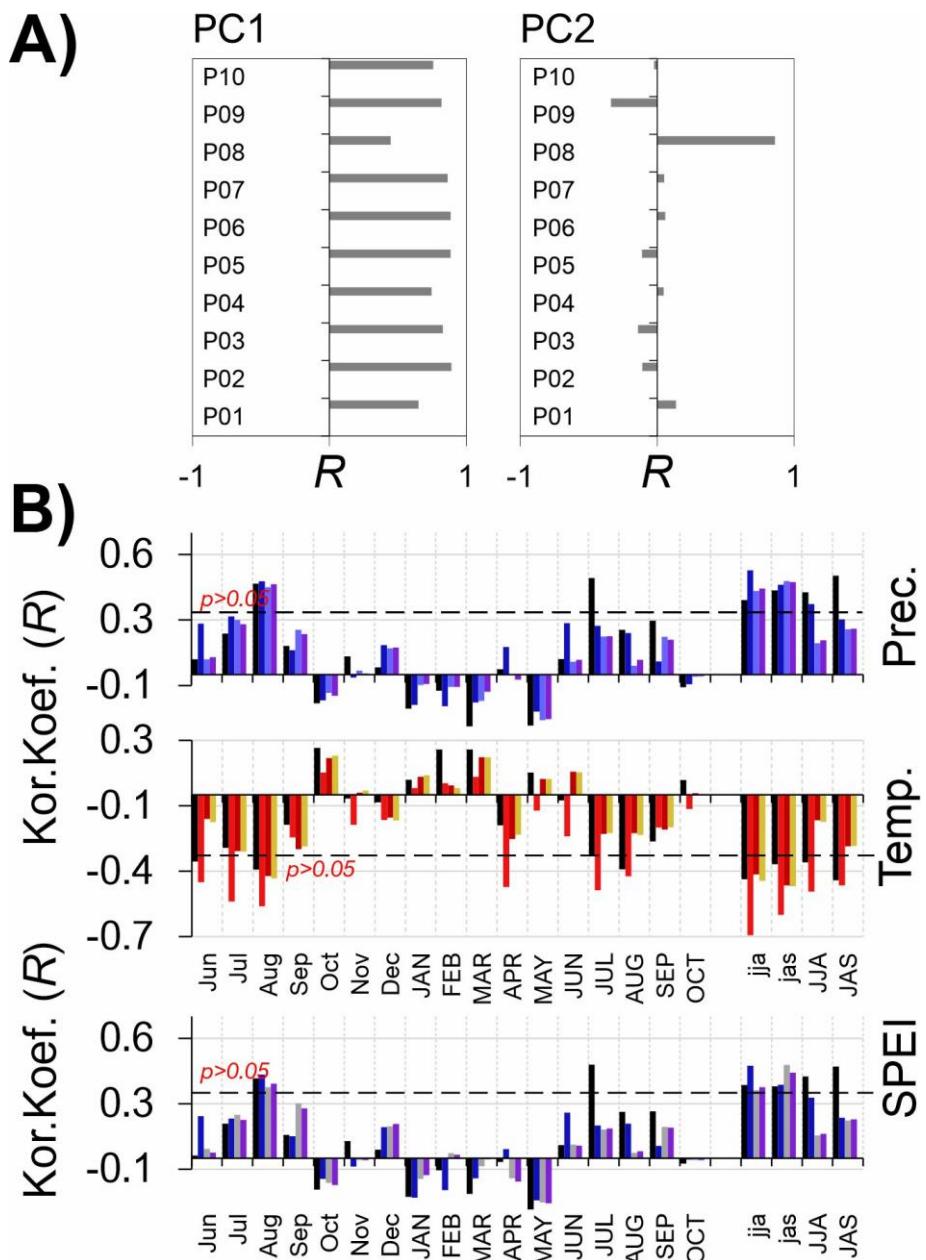
Iz provedene analize vidimo da je klimatska osjetljivost obične smreke s obzirom na oborine i indeks suše stabilna tijekom promatranog vremenskog razdoblja i to na svim plohama dok se osjetljivost smrekovih stabala na ljetne temperature mijenjala kroz vrijeme. Drugim riječima, tijekom promatranog vremenskog razdoblja rast stabala smreke sve je više limitiran visokim temperaturama zraka.



Slika 44. Pomične korelacije između kronologija i dominantnog klimatskog čimbenika (ukupne oborine tekuće godine Prec. (JAS) i prosječne temperature zraka Temp (pJAS) u ljetu prethodne godine od mjeseca srpanj do rujna) koristeći klimatske podatke iz baze CRU KNMI

Analiza glavnih komponenti (PCA) napravljena je s ciljem utvrđivanja dominantnog klimatskog čimbenika. Prve dvije komponente (PC1, PC2) objašnjavaju najveći dio ukupne varijance. Ukupno najviše objašnjena varijanca sa prve dvije glavne komponente kod rezidualnih kronologija (RES) iznosi 79.8% (PC1 70.7%, PC2 9.1%), kod standardne kronologije (SDT) 72.33% (PC1 61.66%, PC2 10.67%), kod RCS kronologija 71.58% (PC1 62.3%, PC2 9.28%) i kod BAIspl. 76,95% (PC1 63.54%, PC2 13.41%).

Glavna komponenta 1 (PC1) objašnjava najveći postotak ukupne varijance i značajno je korelirala s kronologijama svih istraživanih lokaliteta (Slika 45A). Glavna komponenta 2 (PC2) objašnjava u prosjeku oko 9% ukupne varijance i značajno je korelirana s lokalitetom P08 (Slika 45A). Visoka objasnjena varijanca pomoću Glavne komponente 1 (PC1) ukazuje na konzistentno postojanje zajedničkog signala koji dominantno upravlja rastom stabala obične smreke na istraživanom području.

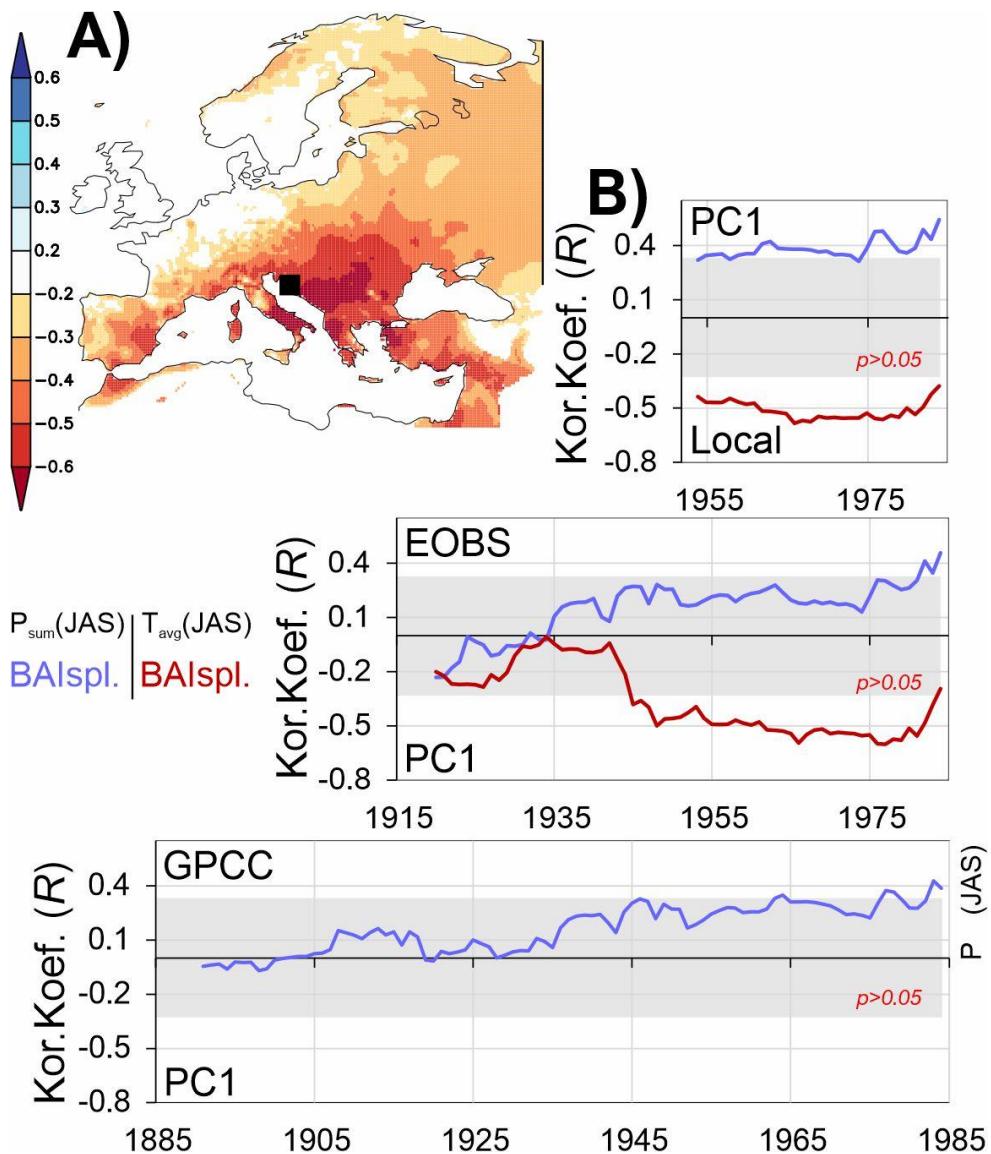


Slika 45. A) Korelacije (R) kronologija s prvom (PC1) i drugom (PC2) glavnom komponentom prema metodi standardizacije. A) Jednostavni linearni korelacijski koeficijenti između PC1 i sume oborina (Prec.), prosječne temperature zraka (Temp.) i indeksa SPEI za mjesecce od lipnja (jun) prethodne godine do listopada tekuće godine (OCT) kao i za prosječne sezonske vrijednosti od 3 mjeseca.

Jednostavni linearni (Pearson) korelacijski koeficijenti između odabralih klimatskih čimbenika (sume oborina, prosječne temperature zraka te SPEI-a) te glavne komponente 1 (PC1) za razdoblje od 1954 – 2018. godine ukazuju da je rast stabala značajno pozitivno utjecan većom količinom oborina u ljetnim mjesecima prethodne i tekuće godine od srpnja do rujna (JAS) a istovremeno značajno limitiran visokim temperaturama zraka u istom razdoblju (Slika 45B). Od pojedinačnih mjeseci posebice

se ističe kolovoz kao mjesec sa generalno najvećim vrijednostima korelacijskih koeficijenata. Najveće negativne vrijednosti korelacijskih koeficijenata utvrđene su za PC1 i to za prosječnu temperaturu zraka od lipnja do kolovoza (jja, $R = -0.69$) i od srpnja do rujna (jasT, $R = -0.55$) prethodne godine.

Analizom pomičnih korelacija (period 35 + 1 godina) i glavne komponente 1 (PC1) koristeći tri izvora seta klimatskih podataka i to: lokalni podaci s obližnje meteorološke postaje Zavizan, E-OBS i GPCC (samo za oborine) utvrđena je vremenska stabilnost dominantnog klimatskog signala (jasT i jasP) tijekom različitih vremenskih perioda klimatoloških podataka (Slika 46B). Bez obzira na izvor podataka odnos klime i rasta stabala smreke postaje izražen u razdoblju nakon 1940ih godina prošlog stoljeća. Na dugoročnoj skali (GPCC od 1891.godine) možemo vidjeti da pozitivan utjecaj oborina u ljeto prethodne godine (jasP) postaju sve značajnije tijekom posljednjih 100ak godina. Istovremeno na nešto kraćoj vremenskoj skali (EOBS od 1920.godine) visoke temperature zraka u ljeto prethodne godine (jasT) sve više značajno limitiraju rast stabala smreke počevši nakon 1940ih godina (Slika 46B).

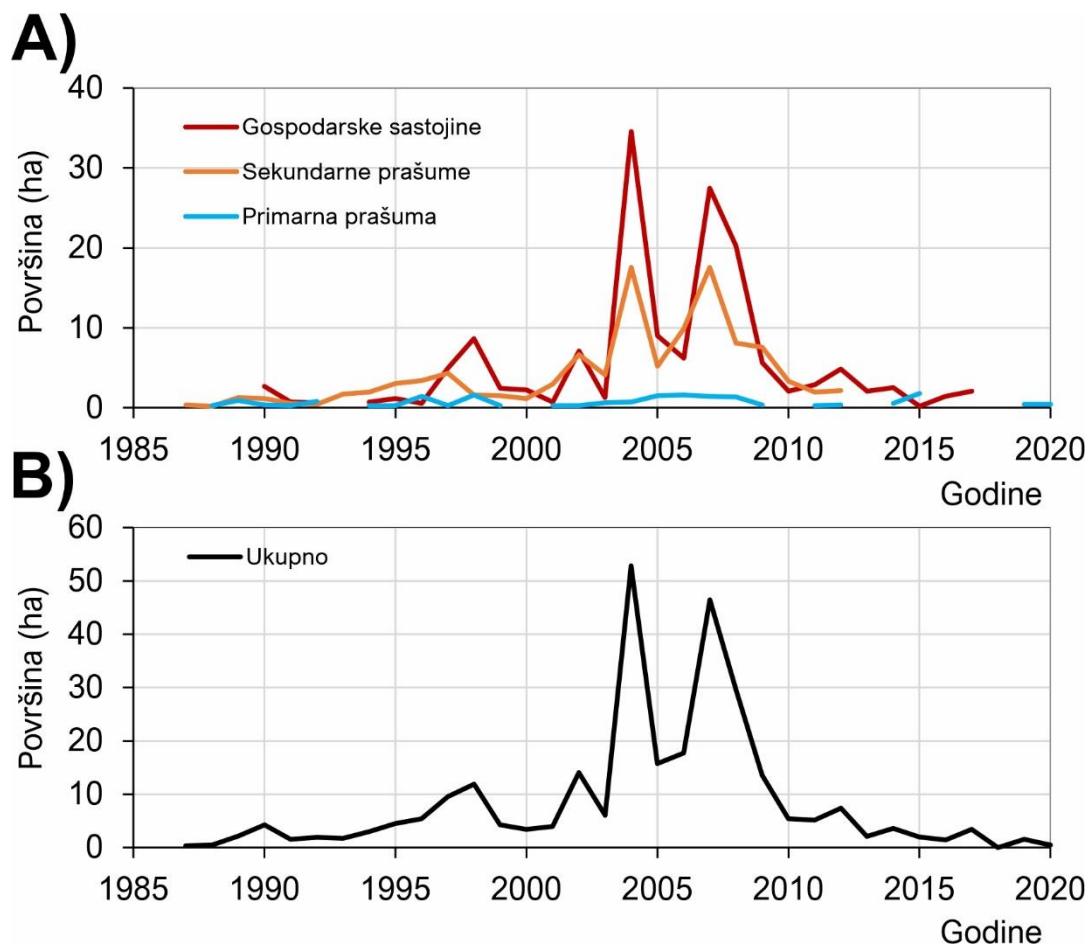


Slika 46. A) Prostorna korelacija između glavne komponente 1(PC1) dobivene PC analizom i prosječne temperature zraka od srpnja do rujna prethodne godine (jasT) izvor EOBS za razdoblje od 1954 – 2018. godine. B) Pomične korelacije sa dominantnim klimatskim varijablama (suma oborina i prosječnih temperatura zraka od srpnja do rujna prethodne godine) koristeći različite izvore klimatskih podataka.

5.5. Dinamika odumiranja smreke na Velebitu

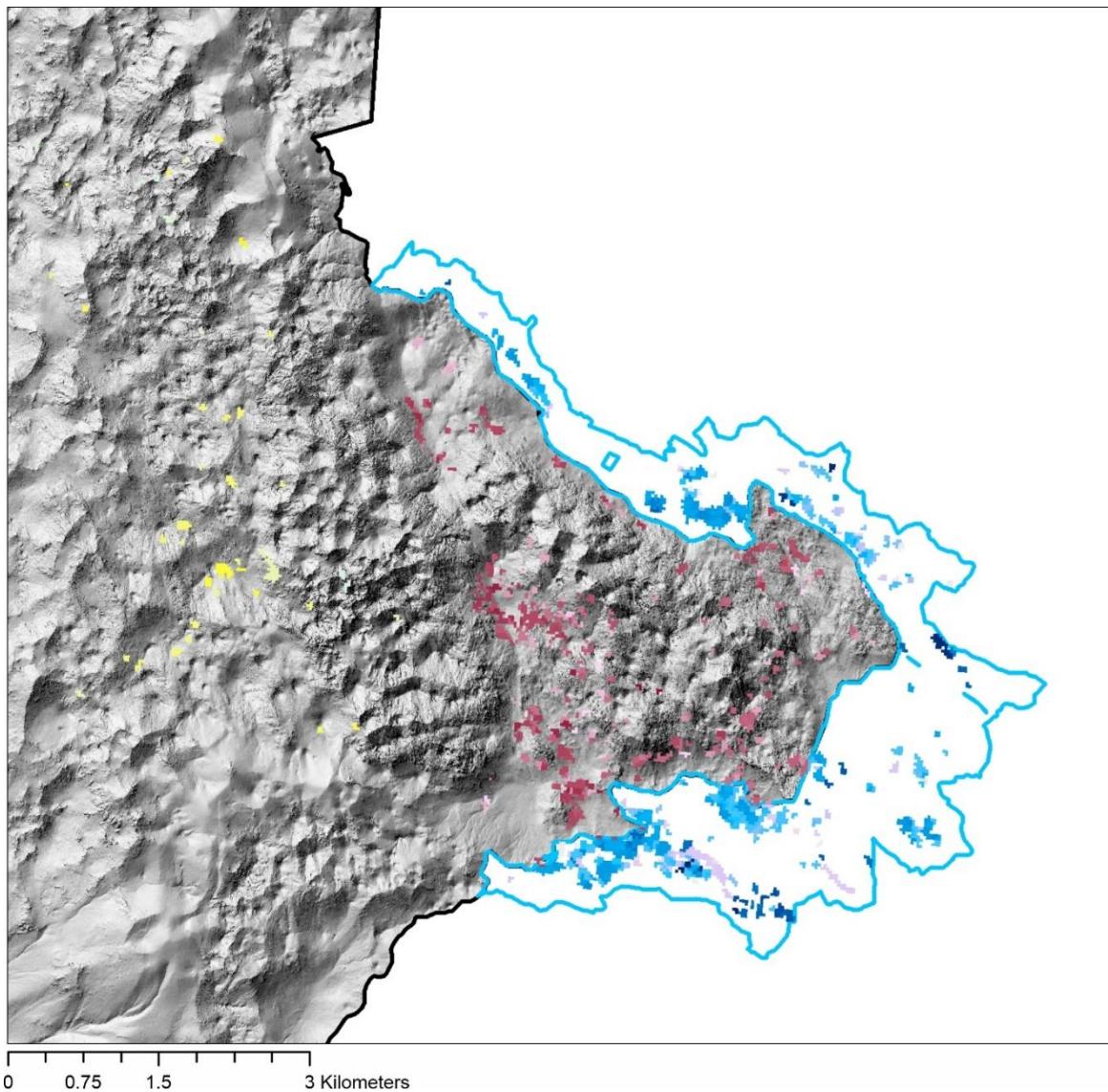
5.5.1. Vremenska dinamika odumiranja sastojina obične smreke

Vremenska dinamika odumiranja obične smreke analizirana je korištenjem LANDSAT-ovim satelitskim snimakima. Ona prikazuje površine odumrlih sastojina zahvaćenih napadom potkornjaka tijekom vremenskog razdoblja od 1985 – 2023. godine. Analiza je napravljena za tri različita tipa sastojina prema područjima i to: područje primarne prašume Smrčeve doline, područje sekundarnih prašuma (sastojine unutar Nacionalnog parka Sjeverni Velebit koje su nekad bile gospodarene ali od proglašenja Nacionalnog parka su prepuštene spontanom prirodnom razvoju) i gospodarske sastojine (gospodarski odjeli na istočnoj granici Nacionalnog parka). Analiza ukazuje na vremenu dinamiku odumiranja sastojina obične smreke tijekom promatranog razdoblja. Iz analize uočavamo godine s velikim odumiranjem kao što su: 2004., 2007. i 2008. godina.



Slika 47. Vremenska dinamika odumiranja sastojina obične smreke izkazana po površini (ha) prema različitim tipovima sastojina obzirom na gospodarenje i upravljanje.

Obzirom na tip sastojina možemo uočiti da su prema površini odumrlih sastojina najviše zahvaćene gospodarske i nekada gospodarene sastojine dok su područja primarne prašume Smrčeve doline značajno manje zahvaćena odumiranjem obične smreke. Ukupno je u navedenom razdoblju odumrlo 285.74 ha sastojina obične smreke. U gospodarskim sastojinama 156.15 ha, u sekundarnim prašumama 110.43 ha i svega 20.16 ha u primarno prašumi Smrčeve doline.

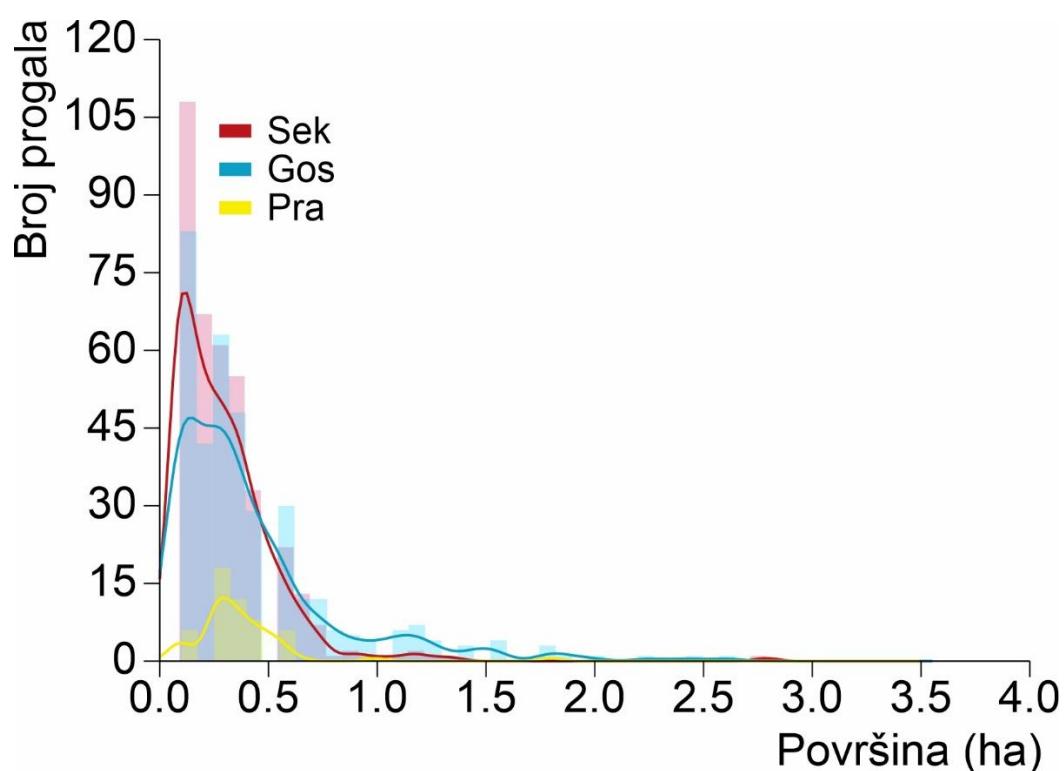


Slika 48. Prostorni raspored progala na istraživanom području. Žutom bojom su označene progale u prašumskim sastojinama, crvenom u sekundarnim prašumama i plavom bojom progale u gospodarskim sastojinama.

Prosječna površina progala najveća je u gospodarskim sastojinama 0.43 ha, nešto manja 0,37 ha u prašumama a najmanja u sekundarnim sastojinama 0.29 ha. Broj pojedinačnih progala je najveći u sekundarnim 376 i gospodarskim sastojinama 367 dok su na području prašume ustanovljene svega 54 progale.

Tablica 6. Deskriptivni podaci o površinama (ha) progala prema načinu gospodarenja za razdoblje od 1985 do 2023. godine

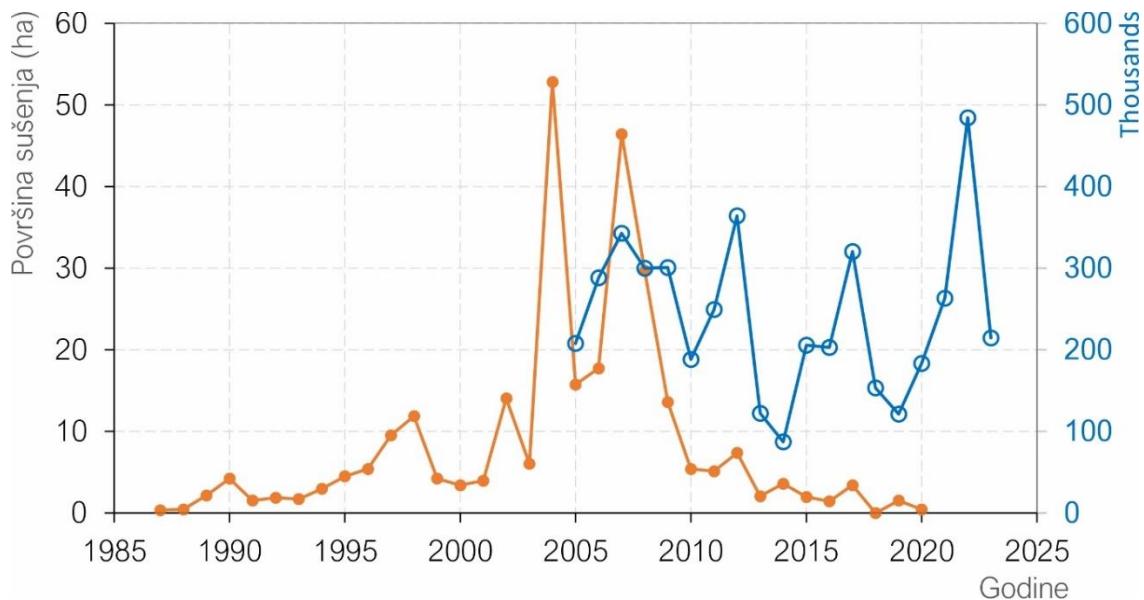
	Sekundarne	Gospodarske	Prašuma
N	376	367	54
Min	0.09	0.09	0.09
Max	2.79	2.61	1.80
Sum	110.43	156.15	20.16
Mean	0.29	0.43	0.37
Std. error	0.01	0.02	0.03
Variance	0.06	0.16	0.06
Stand. dev	0.24	0.40	0.25
Median	0.27	0.27	0.36
25 prcntil	0.09	0.18	0.27
75 prcntil	0.36	0.54	0.45
Mode	0.09	0.09	0.27
Coeff. var	83.27	94.56	67.93



Slika 49. Distribucija broja progala prema površinama (ha) i tipovima sastojina

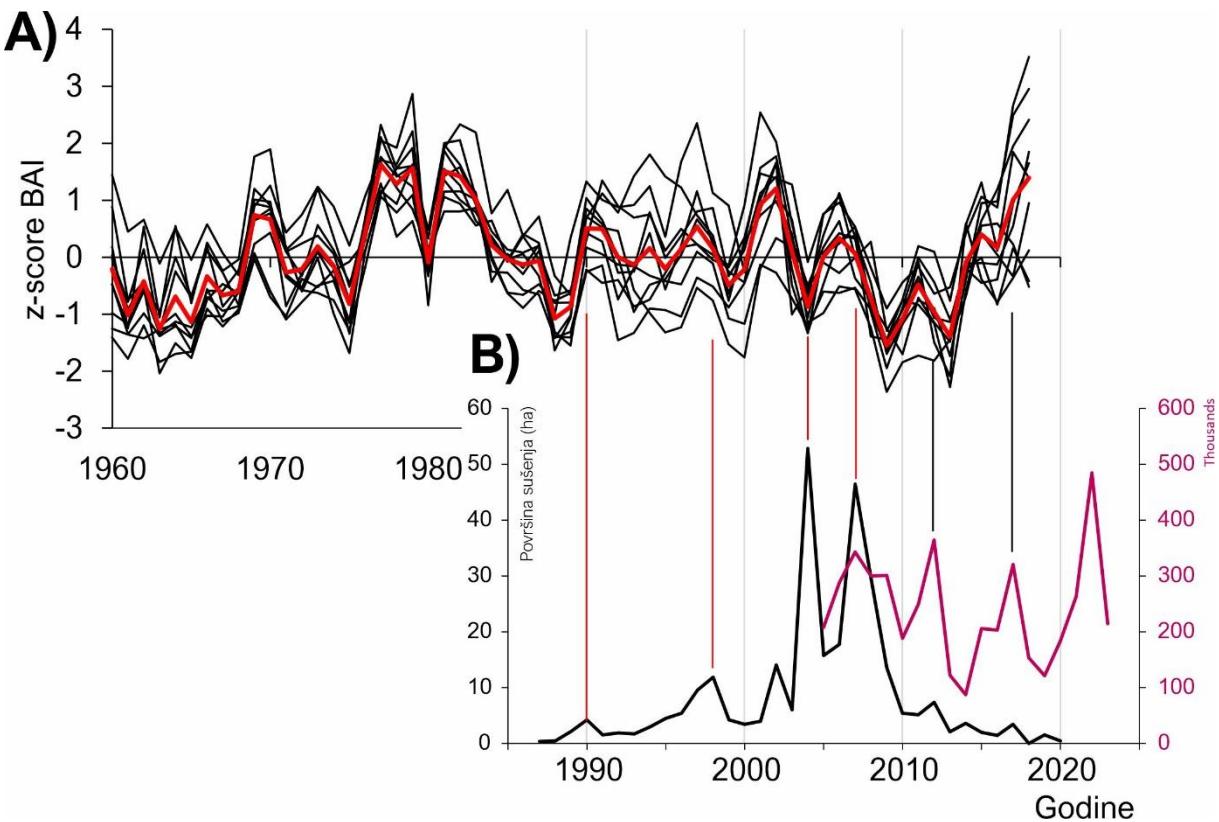
Vremenska dinamika odumiranja sastojina obične smreke (*Picea abies*) i fluktuacije brojnosti populacije potkornjaka (*Ips typographus*) prikazane su na slici 50. Analizom podataka za razdoblje od 2005. do 2023. godine uočene su četiri godine u kojima je brojnost populacije potkornjaka bila iznadprosječna. Međutim, unatoč povećanju brojnosti ovog štetnika, nije došlo do značajnijeg odumiranja smrekovih sastojina

nakon 2007 godine. Tijekom promatranog razdoblja zabilježena su samo dva izrazita događaja masovnog odumiranja smreke, i to 2004. i 2007. godine, što ukazuje na složenu povezanost između populacijske dinamike potkornjaka i vitalnosti smrekovih sastojina te potencijalni utjecaj drugih ekoloških čimbenika na njihovu stabilnost.



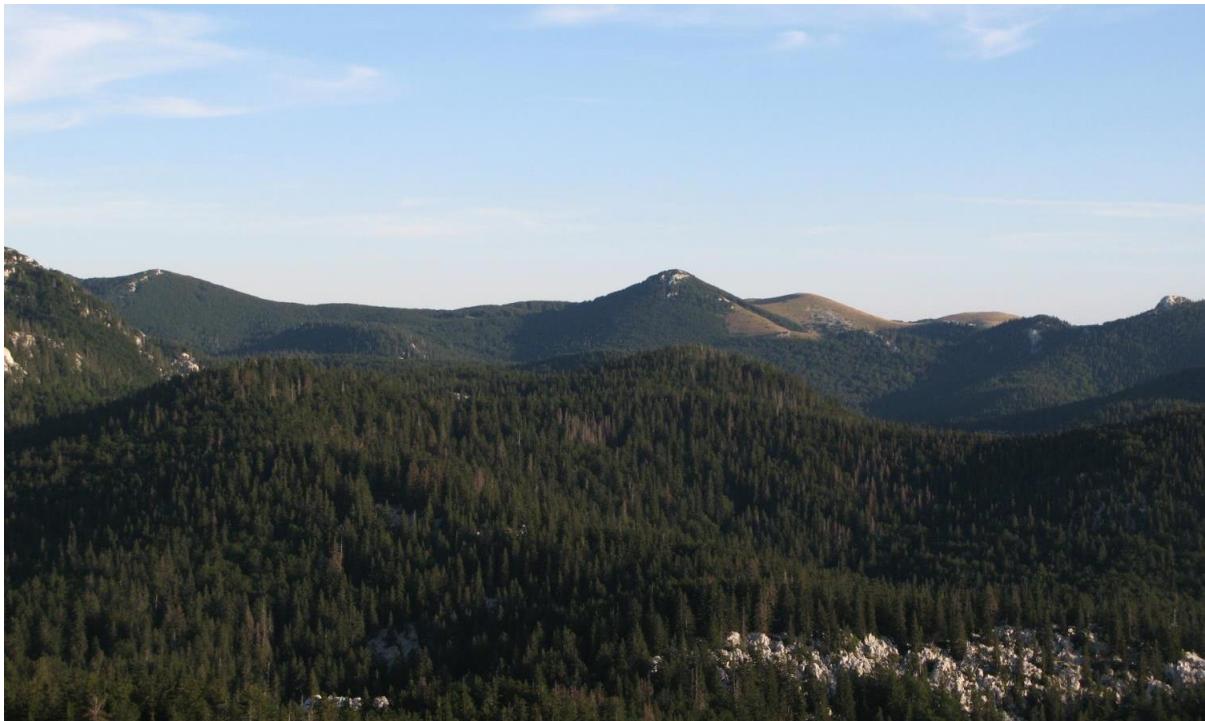
Slika 50. Vremenska dinamika odumiranja sastojina obične smreke i brojnost populacije potkornjaka na području sjevernoga Velebita

Odnos između površina zahvaćenih sušenjem smrekovih sastojina i brojnosti populacije potkornjaka (*Ips typographus*) nije značajan. Drugim riječima, rast brojnosti populacije ovog štetnika ne može se smatrati prediktorskim čimbenikom za procjenu površina odumiranja smreke (Slika 50).



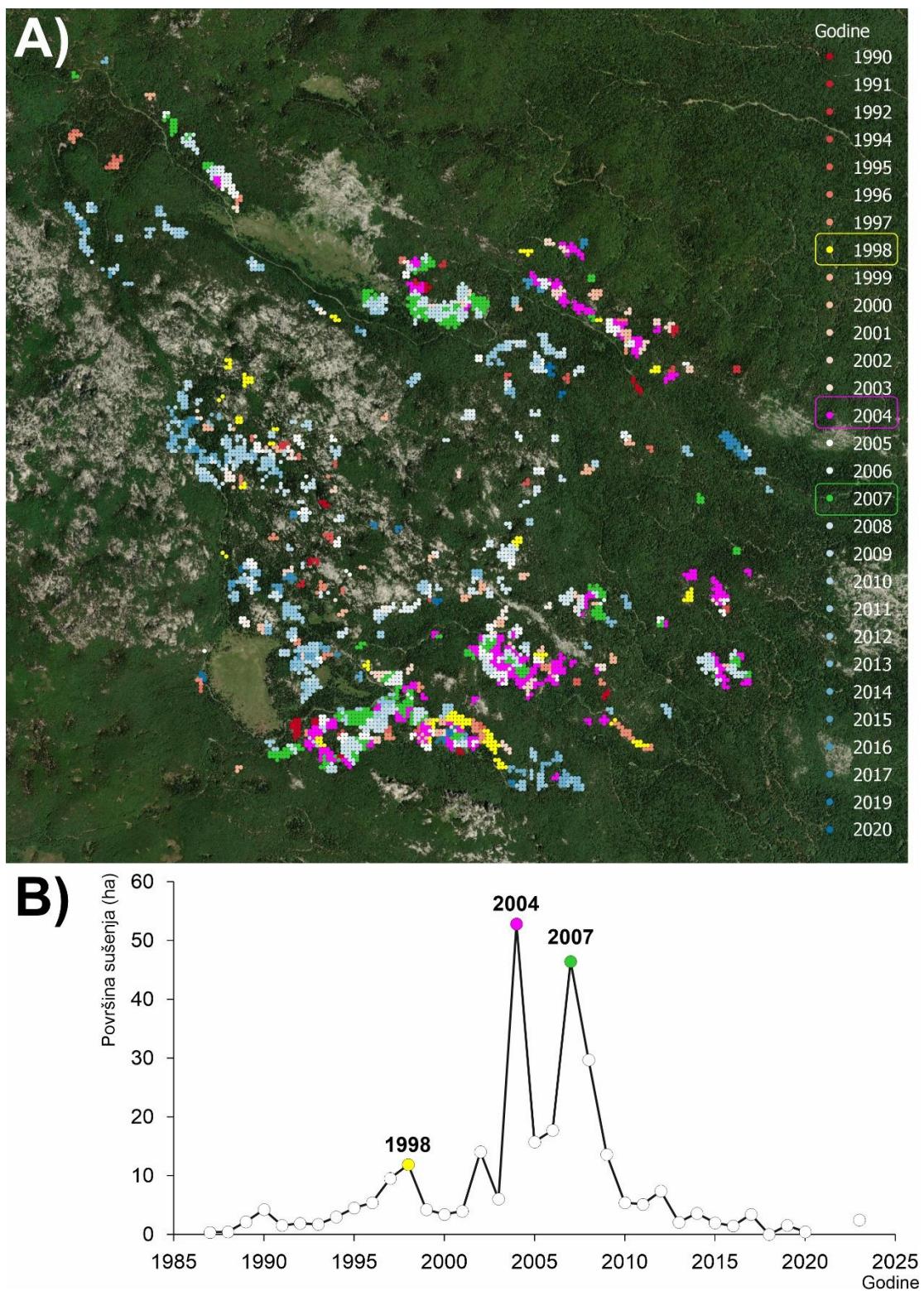
Slika 51. Odnos prirasta temeljnice, površina sušenja (ha) i brojnosti populacije potkornjaka na sjevernom Velebitu

Analiza odnosa između prirasta temeljnice, površina sušenja smrekovih sastojina i brojnosti populacije potkornjaka na području sjevernog Velebita pokazuje da je sušenju prethodio pad prirasta temeljnice (Slika 51), što se može povezati sa sušnim godinama. Budući da je sustavni monitoring potkornjaka započeo 2005. godine, možemo pretpostaviti da je tijekom najvećeg sušenja 2004., koje je uslijedilo nakon suše 2003., populacija potkornjaka bila na visokoj razini. Promatraljući sva tri faktora, uočava se da je svakom većem valu odumiranja prethodio pad prirasta temeljnice i porast brojnosti potkornjaka. Međutim, brojnost potkornjaka objašnjava samo dio varijabilnosti površina odumiranja smreke, što sugerira da na dinamiku sušenja smrekovih sastojina značajno utječe i drugi čimbenici, uključujući klimatske ekstreme, zdravstveno stanje stabala i sastojinsku strukturu.



Slika 52. Mala sušenja u prašumskim lokalitetima na Sjevernome Velebitu (Foto: S. Mikac)

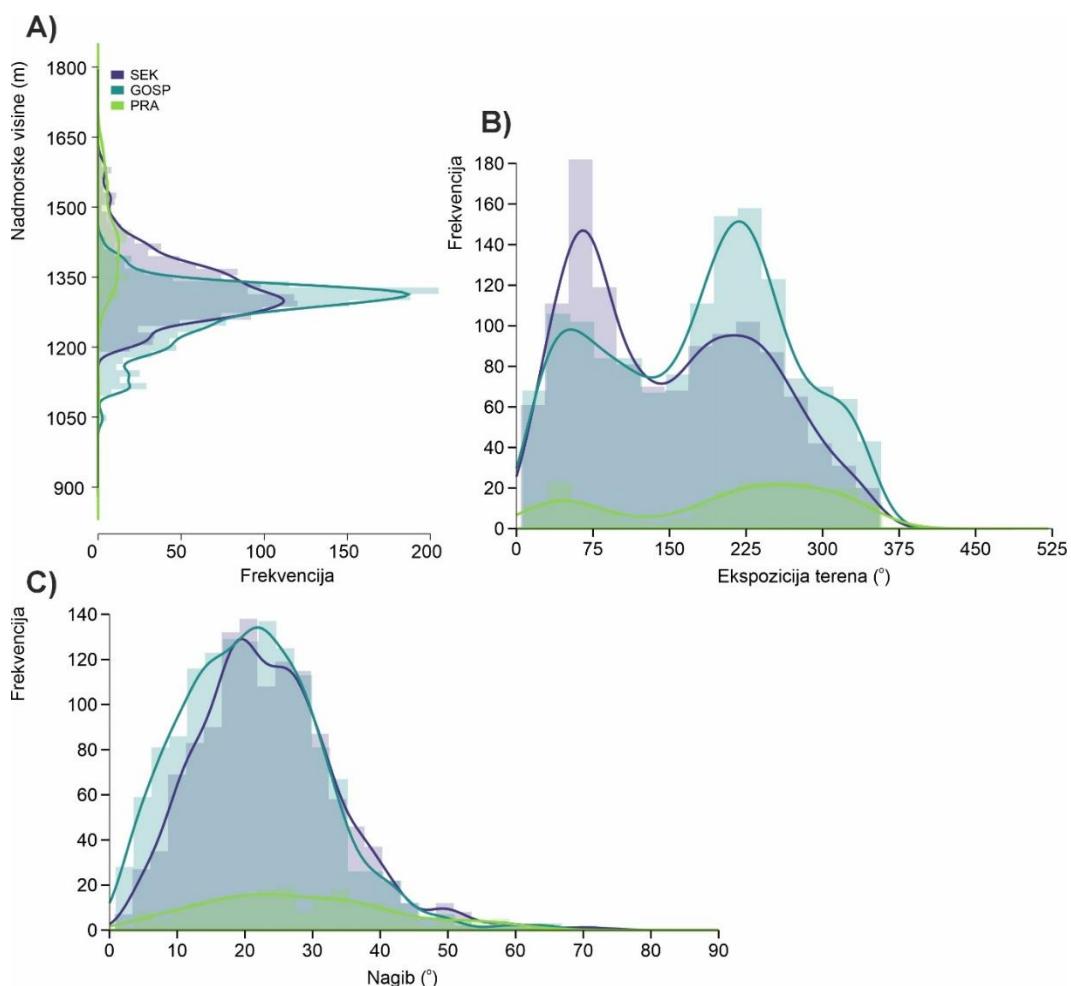
5.5.2. Prostorna dinamika odumiranja smreke



Slika 53. Dinamika odumiranja smreke prema godinama

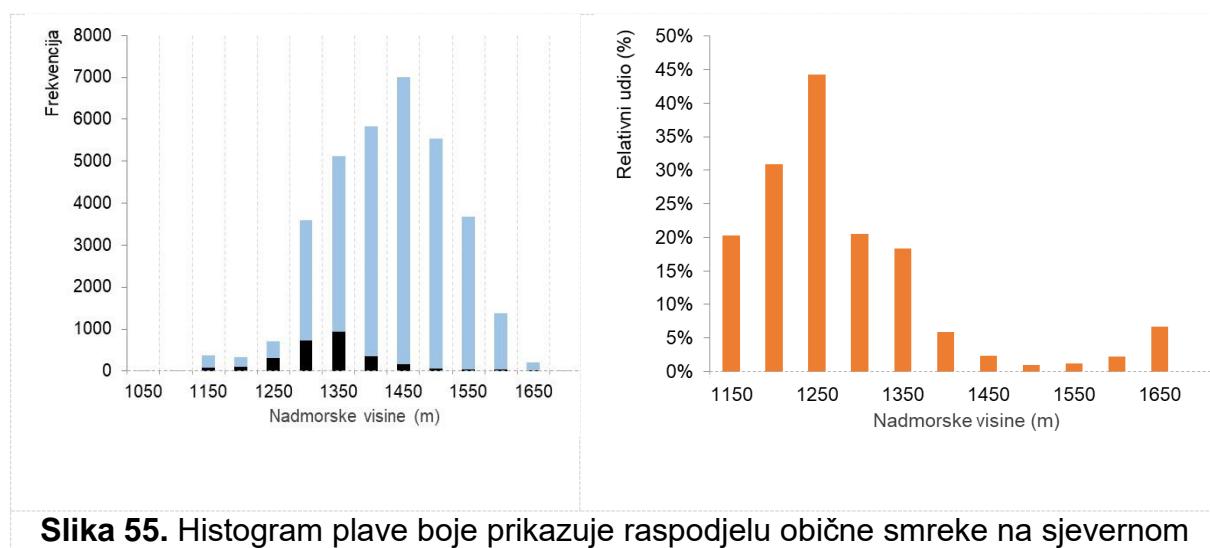
5.5.3. Utjecaj geomorfološkim čimbenika na odumiranje

Analiza odumiranja sastojina smreke u razdoblju od 1985. do danas prema ključnim geomorfološkim čimbenicima—nadmorskoj visini, ekspoziciji i nagibu terena—prikazana je na slici 43. Rezultati ukazuju da su najveće površine zahvaćene odumiranjem na visinama od 1200 do 1350 m, podjednako u gospodarskim šumama i sekundarnim prašumama (starijim šumama kojima se gospodarilo do 1999.). Na području primarne prašume Smrčeve doline sušenja su rjeđa, ali češće prisutna na većim visinama, između 1250 i 1500 m. Što se tiče nagiba terena, najfrekventnija sušenja zabilježena su na padinama nagiba 10–30 stupnjeva, neovisno o tipu šume (prijevremenim, sekundarnim prašumama i gospodarske sastojine), uz razlike u absolutnim vrijednostima. Analiza ekspozicije terena pokazuje da je odumiranje najučestalije na jugoistočnim (40–80°) i jugozapadnim ekspozicijama (180–260°), što može ukazivati na veći utjecaj klimatskih čimbenika poput insolacije i sušnih stresova u tim zonama.



Slika 54. Distribucija frekvencija odumiranja obične smreke prema nadmorskoj visini A), ekspoziciji terena B) i nagibu terena C) za područje prašume, nekada gospodarskih šuma (sekundarnih prašuma) i gospodarskih šuma na granici s Nacionalnim parkom Sjeverni Velebit

Kako bi se kvantificirao intenzitet odumiranja smrekovih sastojina u odnosu na nadmorsku visinu, prikazali smo zastupljenost smreke po nadmorskim visinama te udio odumrlih sastojina u istim visinskim zonama. Kada promatramo prvi histogram (plavom bojom) vidimo kako čiste smrekove sastojine najviše zauzimaju površine na nadmorskim visinama od 1350 do 1550 m sa najvećom frekvencijom na 1450m (Slika 55). Na drugom histogramu (narančasta boja) prikazan je relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na njezinu distribuciju po nadmorskim visinama.



Slika 55. Histogram plave boje prikazuje raspodjelu obične smreke na sjevernom Velebitu prema nadmorskoj visini, dok crni histogrami označavaju udio odumrlih sastojina u istim visinskim zonama. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke prikazan je u odnosu na njezinu distribuciju prema nadmorskoj visini (narančasta boja).

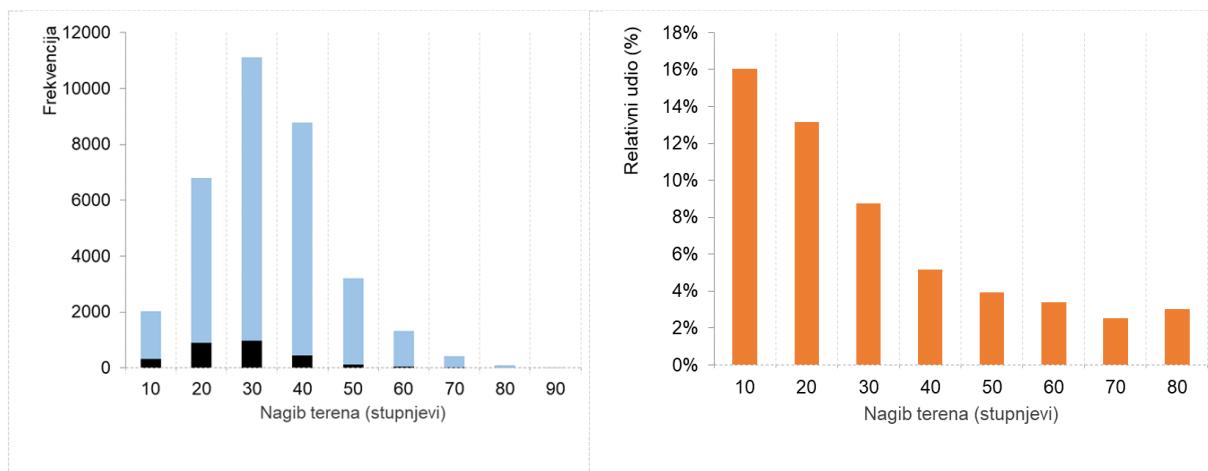
Najveći relativni udio odumrlih sastojina obične smreke zabilježen je u rasponu od 1200 do 1250 m nadmorske visine, čak 44% (Tablica 7). S druge strane, na višim nadmorskim visinama, posebice iznad 1400 m, bilježi se znatno manji udio odumiranja, dok u najvišoj analiziranoj kategoriji (1650–1700 m) nije zabilježeno odumiranje smrekovih stabala. Postotni udio odumrlih sastojina u odnosu na ukupnu površinu pokazuje najveće vrijednosti u nižim i srednjim nadmorskim kategorijama dok na visinama iznad 1400 m relativni udio odumiranja postaje zanemariv.

Zbog malog broja uzoraka sastojine u zoni od 1000 do 1100m.n.v. nisu uzete kao relevantan podatak iako rezultati u toj zoni pokazuju najveći relativni udio odumiranja (50%).

Tablica 7. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na njezinu distribuciju prema nadmorskoj visini

Nadmorska visina (od – do)		Odumrlo	Zdravo	(%)
1000	1050	5	5	50
1050	1100	3	3	50
1100	1150	77	303	20
1150	1200	100	224	31
1200	1250	313	395	44
1250	1300	738	2856	21
1300	1350	938	4177	18
1350	1400	343	5494	6
1400	1450	165	6836	2
1450	1500	57	5491	1
1500	1550	45	3640	1
1550	1600	31	1344	2
1600	1650	14	194	7
1650	1700		6	0

Također na Slici 56. prikazali smo zastupljenost smreke s obzirom na nagib terena i relativni udio odumrlih sastojina s obzirom na iste. Kada promatramo prvi histogram (plavom bojom) vidimo kako čiste smrekove sastojine najviše zauzimaju površine na nagibima između 20 i 40 stupnjeva sa najvećom frekvencijom na 30° (Slika 56). Na drugom histogramu (narančasta boja) prikazan je relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na njezinu distribuciju po nagibima terena.



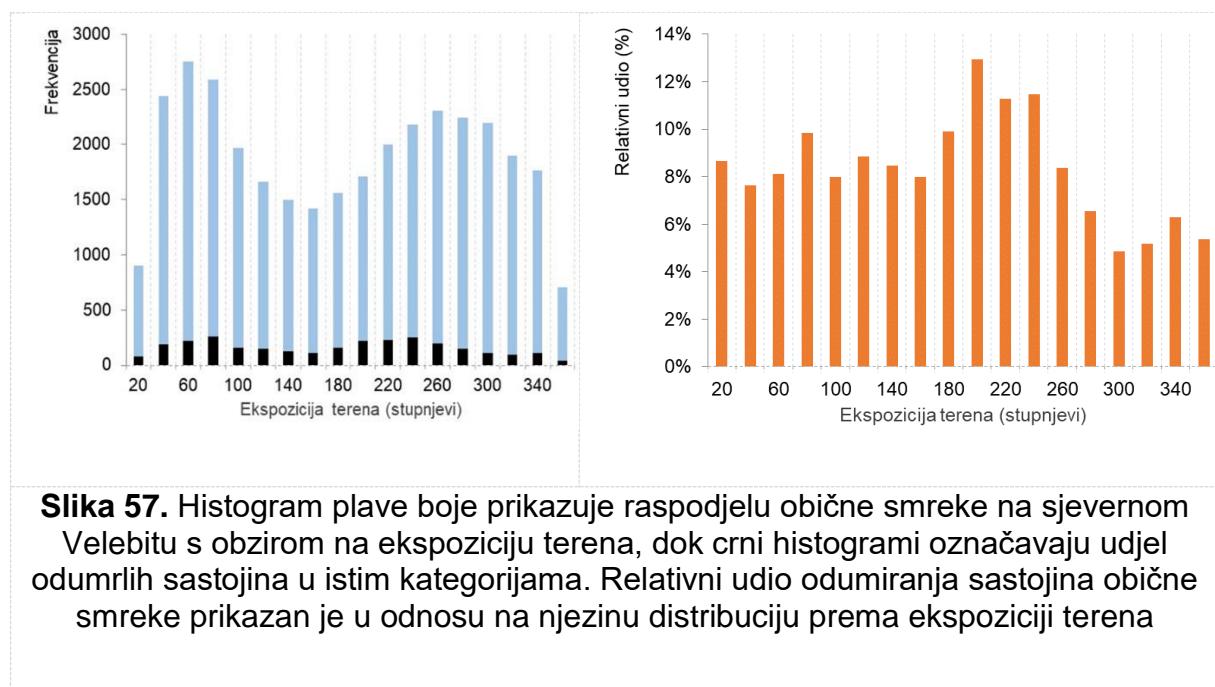
Slika 56. Histogram plave boje prikazuje raspodjelu obične smreke na sjevernom Velebitu s obzirom na nagib terena, dok crni histogrami označavaju udjel odumrlih sastojina u istim kategorijama. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke prikazan je u odnosu na njezinu distribuciju prema nagibu terena (narančasta boja).

Najveći relativni udio odumrlih sastojina obične smreke zabilježen je na nagibima do 10° (16%) i nagibima 10 do 20° (13%) (Tablica 8). Postotni udio odumrlih sastojina u odnosu na ukupnu površinu pokazuje najveće vrijednosti na manjim nagibima do 30° dok na nagibima iznad 40° relativni udio odumiranja postaje zanemariv.

Tablica 8. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na nagib terena

Nagib terena u stupnjevima (od – do)	Odumrlo	Zdravo	%
0	10	327	16
10	20	893	13
20	30	971	9
30	40	453	5
40	50	126	4
50	60	45	3
60	70	11	3
70	80	3	3

Na Slici 57. prikazana je zastupljenost smreke s obzirom na ekspoziciju terena i relativni udio odumrlih sastojina s obzirom na iste. Kada promatramo prvi histogram (plavom bojom) vidimo kako čiste smrekove sastojine najviše zauzimaju jugoistočne ($40\text{--}80^\circ$) i jugozapadne ekspozicije ($180\text{--}260^\circ$). Na drugom histogramu (narančasta boja) prikazan je relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na njezinu distribuciju s obzirom na ekspoziciju terena.



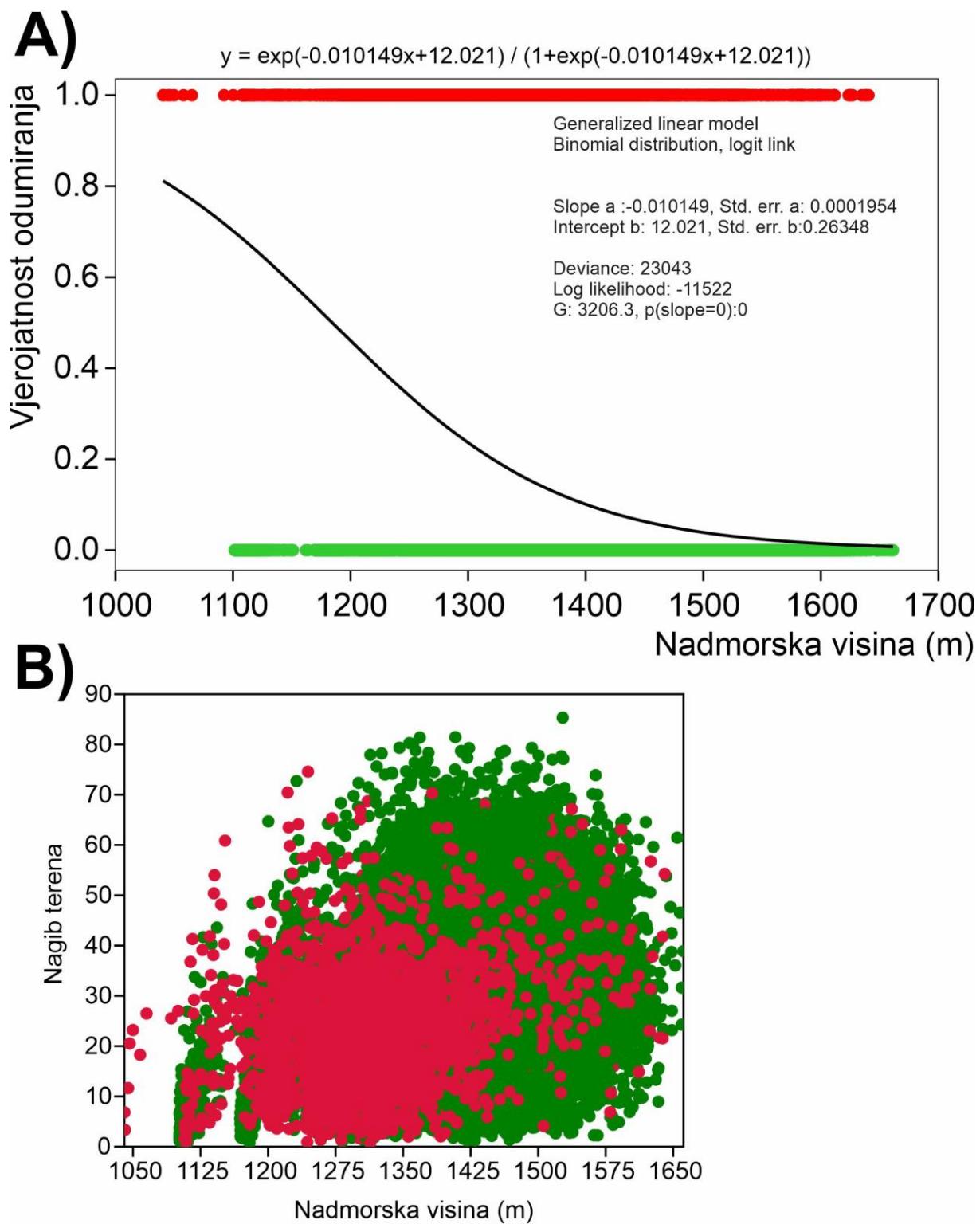
Najveći relativni udio odumrlih sastojina obične smreke zabilježen je na jugozapadnim ekspozicijama (Tablica 9).

Tablica 9. Relativni udio odumiranja sastojina obične smreke u odnosu na ekspoziciju terena

Ekspozicija terena od-do	Odumrlo	Zdravo	%
0	20	78	9
20	40	186	8
40	60	223	8
60	80	255	10
80	100	157	8
100	120	147	9
120	140	127	8
140	160	113	8
160	180	154	10
180	200	221	13
200	220	226	11
220	240	250	11
240	260	193	8
260	280	147	7
280	300	107	5
300	320	98	5
320	340	111	6
340	360	38	5

Generalizirani linearni model (GLM) s binarno distribuiranom zavisnom varijablom i logit poveznom funkcijom (binomial distribution, logit link) koristili smo za modeliranje vjerojatnosti događaja koji imaju dvije moguće kategorije – u ovom slučaju, odumiranje smrekovih sastojina (1 = odumrlo, 0 = neodumrlo) u odnosu na nadmorsku visinu.

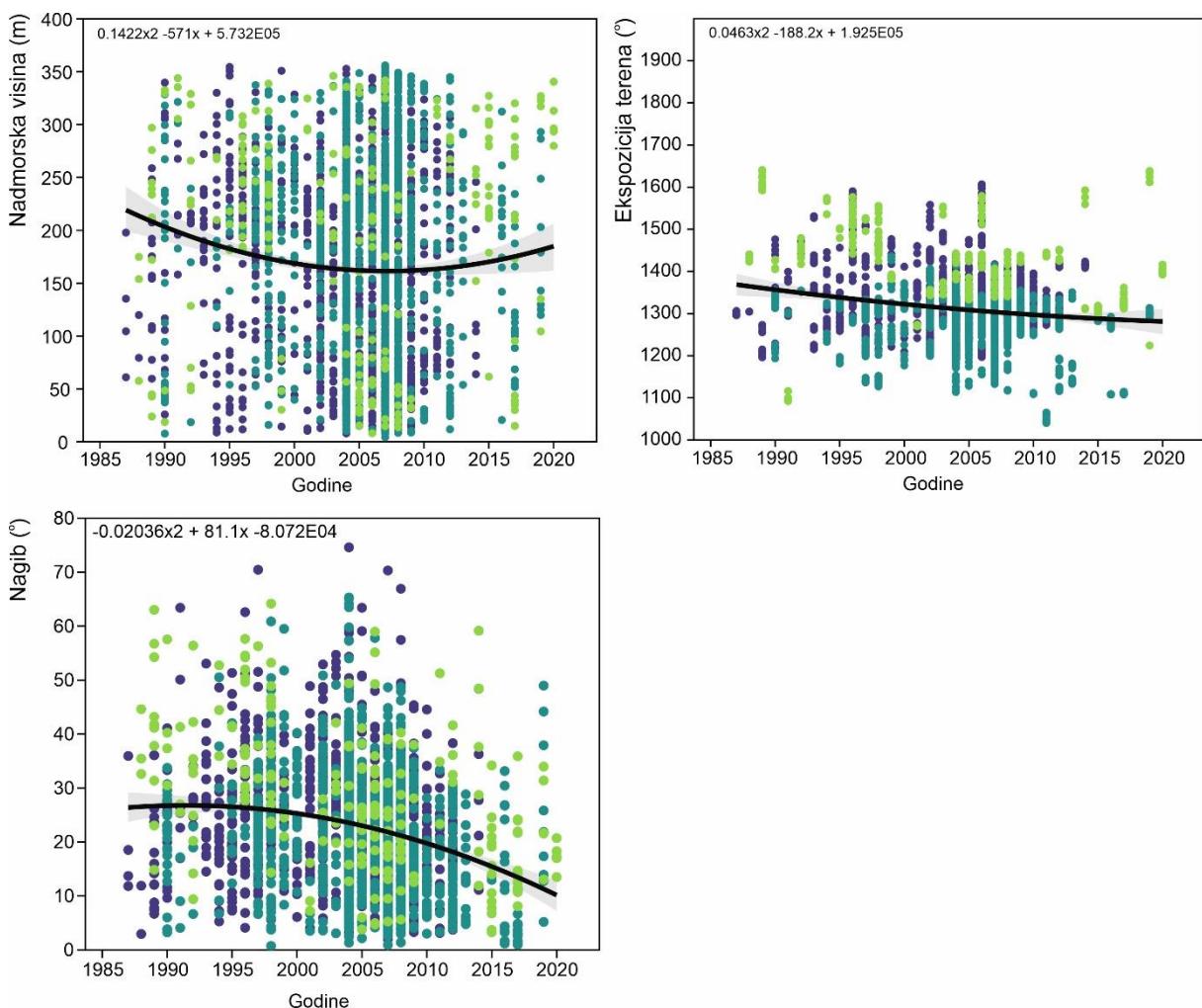
Dobiveni model potvrđuje da nadmorska visina značajno utječe na vjerojatnost odumiranja smrekovih sastojina, pri čemu je rizik odumiranja najveći na nižim nadmorskim visinama, a opada s povećanjem visine (Slika 58A). Dobiveni model se podudara i sa analiziranim frekvencijama i relativnom udjelom odumiranja prikazanim na slici 55. koji pokazuju kako sastojine iznad 1350 m.n.v. gotovo da i nisu bile zahvaćene sušenjem. Na slici 58B) prikazan je položaj odumrlih i zdravih sastojina s obzirom na nagib terena i nadmorsku visinu, gdje se najveći dio odumrlih sastojina pojavljuje su u rasponu do 40° nagiba i 1350 m.n.v.



Slika 58. Model vjerojatnosti odumiriranja obične smreke u odnosu na nadmorsku visinu A) i položaj odumrlih sastojina (crvene točke) u odnosu na zdrave sastojine (zelene točke) i njihov položaj s obzirom na nadmorsku visinu i nagib terena B)

5.5.4. Utjecaj geomorfološkim čimbenika na odumiranje tijekom vremena

Odnos sušenja prema navedenim geomorfološkim čimbenicima istražen je tijekom vremenskog razdoblja od 1985 do danas. Svrha ove analize je bila istražiti da li se udio odumrlih površine po nekom od geomorfoloških čimbenika mijenja tijekom vremena. Iz provedene analize vidljivo je da se u promatranom razdoblju od 1990 – 2020. godine odumiranje smrekovih šuma intenzivira na nižim nagibima terena.

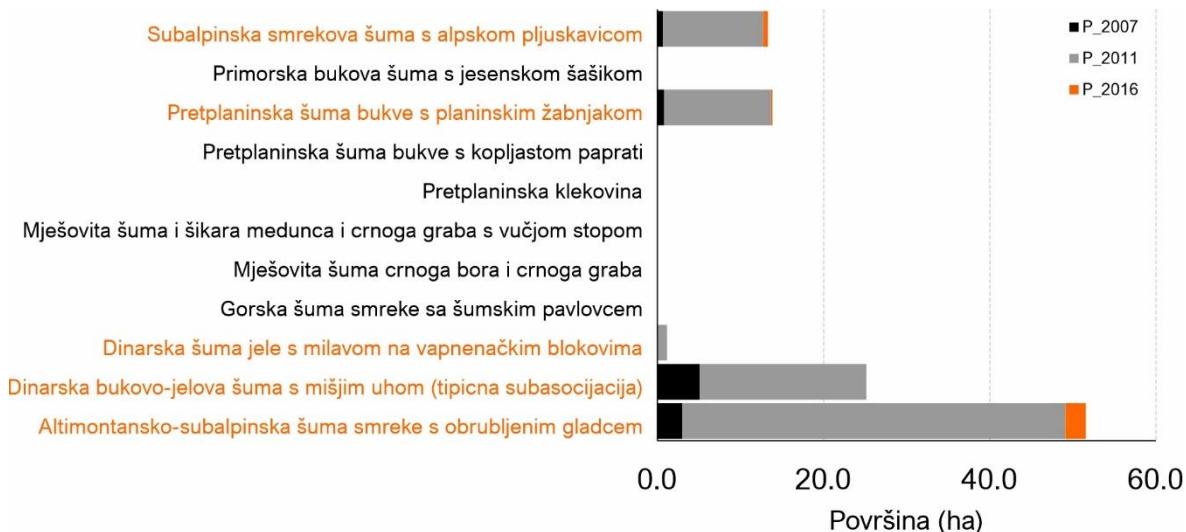


Slika 59. Trendovi odumiranja tijekom promatranog razdoblja od 1985 do danas prema geomorfološkom čimbeniku.

5.5.5. Odumiranje sastojina smreke prema tipovima vegetacije

Slika 60. prikazuje dinamiku sušenja sastojina obične smreke na području Nacionalnog parka Sjeverni Velebit u tri promatrana vremenska razdoblja (2007., 2011. i 2016. godina), s obzirom na različite tipove šumskih zajednica prema Nacionalnoj klasifikaciji staništa (NKS 2021). Rezultati ukazuju na progresivan porast površina zahvaćenih sušenjem, pri čemu je najizraženije sušenje zabilježeno u altimontansko-subalpinskim smrekovim šumama s obrubljenim gladcem. U ovoj zajednici najveći dio površine osušio se 2011. godine, dok se proces nastavio u manjem opsegu i tijekom 2016. godine.

Osim toga, značajne površine zahvaćene sušenjem zabilježene su i u dinarskoj bukovo-jelovoј šumi s mišnjim uhom, unatoč tome što se smreka u ovoj zajednici javlja samo kao primiješana vrsta, najčešće u manjim grupama i s nižim udjelom u omjeru smjese.



Slika 60. Ukupna površina sušenja smreke prema tipovima vegetacije

U tablici 10. možemo vidjeti kako su najveće površine zahvaćene sušenjem zabilježene u altimontansko-subalpinskoj šumi smreke s obrubljenim gladcem, gdje je ukupno posušeno 51,5 ha, što čini 6,38 % ukupne površine ove zajednice. Najintenzivnije sušenje dogodilo se 2011. godine, kada je čak 46,1 ha zahvaćen sušenjem, dok su gubici u 2007. i 2016. godini bili znatno manji (3,0 ha i 2,5 ha). Sljedeća po intenzitetu sušenja je dinarska bukovo-jelova šuma s mišnjim uhom, u kojoj je ukupno posušeno 25,1 ha, što iznosi 4,79 % površine ove zajednice. Najveći gubici

zabilježeni su 2011. godine (20,0 ha), dok su 2007. godine zahvatili 5,1 ha. U 2016. godini nije zabilježeno dodatno sušenje. Dinarska šuma jele s milavom na vapnenačkim blokovima također pokazuje znakove degradacije, iako u znatno manjem obujmu. U ovoj zajednici ukupno je posušeno 1,1 ha, što čini 3,10 % ukupne površine, a svi gubici su zabilježeni 2011. godine. U subalpinskoj smrekovoj šumi s alpskom pljuskavicom, ukupno sušenje iznosilo je 13,3 ha, odnosno 1,51 % površine ove zajednice. Najveće sušenje dogodilo se 2011. godine (12,1 ha), dok su u 2007. i 2016. godini zabilježeni manji gubici (0,7 ha i 0,5 ha).

Preplaninska šuma bukve s planinskim žabnjakom pokazuje relativno nizak intenzitet sušenja, s ukupno zahvaćenih 13,8 ha, što čini 0,43 % ukupne površine ove zajednice. Najveći gubici dogodili su se 2011. godine (12,9 ha), dok su 2007. i 2016. godine zabilježeni tek manji iznosi sušenja (0,8 ha i 0,1 ha). Važno je naglasiti kako se u bukovim i bukovo jelovim zajednicama smreka javlja samo kao primiješana vrsta, uglavnom u manjim grupama unutar sastojine. Stoga, iako apsolutne vrijednosti površina zahvaćenih sušenjem ne djeluju posebno velike, u stvarnosti one predstavljaju gotovo potpun gubitak svih manjih grupa i skupina čiste smreke unutar tih zajednica.

Ukupno, na području Nacionalnog parka Sjeverni Velebit, tijekom tri promatrana razdoblja (2007., 2011. i 2016. godine), posušilo se 110,5 ha smrekovih sastojina, što čini 1,14 % ukupne površine svih analiziranih zajednica. Najintenzivnije sušenje zabilježeno je 2011. godine, kada je 97,1 ha zahvaćen sušenjem, dok su gubici u 2007. i 2016. godini bili znatno manji (10,2 ha i 3,2 ha, redom).

Tablica 10. Ukupna površina sušenja smreke prema tipovima vegetacije i godinama

NKS	P (ha)	P2007	P2011	P2016	Ukupno	(%)
Altimontansko-subalpinska šuma smreke s obrubljenim gladcem	807.8	3.0	46.1	2.5	51.5	6.38%
Dinarska bukovo-jelova šuma s mišjim uhom	524.8	5.1	20.0		25.1	4.79%
Dinarska šuma jele s milavom na vapnenačkim blokovima	36.9	.	1.1		1.1	3.10%
Gorska šuma smreke sa šumskim pavlovcem	16.7					
Mješovita šuma crnoga bora i crnoga graba	701.2					
Mješovita šuma i šikara medunca i crnoga graba s vučjom stopom	1994.8					
Preplaninska klekovina	326.7					
Preplaninska šuma bukve s kopljastom paprati	666.6					
Preplaninska šuma bukve s planinskim žabnjakom	3223.4	0.8	12.9	0.1	13.8	0.43%
Primorska bukova šuma s jesenskom šašikom	487.5					
Subalpinska smrekova šuma s alpskom pljuskavicom	877.6	0.7	12.1	0.5	13.3	1.51%
(blank)	5.6	0.6	4.9	0.1	5.6	
Ukupno	9669.5	10.2	97.1	3.2	110.5	1.14%

Tablica 11. prikazuje ukupan broj odjela (N) u svakoj šumskoj zajednici te raspon i ukupnu površinu (Sum) zahvaćenu sušenjem. Najveći broj odjela pripada preplaninskoj šumi bukve s planinskim žabnjakom (PRET, N=172) te altimontansko-subalpinskoj šumi smreke s obrubljenim gladcem (ALTI, N=144). Unatoč velikom broju odjela, ukupan zbroj površina zahvaćenih sušenjem u preplaninskim bukovim šumama relativno je nizak (Sum = 13.83 ha), iz razloga što su to bukove šume sa malim udjelom smreke, dok je u čistoj altimontanskoj-subalpinskoj smrekovoj šumi znatno veći (Sum = 51.56 ha). Najveća pojedinačna površina zahvaćena sušenjem zabilježena je upravo u altimontansko-subalpinskoj šumi smreke s obrubljenim gladcem (ALTI, Max = 15.61 ha), dok su dinarske bukovo-jelove šume (DIN) također značajno pogodjene sušenjem, s ukupnom površinom od 25.13 ha i najvećim pojedinačnim slučajem sušenja od 12.55 ha.

Tablica 11. Osnovna deskriptivna statistika o površinama zahvaćenim sušenjem na razini sastojina od 2005 – 2016. godine prema tipovima šumskih zajednica, Gdje su: ALTI - Altimontansko-subalpinska šuma smreke s obrubljenim gladcem, DIN – Dinarska bukovo-jelova šuma s mišjim uhom, DIN_VAP – Dinarska šuma jele s milavom na vasprenačkim blokovima, GOR – Gorska šuma smreke sa šumskim pavlovcem, PRET – Preplanetinska šuma bukve s planinskim žabnjakom, SUBALP – Subalpinska smrekova šuma s alpskom pljuskavicom

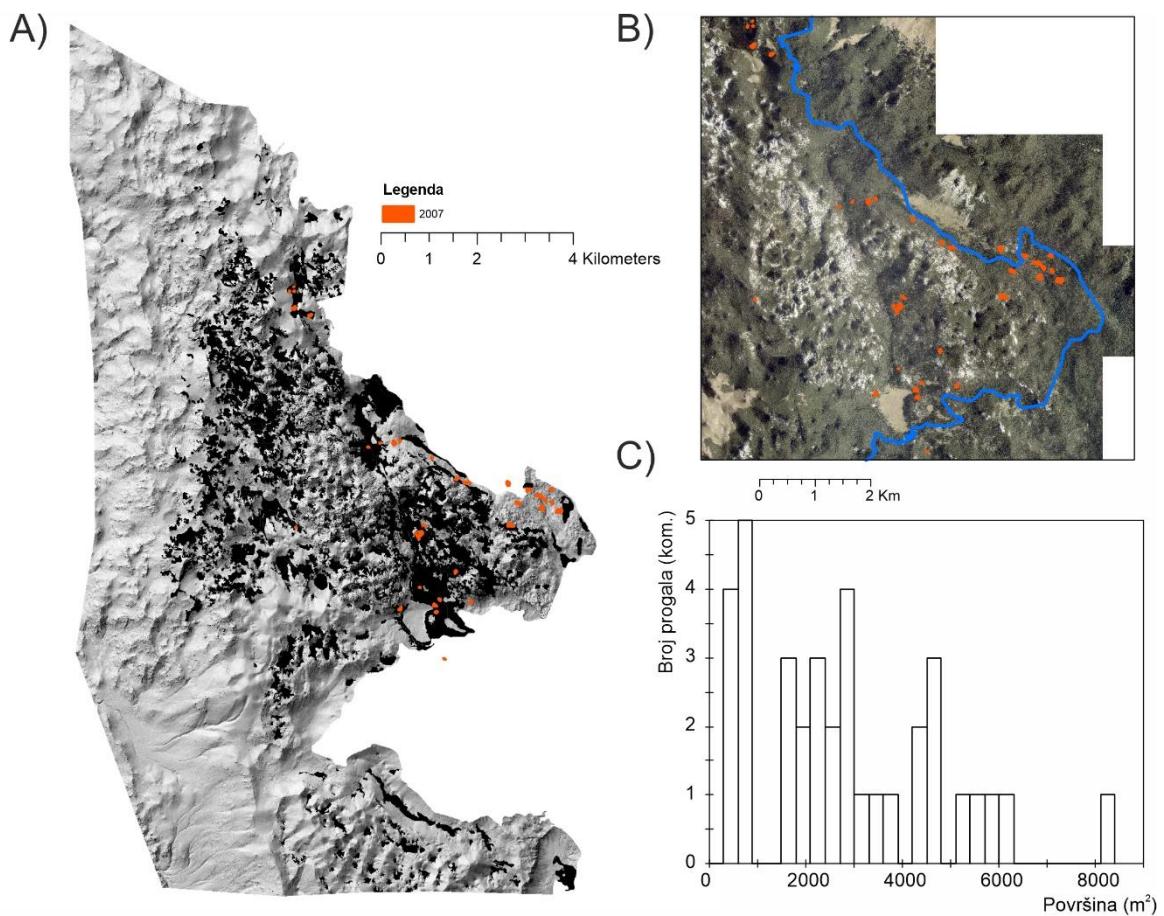
Površina (ha)	ALTI	DIN	DIN_VAP	GOR	PRET	SUBALP
N	144	17	13	2	172	129
Min	0	0	0	0	0	0
Max	15.61	12.55	0.43	0	3.35	3.41
Sum	51.56	25.13	1.13	0	13.83	13.28
Mean	0.36	1.48	0.09	0	0.08	0.10
Std. error	0.14	0.78	0.04	0	0.02	0.04
Variance	2.75	10.29	0.03	0	0.11	0.17
Stand. dev	1.66	3.21	0.16	0	0.33	0.42
Skewness	7.30	2.98	1.71	0.00	7.12	5.58
Kurtosis	58.80	9.50	1.47	0.00	62.93	35.47
Geom. mean	0	0	0	0	0	0
Coeff. var	462.90	217.05	186.42	NAN	404.20	405.62

Tablica prikazuje samo one odjele koji su zahvaćeni sušenjem (N). Od ukupnog broja odjela (144), altimontansko-subalpinska smrekova šuma (ALTI) imala je 37 zahvaćenih sušenjem, dok su preplanetinske bukove šume (PRET) imale 35 zahvaćenih odjela. Dinarske bukovo-jelove šume (DIN) imale su 9 zahvaćenih odjela od ukupnih 17 s visokim ukupnim zbrojem površina pod sušenjem (Sum = 25.13 ha).

Tablica 12. Osnovan deskriptivna statistika o površini sušenja na razini sastojina (odjela) zahvaćenih sušenjem u razdoblju od 2005 – 2016. godine prema glavnim tipovima šumskih zajednica, Gdje su: ALTI - Altimontansko-subalpinska šuma smreke s obrubljenim gladcem DIN – Dinarska bukovo-jelova šuma s mišnjim uhom, DIN_VAP – Dinarska šuma jele s milavom na vapnenačkim blokovima, GOR – Gorska šuma smreke sa šumskim pavlovcem, PRET – Pretplaninska šuma bukve s planinskim žabnjakom, SUBALP – Subalpinska smrekova šuma s alpskom pljuskavicicom

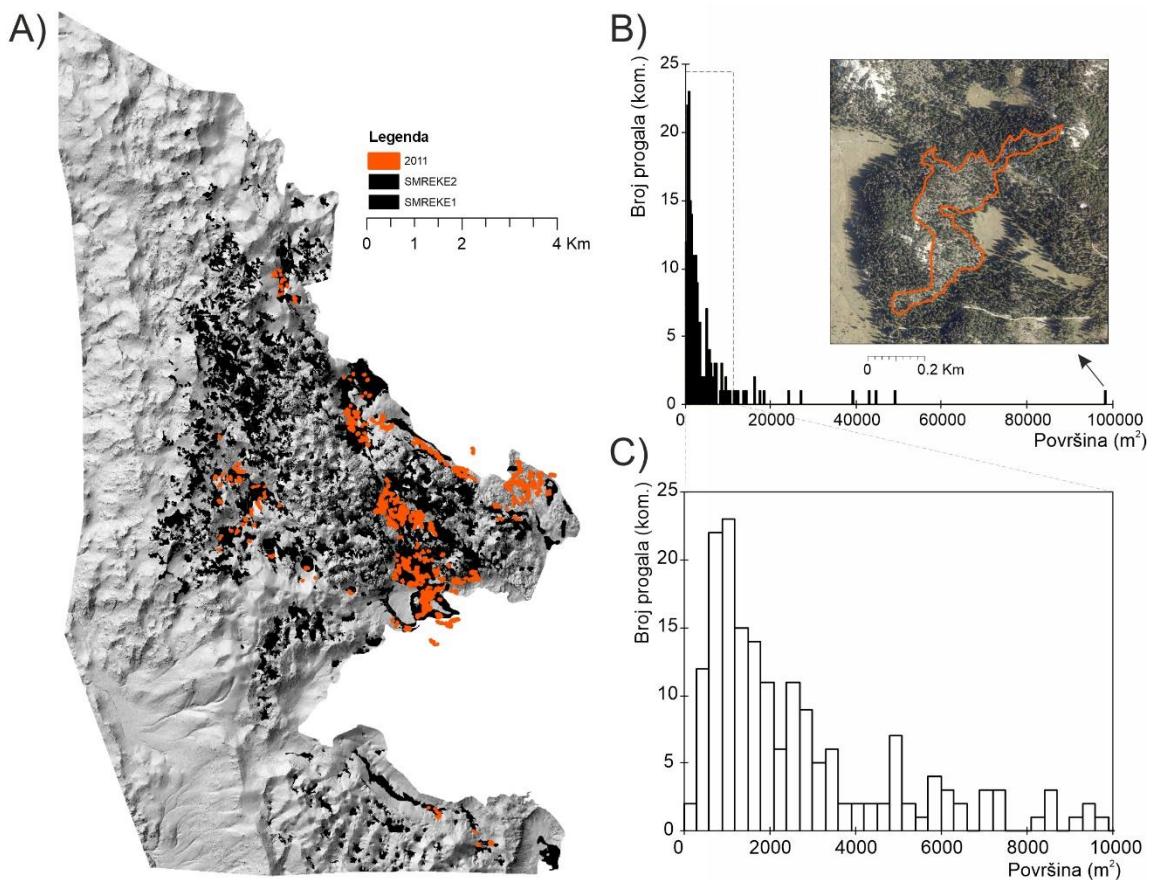
Površina (ha)	ALTI	DIN	DIN_VAP	PRET	SUBALP
N	37	9	4	35	19
Min	0	0.02	0.06	0	0.01
Max	15.61	12.55	0.43	3.35	3.41
Sum	51.56	25.13	1.13	13.83	13.28
Mean	1.39	2.79	0.28	0.40	0.70
Std. error	0.50	1.35	0.09	0.11	0.21
Variance	9.43	16.46	0.03	0.40	0.80
Stand. dev	3.07	4.06	0.18	0.63	0.89
Median	0.44	1.12	0.32	0.16	0.31
25 prcntil	0.125	0.15	0.1	0.06	0.09
Mode	NA	NA	NA	NA	NA
Skewness	3.65	2.10	-0.65	3.34	1.87
Kurtosis	14.04	4.61	-2.32	13.68	3.55
Geom. mean	0	0.79	0.22	0	0.30
Coeff. var	220.35	145.31	62.68	160.70	127.98

Slika 60. prikazuje postotni udio površine zahvaćene sušenjem unutar odjela u različitim šumskim zajednicama. Iako brojčano iskazano površine zahvaćene sušenjem ne odaju dojam velikih razmjera sušenja, analiza postotnog udjela unutar pojedinih odjela pruža precizniji uvid u intenzitet ovog procesa. Rezultati pokazuju da je u altimontansko-subalpinskoj smrekovoj šumi s obrubljenim gladcem prosječno oko 10% površine odjela bilo zahvaćeno sušenjem, s ekstremnim slučajevima u kojima je sušenje dosegnulo i 30% ukupne površine pojedinih odjela. Slično tome, u subalpinskoj smrekovoj šumi s alpskom pljuskavicicom, iako je prosječno sušenjem bilo pogodjeno oko 5% površine odjela, pojedini odjeli zabilježili su izrazito visoke vrijednosti, pri čemu je u nekim sušenjem bilo zahvaćeno čak 90% ukupne površine.



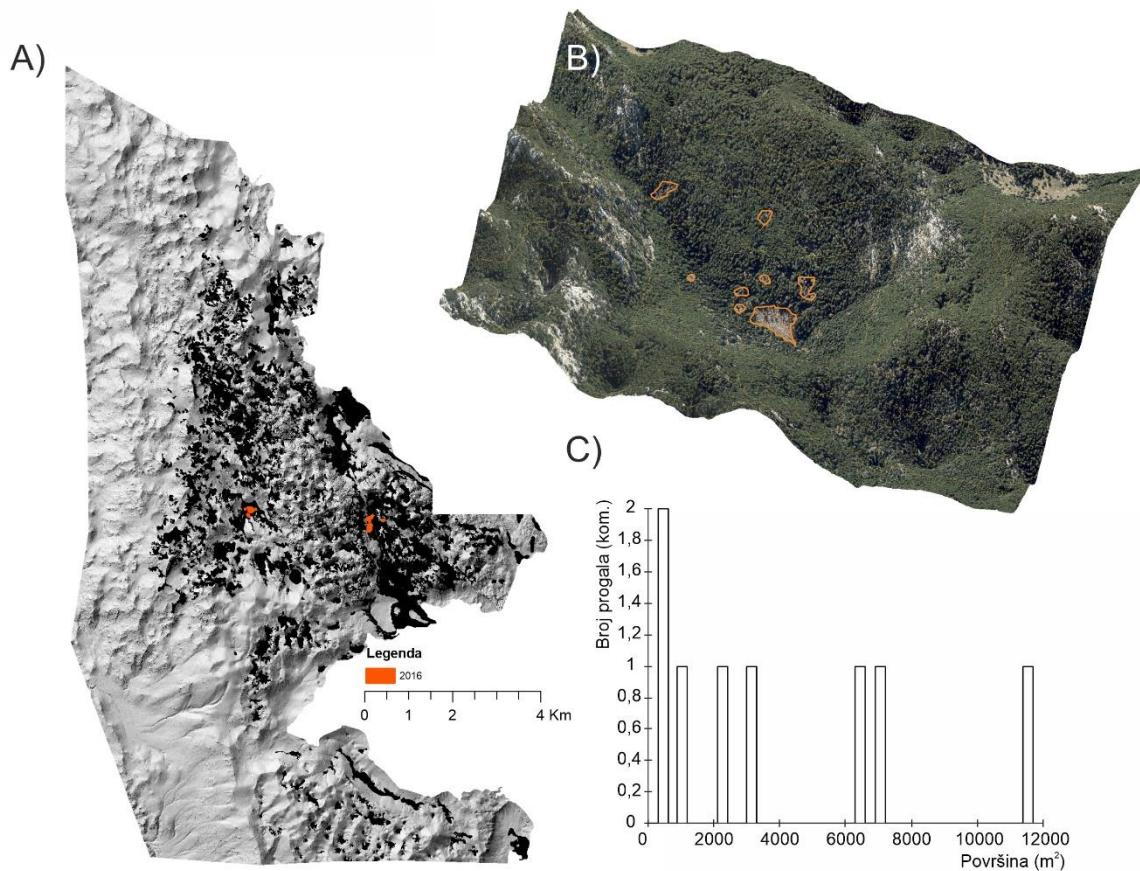
Slika 61. Prostorni položaj progala nastalih sušenjem smreke 2007. godine A). Prikaz detalja s progalamom B). Distribucija površina progala C).

Na slici 61A) prikazan je prostorni raspored smrekovih sastojina koje su zahvaćene sušenjem tijekom 2007. godine. Analiza pokazuje da je sušenje započelo na manjim površinama na području Lubenovca, Lubenovačkih vrata i na predjelu Icinac u čistim altimontansko-subalpskim smrekovim šumama i na predjelu Ledene drage u bukovo jelovim šumama. Na slici 61C) prikazana je distribucija broja progala u odnosu na njihovu veličinu. Sve progale su manje od 1 h.



Slika 62. Prostorni položaj progala nastalih sušenjem smreke 2011. godine A), Distribucija površina progala B) i C).

Na slici 62A) prikazan je prostorni raspored smrekovih sastojina koje su zahvaćene sušenjem tijekom 2011. godine. Analiza pokazuje da su najviše pogodjene površine smještene od Lubenovca, preko Lubenovačkih vrata, do Škrbinih draga u čistim altimontansko-subalpskim smrekovim šumama te na području Ledene drage u bukovo jelovim šumama. Na slici 62 B) i C) prikazana je distribucija broja progala u odnosu na njihovu veličinu, pri čemu je evidentno da dominiraju manje progale, čija površina ne prelazi 2000 m². Samo u nekoliko iznimnih slučajeva zabilježene su površine od 4 do 5 ha, dok je jedan slučaj dosegao čak 10 ha.



Slika 63. Prostorni položaj progala nastalih sušenjem smreke 2016. godine A), Distribucija površina progala B) i C).

Na slici 63A) prikazan je prostorni raspored smrekovih sastojina koje su zahvaćene sušenjem tijekom 2016. godine. Analiza pokazuje da se sušenje nastavilo u manjem obimu na manjim površinama na području Lubenovačkih vrata i na predjelu Varnjača (Cipale) u čistim altimontansko-subalpskim smrekovim šumama. Na slici 63C) prikazana je distribucija broja progala u odnosu na njihovu veličinu. Većina progala su manje od 1 h dok je jedna progala veličine 1,2 ha.

Tablica 13. Osnovna deskriptivna statistika o broju i površini progala za 3 promatrana razdoblja (2007, 2011, 2016)

	P2007	P2011	P2016
N	36	197	8
Min	0,04	0,03	0,04
Max	0,82	9,83	1,15
Sum	10,19	97,07	3,21
Mean	0,28	0,49	0,40
Std. error	0,03	0,07	0,14
Variance	0,04	0,95	0,16
Stand. dev	0,19	0,98	0,40
Median	0,25	0,21	0,26
25 prcntil	0,10	0,11	0,06
75 prcntil	0,44	0,50	0,70

Tablica prikazuje statističke pokazatelje za broj veličine progala u tri različite godine (2007, 2011, 2016). U 2007. godini, broj progala (N) iznosio je 36, s minimalnom veličinom progala od 0,04 ha i maksimalnom veličinom od 0,82 ha. Srednja vrijednost veličine progala bila je 0,28 ha. U 2011. godini, broj progala znatno je porastao na 197, a minimalna veličina progala smanjila se na 0,03 ha, dok je maksimalna vrijednost porasla na 9,83 ha. Srednja veličina progala bila je 0,49 ha. U 2016. godini, broj progala smanjio se na 8, minimalna veličina progala bila je 0,04 ha, a maksimalna 1,15 ha. Srednja vrijednost veličine progala u ovoj godini bila je 0,40 ha, što je niže od srednje vrijednosti u 2011. godini, ali i dalje viša nego u 2007. godini. Jasno je kako su se broj i veličina progala promijenili tijekom vremena, s najvećim porastom broja progala i širim rasponom veličina u 2011. godini.

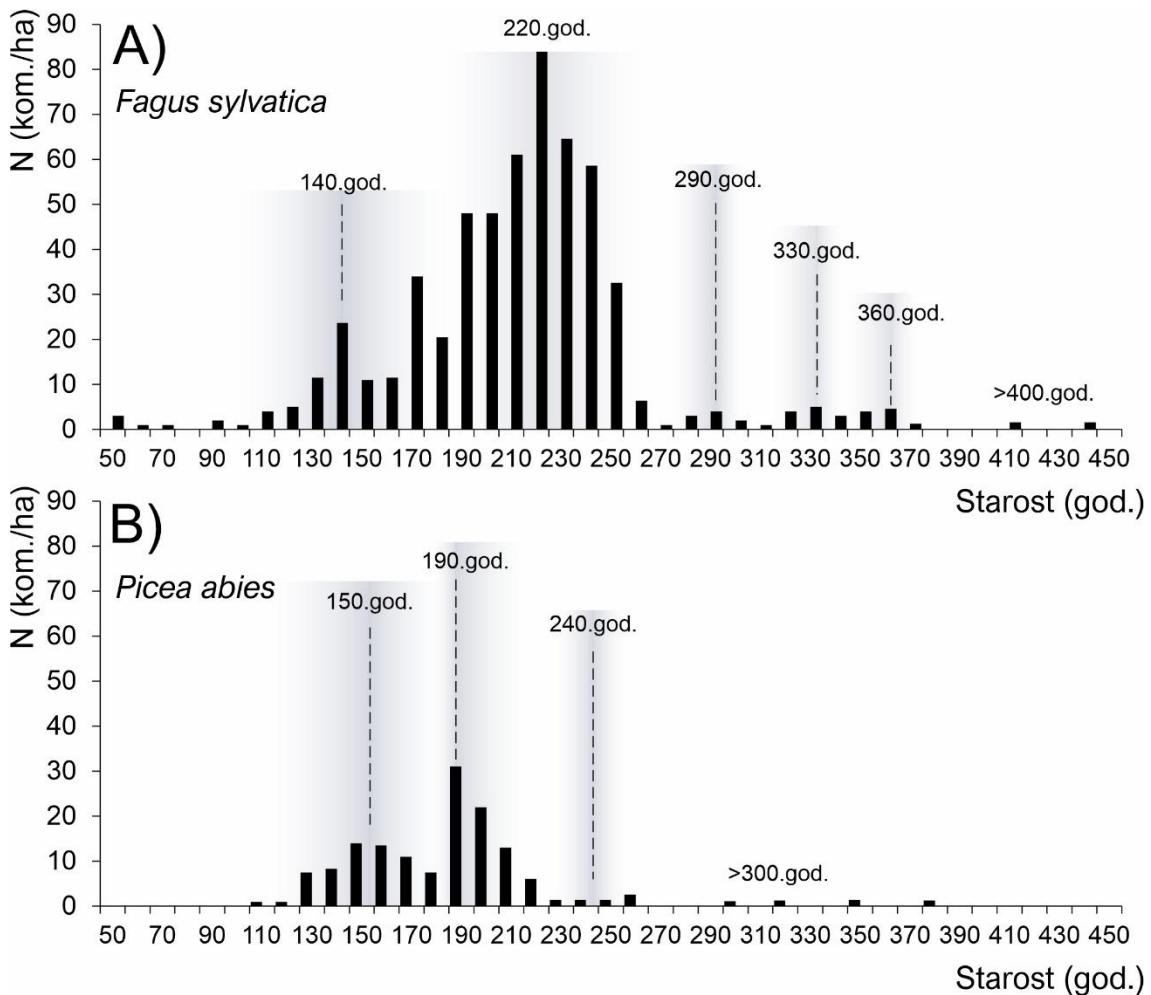
5.6. Utjecaj sastojinskih čimbenika na odumiranje

5.6.1. Dobna struktura

Dobna struktura istraživanih sastojina analizirana je na temelju procijenjene kambijalne starosti, određene apsolutnim brojem godova na uzorcima (izvrtcima) prikupljenim iz stabala. Usporedba starosti kao i dobne strukture sastojina napravljena je u odnosu na primarnu prašumu Smrčeve doline (Slika 64.). Ukupno je u analizu uključeno 430 uzoraka stabala, od čega 145 potječe iz prašume Smrčeve doline, dok su preostali uzorci prikupljeni iz nekada gospodarenih šuma obuhvaćenih ovim istraživanjem. U Tablici 1 prikazana je distribucija broja uzoraka (stabala) prema starosnim razredima širine 10 godina za svaki analizirani lokalitet.

Tablica 14. Distribucija broja stabala obične smreke na istraživanim lokalitetima sušenja i prašumi Smrčeve doline

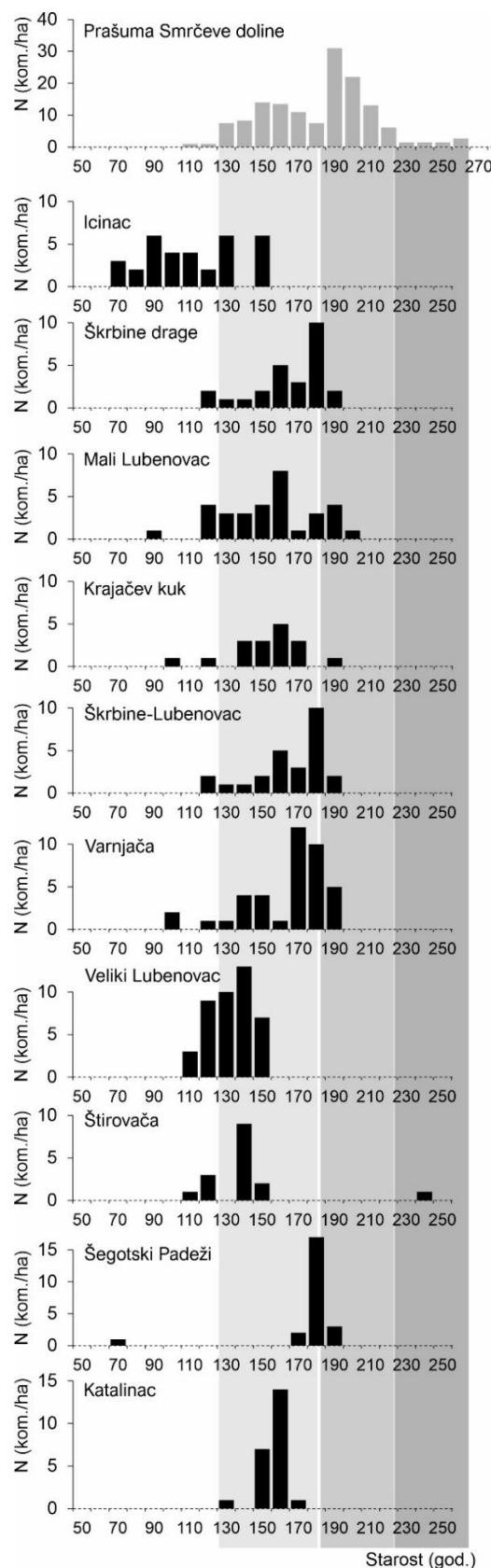
Starost (godine)	Praš uma	Ici na c	Katal inac	Krjače v kuk	M. Lubeno vac	Varn jača	V.Lube novac	Pad eži	Škrbine Drage	Škrbine- Lubenovac	Štiro vača
50											1
60											
70		3						1			
80		2									
90		6			1						
100		4		1		2					
110	1	4					3				1
120	1	2		1	4	1	9		2		3
130	8	6	1		3	1	10		1		
140	8			3	3	4	13		1	1	9
150	14	6	7	3	4	4	7		2	1	2
160	14		14	5	8	1			5	4	
170	11		1	3	1	12		2	3		9
180	8			0	3	10		17	10		10
190	31			1	4	5		3	2		8
200	22				1						3
210	13										
220	6										
230	1										
240	1										1
250	1										
260	3										
270											
280											
290											
300	1										
310											
320	1										
330											
340											
350	1										
360											
370											
380	1										



Slika 64. Distribucija broja stabla u primarnoj prašumi Smrčeve doline prema vrstama drveća (bukva A i obična smreka B). Sjenčano područje predstavlja potencijalne generacije stabala prema starosti

U primarnoj prašumi Smrčeve doline identificirane su tri sigurno a potencijalno četiri generacije stabala obične smreke (*Picea abies*). Najmlađa generacija ima približnu starost od 150 godina, druga generacija oko 190 godina, dok treća obuhvaća stabla stara približno 240 godina (Slika 64.). Najstarija stabla, čija starost premašuje 300 godina i doseže do 380 godina, čine potencijalno četvrtu generaciju.

Za razliku od smreke, bukva pokazuje znatno stariju dobnu strukturu (Slika 64A). Prema rezultatima ovog istraživanja, kod bukve je moguće razlikovati između pet i šest generacija stabala. Najmlađa generacija ima približnu starost od 140 godina, druga generacija oko 220 godina, treća oko 290 godina, četvrta oko 330 godina, a peta generacija oko 360 godina. Osim toga, prisutna su i pojedinačna iznimno stara stabla starija od 400 godina.

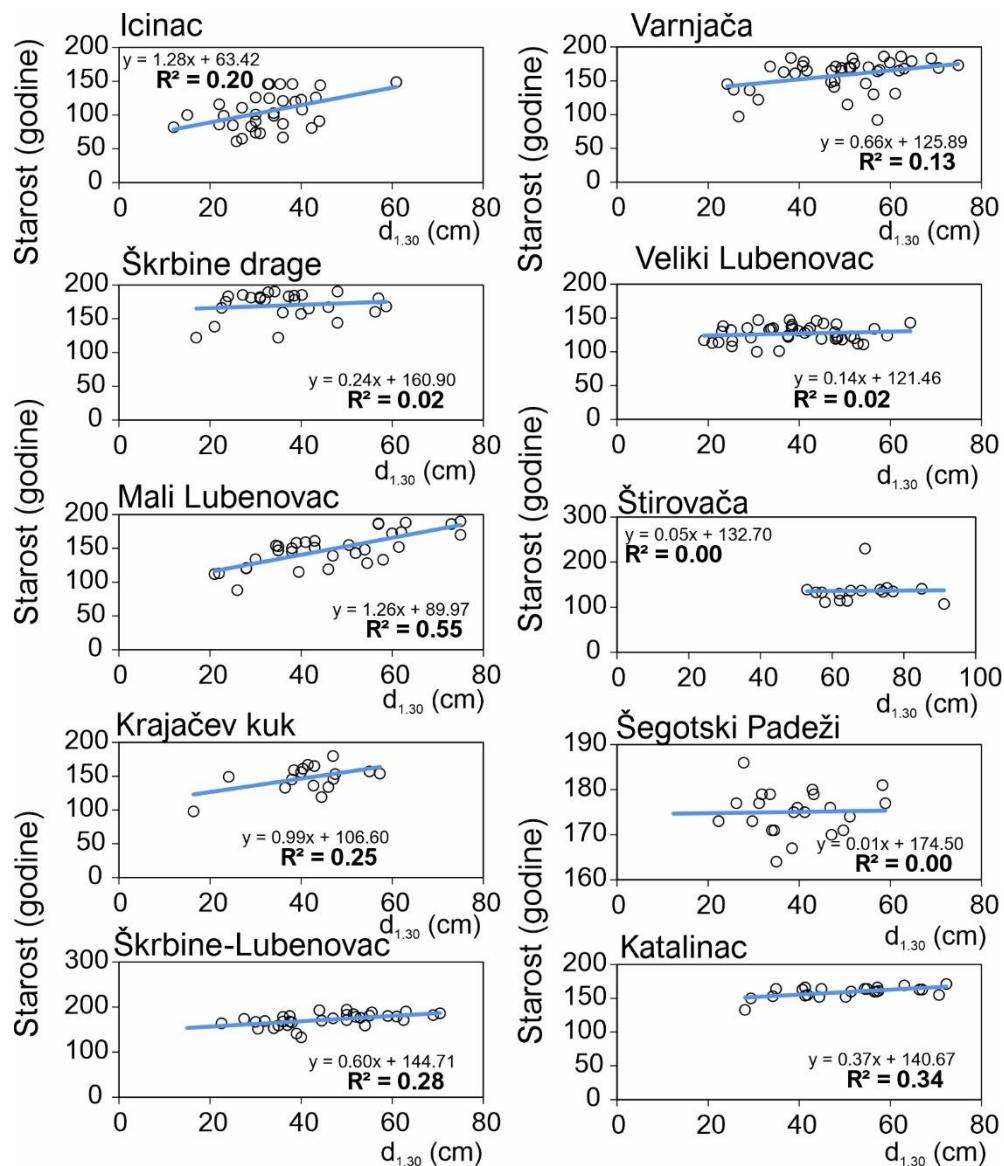


Slika 65. Usporedba distribucija broja stabala prema starosti obične smreke prema istraživanim lokalitetima

Istraživane sastojine zahvaćene sušenjem na području Nacionalnog parka Sjeverni Velebit uglavnom imaju unimodalnu ili bimodalnu dobnu strukturu, za razliku od primarne prašume Smrčeve doline (Slika 65). Prosječna starost varira između pojedinih lokaliteta, pri čemu dva lokaliteta, Šegotski Padeži i Katalinac, pokazuju isključivo unimodalnu distribuciju starosti s vrlo uskim rasponom godina u usporedbi s ostalim lokalitetima. Ovi lokaliteti predstavljaju karakteristične primjere sukcesijskih stadija smreke na područjima koja su prethodno bila obešumljena.

Općenito, prosječna starost istraživanih sastojina kreće se u rasponu od 100 do 180 godina. Najmlađe sastojine utvrđene su na lokalitetu Icinac, dok su najstarije prisutne na lokalitetima Šegotski Padeži i Škrbine Drage.

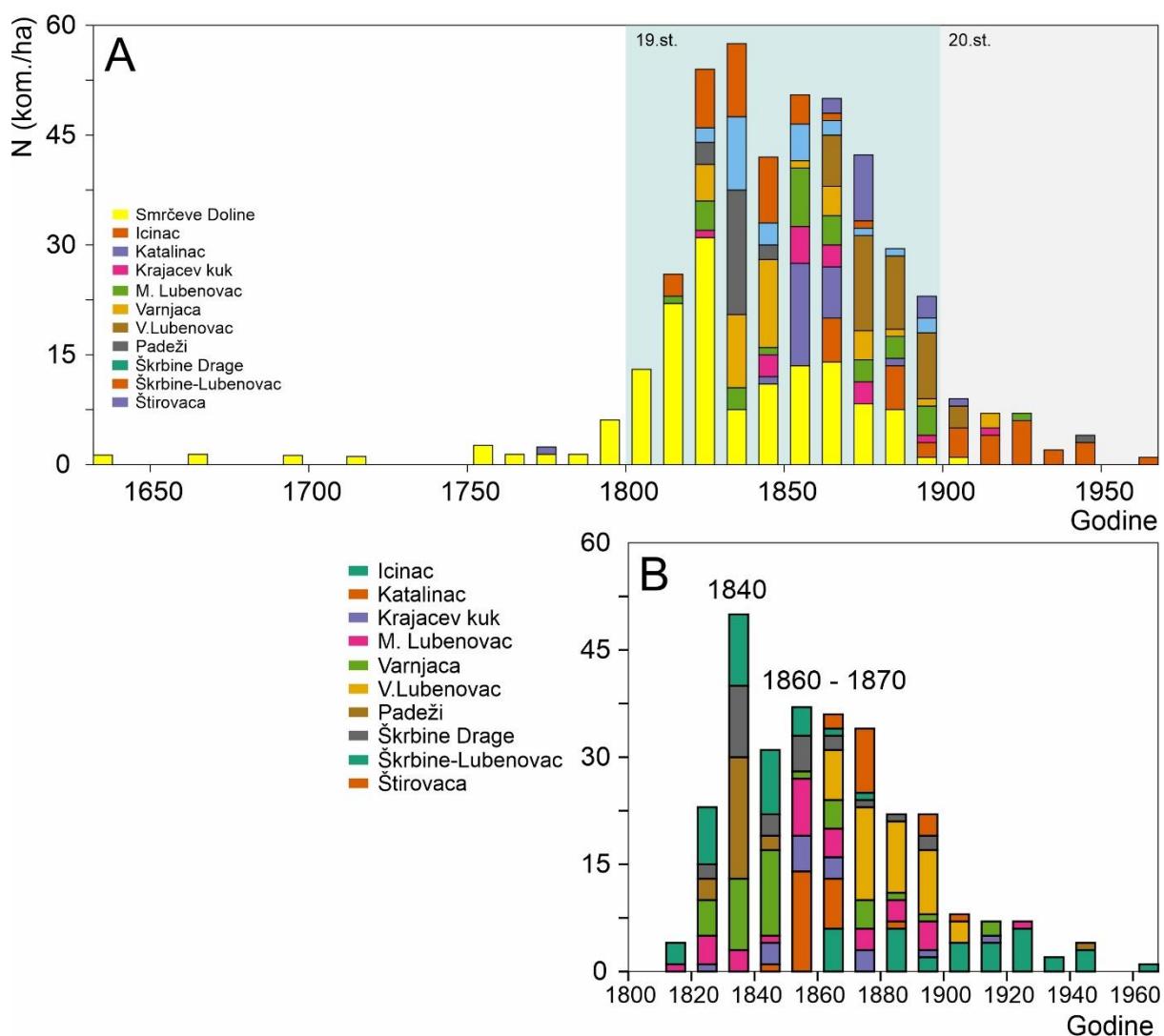
Ovisnost starosti stabala o prsnim promjerima je prikazana na slici 66.



Slika 66. Ovisnost starosti stabla i prsnog promjera prema lokalitetima istraživanja

5.6.2. Postanak sastojina

Većina istraživanih sastojina nastala je tijekom 19. stoljeća, s izraženim razdobljima obnove između 1840. i 1880. godine. Sve analizirane sastojine potječu pretežno iz tog vremenskog razdoblja. Dva izrazito sukcesijska lokaliteta, Šegotski Padeži i Katalinac, ujedno su i najstariji među istraživanim sastojinama. Usporedbom s prašumskom sastojinom (prikazanim žutom bojom na histogramu) pokazuje da se i u prašumi pojavljuje generacija stabala iz istog razdoblja, što je vidljivo na slici 67.



Slika 67. Distribucija postanka sastojina prema godinama (desetljećima), A – usporedba s primarnom prašumom Smrčeve Doline B – samo istraživane plohe.

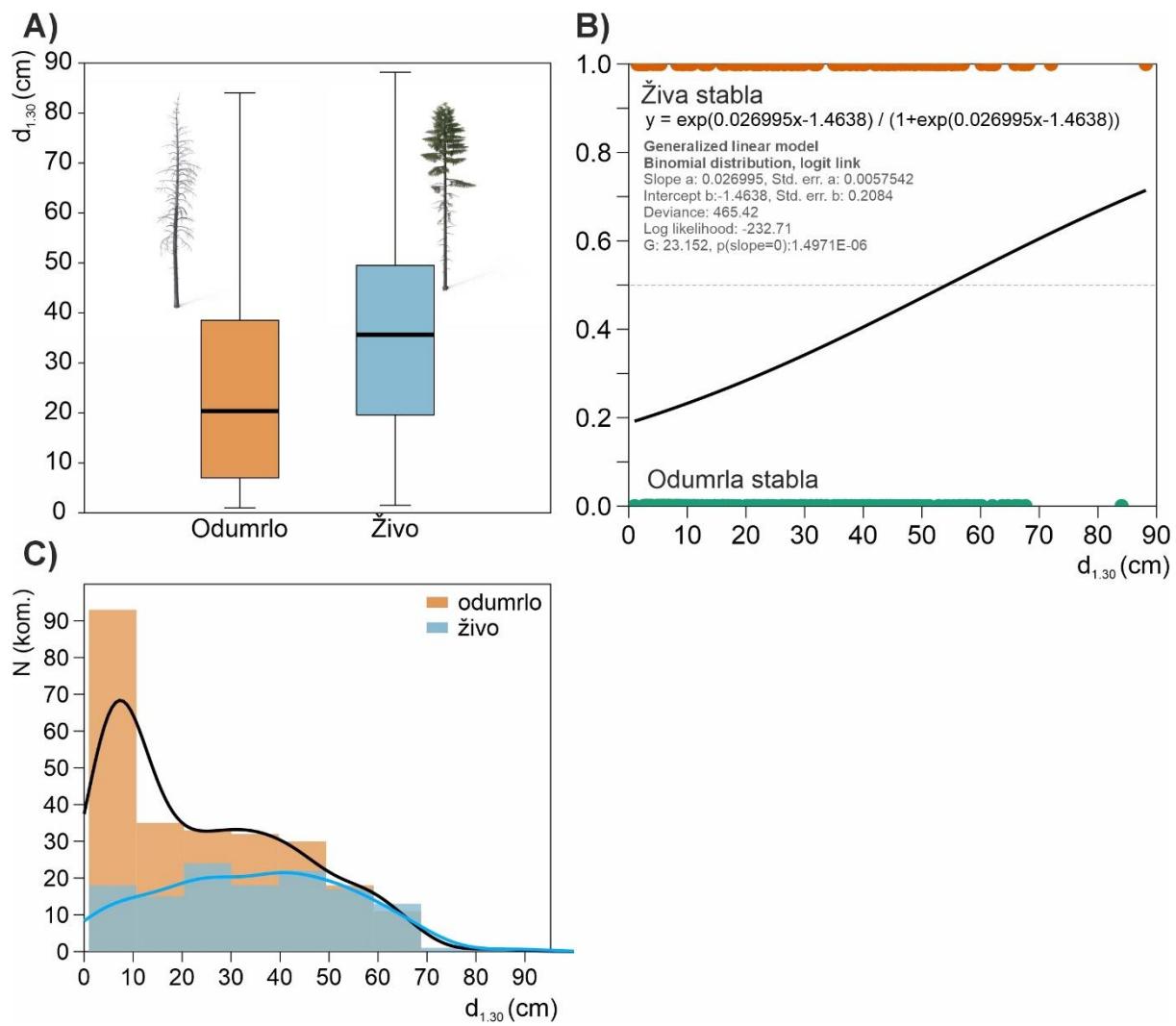
5.6.3. Utjecaj struktturnih elemenata na odumiranje stabala smreke

U ovom poglavlju analizirane su razlike u dimenzijama, odnosno prsnom promjeru, između odumrlih i živih stabala obične smreke (*Picea abies*). Istraživanje je provedeno na ukupno 253 odumrla i 129 živih stabala. Rezultati analize pokazuju da su prosječni prjni promjeri odumrlih stabala statistički značajno manji u odnosu na živa stabla ($t = 27,752$; $p = 1,6455E-93$).

Prosječni prjni promjer odumrlih stabala iznosi 24,3 cm, dok je kod živih stabala 34,5 cm, što predstavlja razliku od 10 cm. Osim prosječnih vrijednosti, i vrijednosti medijane pokazuju značajne razlike – medijan prsnog promjera živih stabala iznosi 35,7 cm, dok je kod odumrlih stabala 20,4 cm (Tablica 15).

Tablica 15. Osnovni deskriptivni podaci o prsnim promjerima odumrlih i živih stabala

	Odumrla	Lower conf	Upper conf	Živa	Lower conf	Upper conf
N	253	253	253	129	129	129
Max	84,03			88,17		
Mean	24,3	22,0	26,6	34,5	31,2	37,8
Std. error	1	1	1	2	2	2
Stand. dev	18,8	17,6	20,3	19,3	17,5	21,2
Median	20,4	16,2	24,8	35,7	31,5	42,7
25 prcntil	7,0	5,6	7,8	19,6	14,6	26,1
75 prcntil	38,5	34,1	42,7	49,5	45,5	54,9
Skewness	0,7	0,4	0,9	0,1	-0,2	0,4
Kurtosis	-0,6	-1,2	-0,2	-0,7	-1,3	-0,3
Coeff. var	77,4	71,2	83,8	55,8	48,4	63,1

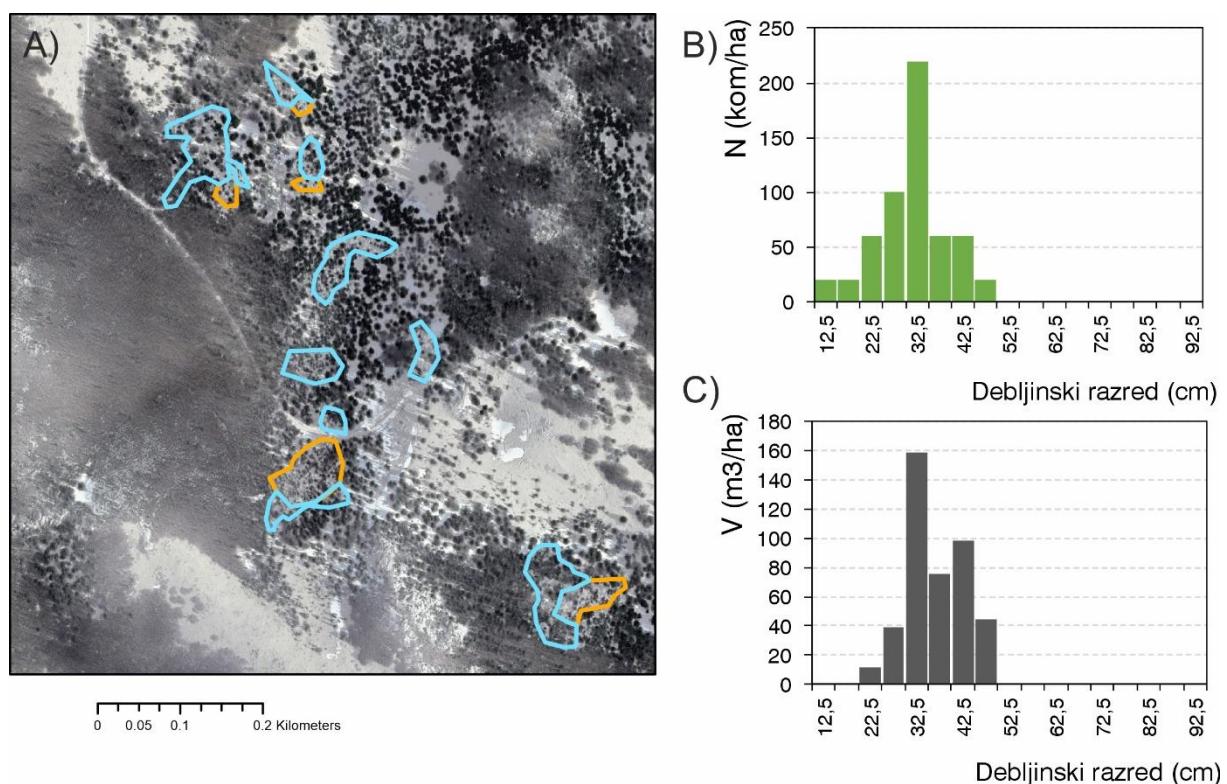


Slika 68. Odnos prsnih promjera živih i odumrlih stabala A), model vjerojatnosti odumiranja stabala B), distribucija broja odumrlih i živih stabala po deblijinskim stupnjevima

5.7. Strukturalna obilježja dijelova sastojina zahvaćenih sušenjem

Lokalitet 1.

Lokalitet 1 nalazi se na području Icinca, u blizini Zavižana. To je čista altimontansko-subalpinska šuma smreke s obrubljenim gladcem. Kao što je prikazano na slici 69 A), proces sušenja smrekovih sastojina na ovom lokalitetu započeo je 2004. godine (pričekano narančastom bojom), a daljnje širenje sušenja zabilježeno je 2007. godine (pričekano plavom bojom). U svrhu istraživanja na ovom lokalitetu postavljene su dvije pokušne plohe – jedna unutar zahvaćenog dijela sastojine, gdje je evidentirano sušenje smreke, dok je druga, kontrolna ploha, smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 69. Prostorni položaj lokaliteta Icinac (Zavižan) s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2004, plavo – 2007) A). Distribucija broja stabala prema deblijinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m^3/ha) prema deblijinskim stupnjevima.

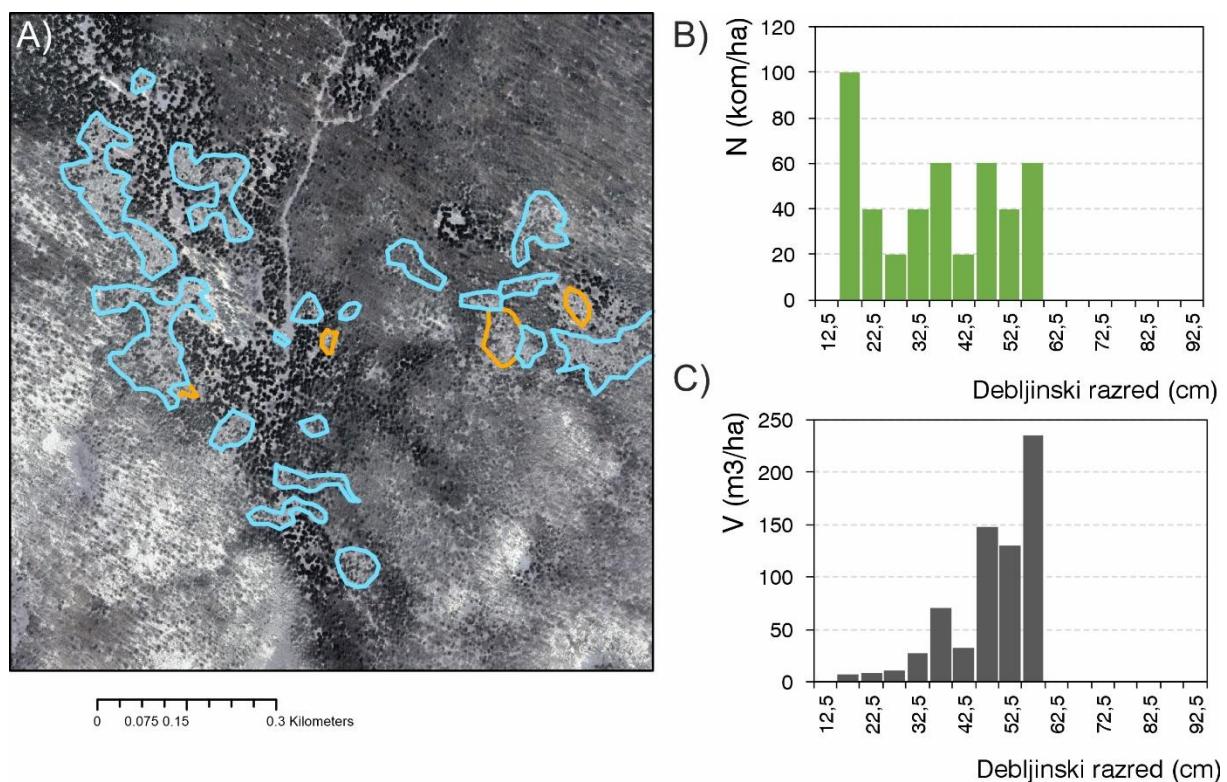
Ukupna gustoća sastojine iznosi 560 stabala po hektaru, pri čemu se najveći broj stabala nalazi u deblijinskom stupnju od 32,5 cm, s ukupno 220 stabala po hektaru (slika 69B). Ukupna drvna zaliha iznosi $429,37 m^3/ha$, pri čemu najveći udio volumena također pripada deblijinskom stupnju od 32,5 cm, s vrijednošću od $158,4 m^3/ha$ (Slika 69C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi $42,84 m^2/ha$ (Tablica 16).

Tablica 16. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5	20	0.2	0.4
17.5	20	0.4	0.8
22.5	60	2.4	11.8
27.5	100	5.6	39.2
32.5	220	17	158.4
37.5	60	6.4	75.4
42.5	60	7.6	98.4
47.5	20	3.2	44.8
Σ/ha	560	42.84	429.37

Lokalitet 2.

Lokalitet 2 nalazi se na području Škrbinih draga u čistoj smrekovoj sastojini (altimontansko-subalpinska šuma smreke s obrubljenim gladcem) Kao što je prikazano na slici 70A), proces sušenja smrekovih sastojina na ovom lokalitetu započeo je 2004. godine (prikazano narančastom bojom), a daljnje širenje sušenja zabilježeno je 2007. godine (prikazano plavom bojom). U svrhu istraživanja na ovom lokalitetu postavljene su dvije pokusne plohe – jedna unutar zahvaćenog dijela sastojine, gdje je evidentirano sušenje smreke, dok je druga, kontrolna ploha, smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 70. Prostorni položaj lokaliteta Škrbine Drage s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2004, plavo – 2007) A). Distribucija broja stabala prema deblijinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m³/ha) prema deblijinskim stupnjevima.

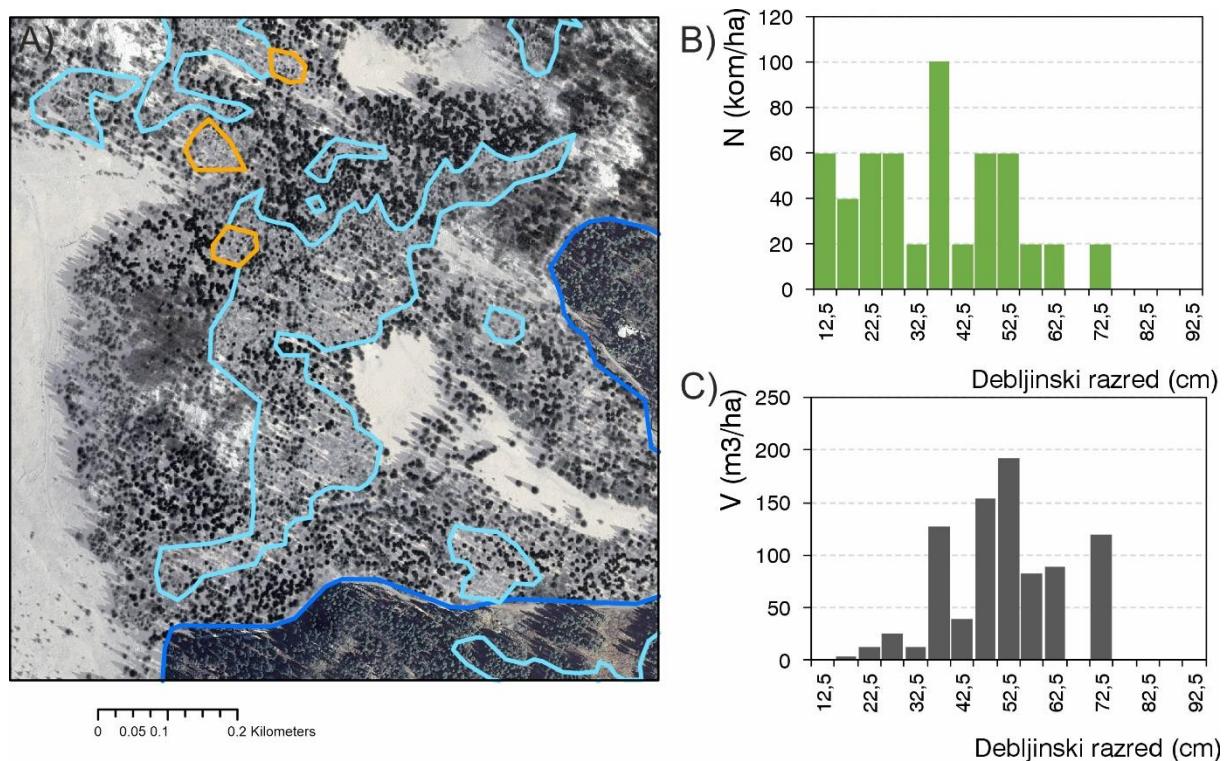
Ova sastojina po hektaru ima 440 stabala, pri čemu se najveći broj nalazi u deblijinskom stupnju od 17,5 cm, s ukupno 100 stabala po hektaru (slika 70B). Ukupna drvna zaliha iznosi 669,8 m³/ha, pri čemu je najveći iznos volumena u deblijinskom stupnju 57,5 cm, s vrijednošću od 235,4 m³/ha (Slika 70C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi 51 m²/ha (Tablica 17).

Tablica 17. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5			
17.5	100	2.4	7.6
22.5	40	1.6	8.2
27.5	20	1.4	10.8
32.5	40	3	27.4
37.5	60	6.2	71
42.5	20	2.6	31.8
47.5	60	10.2	148.2
52.5	40	8.6	129.4
57.5	60	15	235.4
Σ/ha	440	51	669.8

Lokalitet 3.

Lokalitet 3 nalazi se na području Malog Lubenovca. To je također čista sastojine smreke, altimontansko-subalpinska zajednica smreke s obrubljenim gladcem. Kao što je prikazano na slici 71A), proces sušenja smrekovih sastojina na ovom lokalitetu započelo je 2004. godine (pričekano narančastom bojom), a daljnje širenje sušenja zabilježeno je 2007. godine (pričekano plavom bojom). U svrhu istraživanja na ovom lokalitetu postavljene su dvije pokušne plohe – jedna unutar zahvaćenog dijela sastojine, gdje je evidentirano sušenje smreke, dok je druga, kontrolna ploha, smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 71. Prostorni položaj lokaliteta Mali Lubenovac s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2004, plavo – 2007) A). Distribucija broja stabala prema deblijinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m³/ha) prema deblijinskim stupnjevima.

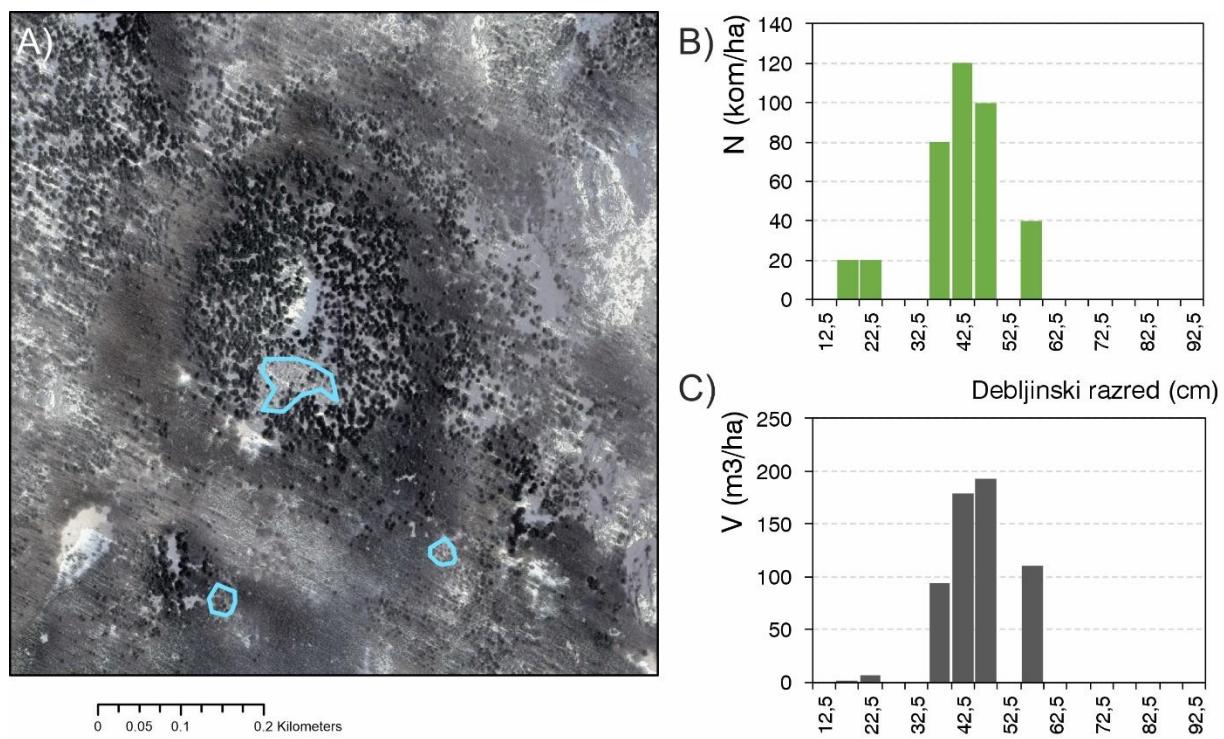
U ovoj sastojini broj stabala po hektaru je 540, pri čemu se najveći broj nalazi u deblijinskom stupnju od 37,5 cm, s ukupno 100 stabala po hektaru (Slika 71B). Ukupna drvna zaliha iznosi 857,6 m³/ha, pri čemu je najveći iznos volumena u deblijinskom stupnju 52,5 cm, s vrijednošću od 192,4 m³/ha (Slika 71C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi 64,6 m²/ha (Tablica 18).

Tablica 18. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5	60	0.6	1.2
17.5	40	1.2	3.4
22.5	60	2.4	12
27.5	60	3.6	25.8
32.5	20	1.4	12.2
37.5	100	10.8	127.2
42.5	20	3	39.6
47.5	60	10.6	153.8
52.5	60	12.6	192.4
57.5	20	5.2	82.4
62.5	20	5.6	88.4
72.5	20	7.6	119.2
Σ/ha	540	64.6	857.6

Lokalitet 4.

Lokalitet 4 nalazi se u neposrednoj blizini Krajačeva kuka. To je čista altimontansko-subalpinska šuma smreke s gladcem. Kao što je prikazano na slici 72A), proces sušenja smrekovih sastojina na ovom lokalitetu započeo je 2007. godine (prikazano plavom bojom), a daljnje širenje sušenja zasad nije zabilježeno. Na ovom lokalitetu postavljena je jedna pokusna ploha smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 72. Prostorni položaj lokaliteta Krajačev Kuk s prikazom sušenja (plavo – 2007)
A). Distribucija broja stabala prema deblijinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m³/ha) prema deblijinskim stupnjevima.

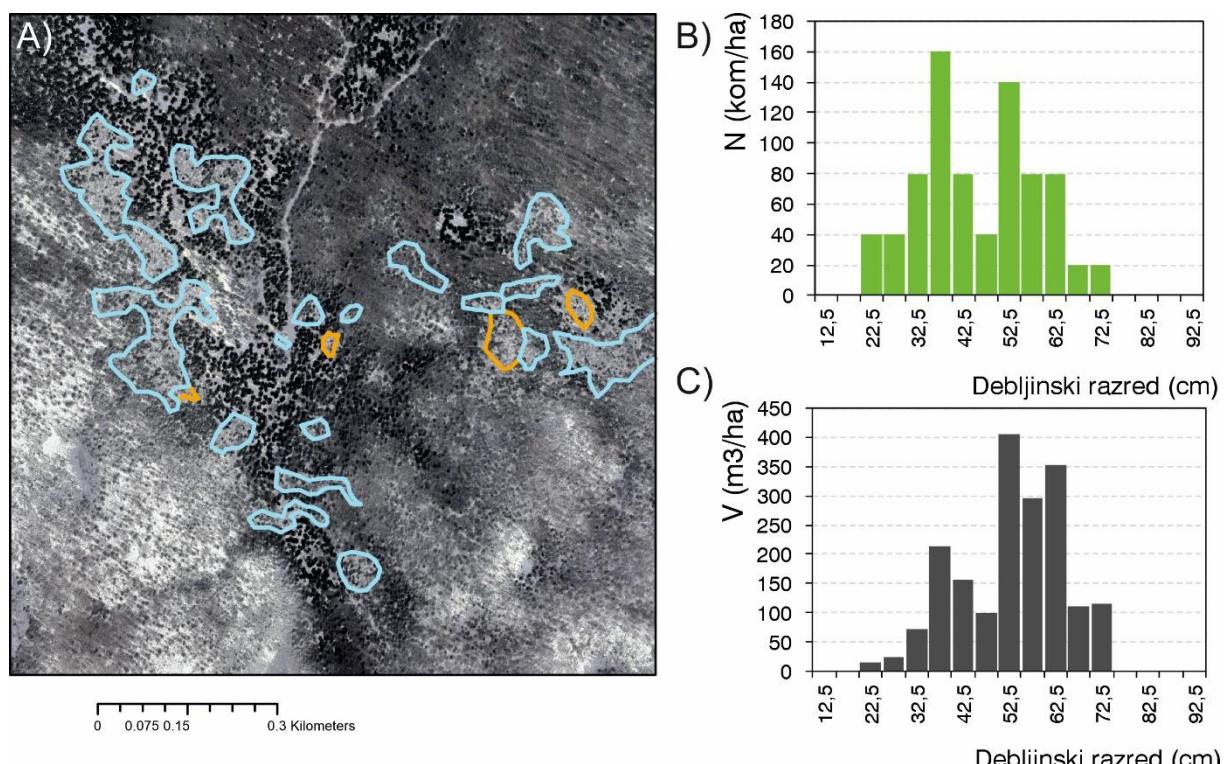
Sastojina ima 380 stabala po hektaru, pri čemu se najveći broj nalazi u deblijinskom stupnju od 42,5 cm, u kojem je 120 stabala (slika 72B). Ukupna drvna zaliha iznosi 586 m³/ha, pri čemu je najveći iznos volumena u deblijinskom stupnju 47,5 cm, s vrijednošću od 192,8 m³/ha (Slika 72C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi 54,4 m²/ha (Tablica 19).

Tablica 19. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5	0	0	0
17.5	20	0.4	2
22.5	20	1	7
27.5	0	0	0
32.5	0	0	0
37.5	80	9.2	94.4
42.5	120	16.6	179.2
47.5	100	17.4	192.8
52.5	0	0	0
57.5	40	9.8	110.6
Σ/ha	380	54.4	586

Lokalitet 5.

Lokalitet 5 nalazi se kod Lubenovačkih vrata. To je čista altimontansko-subalpinska šuma smreke s gladcem. Kao što je prikazano na slici 73A), proces sušenja smrekovih sastojina na ovom lokalitetu započeo je 2004. godine (prikazano narančastom bojom), a daljnje širenje sušenja zabilježeno je 2007. godine (prikazano plavom bojom). U svrhu istraživanja na ovom lokalitetu postavljene su dvije pokusne plohe – jedna unutar zahvaćenog dijela sastojine, gdje je evidentirano sušenje smreke, dok je druga, kontrolna ploha, smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 73. Prostorni položaj lokaliteta Škrbine Drage-Lubenovačka vrata s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2004, plavo – 2007) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m^3/ha) prema debljinskim stupnjevi

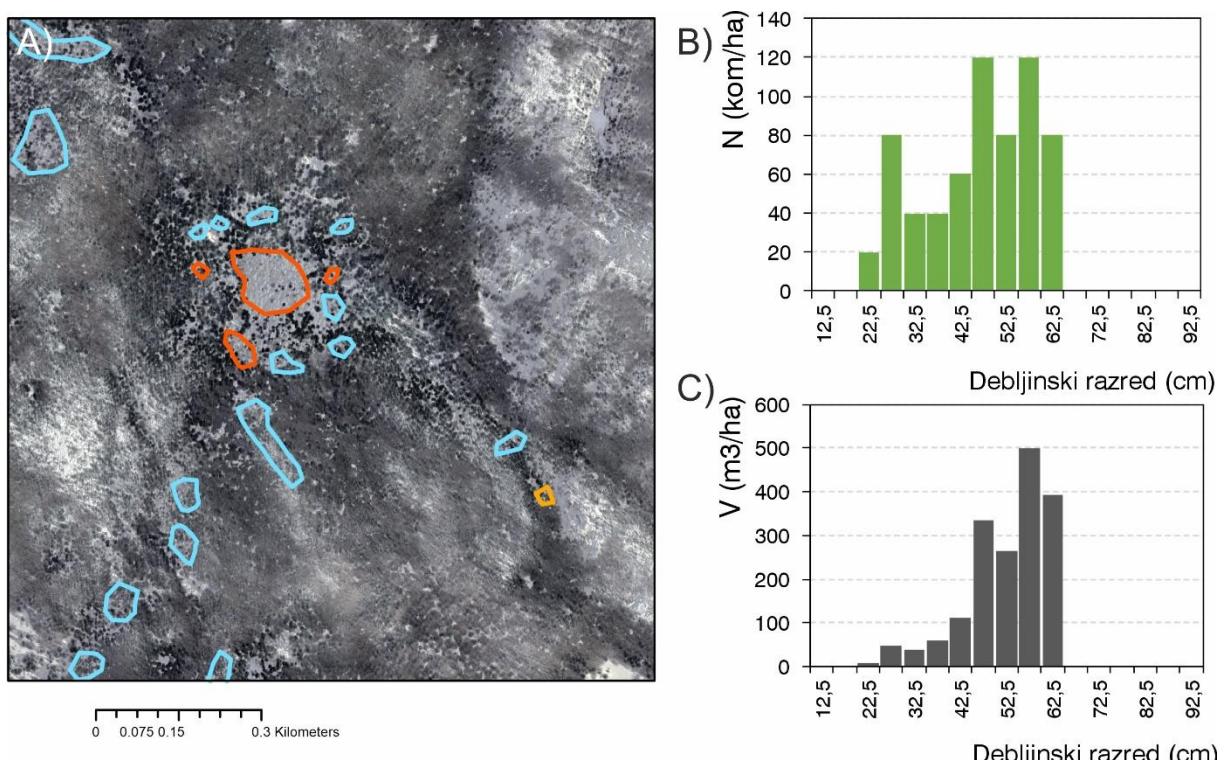
Broj stabala po hektaru u ovoj sastojini je 390, pri čemu je najviše stabala u debljinskom stupnju od 37,5 cm, u kojem je 80 stabala (slika 73B). Ukupna drvna zaliha iznosi $930,7\text{ m}^3/\text{ha}$, pri čemu je najveći iznos volumena u debljinskom stupnju 52,5 cm, s vrijednošću od $202,1\text{ m}^3/\text{ha}$ (Slika 73C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi $67,4\text{ m}^2/\text{ha}$ (Tablica 20).

Tablica 20. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5			
17.5			
22.5	20	0.8	7.4
27.5	20	1.2	12.3
32.5	40	3.1	35.6
37.5	80	8.6	107.2
42.5	40	5.8	78.2
47.5	20	3.6	49.5
52.5	70	14.3	202.1
57.5	40	10.3	148.3
62.5	40	12.1	176.8
67.5	10	3.7	55.4
72.5	10	3.9	57.9
Σ/ha	390	67.4	930.7

Lokalitet 6.

Lokalitet 6 nalazi se u vrtači Varnjača na predjelu Cipala. To je čista altimontansko-subalpinska šuma smreke s gladcem. Kao što je prikazano na slici 74A), proces sušenja smrekovih sastojina na ovom lokalitetu započeo je 2007. (prikazano plavom bojom), a daljnje širenje sušenja zabilježeno je 2016. godine (prikazano crvenom bojom). U svrhu istraživanja na ovom lokalitetu postavljene su dvije pokušne plohe – jedna unutar zahvaćenog dijela sastojine, gdje je evidentirano sušenje smreke, dok je druga, kontrolna ploha, smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 74. Prostorni položaj lokaliteta Varnjača s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2004, plavo – 2007, crveno - 2016) A), distribucija broja stabala prema deblijinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m³/ha) prema deblijinskim stupnjevima C)

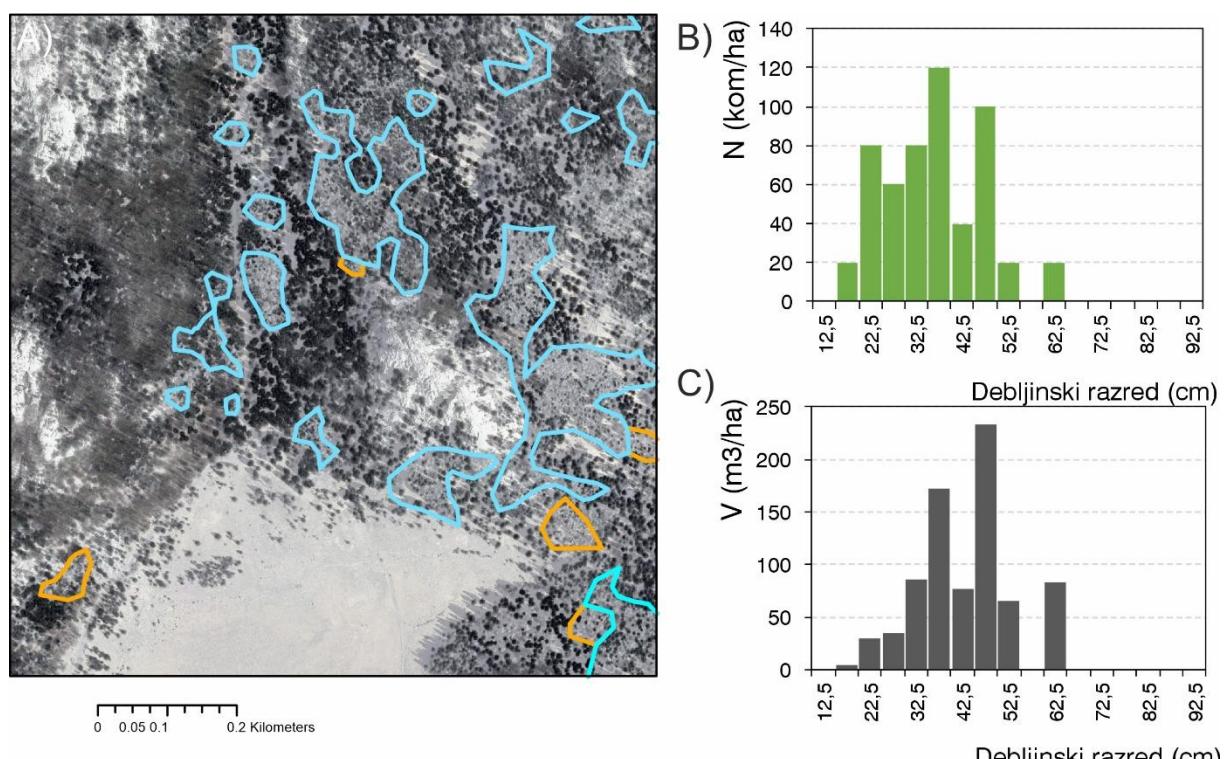
Ova sastojina ima 390 stabala po hektaru, pri čemu je najviše stabala u deblijinskim stupnjevima 47,5 cm i 57,5, u kojima je po 60 stabala (slika 74B). Ukupna drvna zaliha iznosi 878,2 m³/ha, pri čemu je najveći iznos volumena u deblijinskom stupnju 57,5 cm, s vrijednošću od 250,1 m³/ha (Slika 74C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi 58 m²/ha (Tablica 21).

Tablica 21. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5	0	0	0
17.5	0	0	0
22.5	10	0.5	3.8
27.5	40	2.4	23.3
32.5	20	1.6	19
37.5	20	2.3	29.7
42.5	30	4	55.8
47.5	60	11	167.3
52.5	40	8.5	132.4
57.5	60	15.6	250.1
62.5	40	12.1	196.8
Σ/ha	320	58	878.2

Lokalitet 7.

Lokalitet 7 nalazi se na području Velikog Lubenovca. To je također čista sastojine smreke, altimontansko-subalpinska zajednica smreke s gladcem. Kao što je prikazano na slici 75A), proces sušenja smrekovih sastojina na ovom lokalitetu započeo je 2004. godine (prikazano narančastom bojom), a daljnje širenje sušenja zabilježeno je 2007. godine (prikazano plavom bojom). U svrhu istraživanja na ovom lokalitetu postavljene su dvije pokusne plohe – jedna unutar zahvaćenog dijela sastojine, gdje je evidentirano sušenje smreke, dok je druga, kontrolna ploha, smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 75. Prostorni položaj lokaliteta Veliki Lubenovac s prikazom sušenja prema godinama (narančasto – 2004, plavo – 2007) A). Distribucija broja stabala prema deblijinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m³/ha) prema deblijinskim stupnjevima

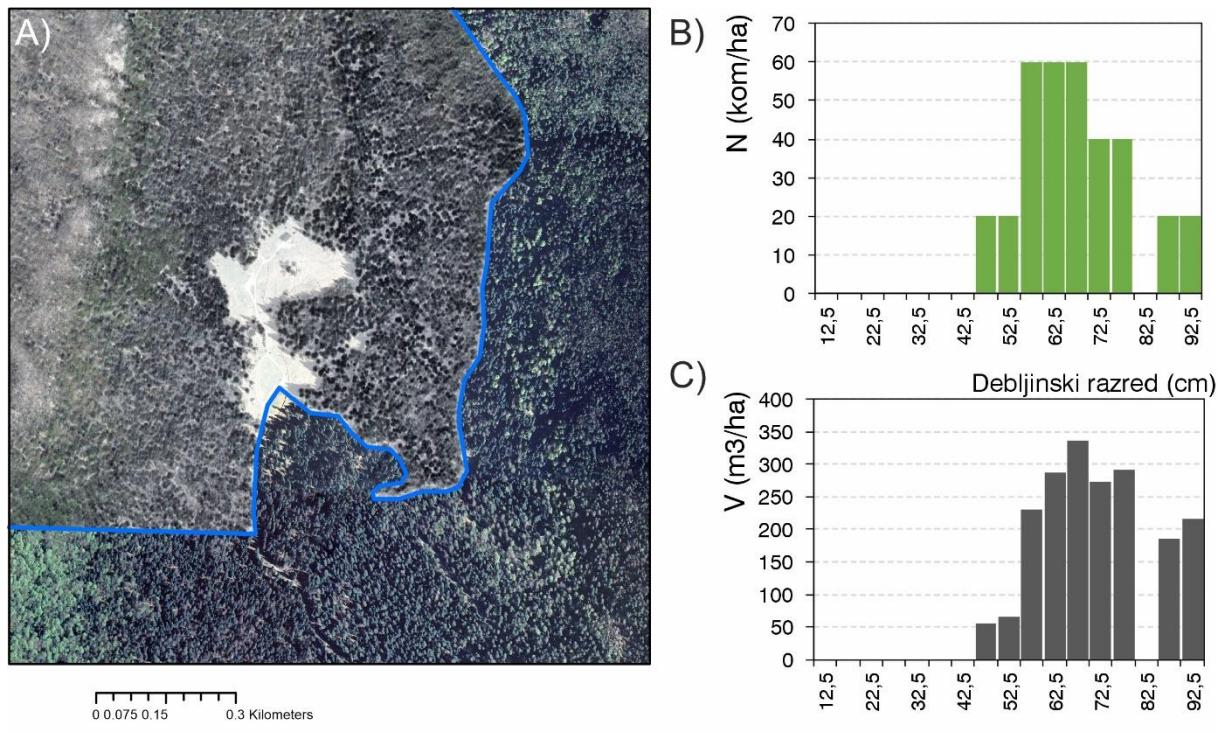
Ova sastojina ima 540 stabala po hektaru, pri čemu je najviše stabala u deblijinskom stupnju 37,5, u kojem je 120 stabala (slika 75B). Ukupna drvna zaliha iznosi 786 m³/ha, pri čemu je najveći iznos volumena u deblijinskom stupnju 47,5 cm, s vrijednošću od 233,8 m³/ha (Slika 75C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi 62,4 m²/ha (Tablica 22).

Tablica 22. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5			
17.5	20	0.6	4.4
22.5	80	3.2	29.4
27.5	60	3.2	35.4
32.5	80	7	85.2
37.5	120	13.4	172.4
42.5	40	5.8	76.6
47.5	100	17.8	233.8
52.5	20	5	65.4
57.5			
62.5	20	6.4	83.4
Σ/ha	540	62.4	786

Lokalitet 8.

Lokalitet 8 nalazi se na području Štirovače. To je gorska šuma smreke s šumskim pavlovcem. Kao što se vidi na slici 76A), ovdje nije zabilježeno sušenje smrekovih sastojina, stoga je na ovom lokalitetu postavljena jedna pokusna ploha.



Slika 76. Prostorni položaj lokaliteta Štirovača A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m³/ha) prema debljinskim stupnjevima

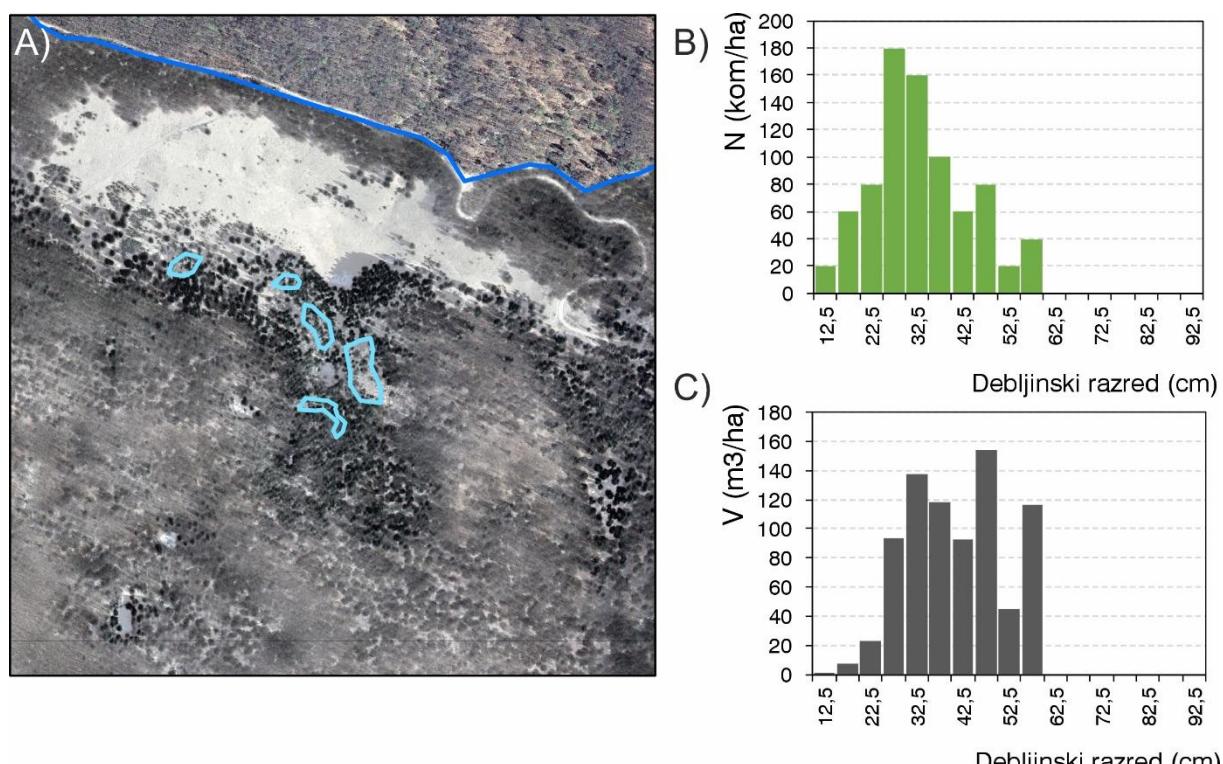
U ovoj sastojini zabilježeno je 170 stabala po hektaru, pri čemu je najviše stabala u debljinskim stupnjevima 57,5, 62,5 i 67,5 cm, u kojima je po 30 stabala (slika 76B). Ukupna drvna zaliha iznosi 969,8 m³/ha, pri čemu je najveći iznos volumena u debljinskom stupnju 67,5 cm, s vrijednošću od 168,6 m³/ha (Slika 76C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi 61,5 m²/ha (Tablica 23).

Tablica 23. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5			
17.5			
22.5			
27.5			
32.5			
37.5			
42.5			
47.5	10	1.8	27.9
52.5	10	2.2	32.5
57.5	30	7.6	114.7
62.5	30	9.3	143.3
67.5	30	10.7	168.6
72.5	20	8.6	136.5
77.5	20	9.1	146.1
82.5			
87.5	10	5.7	92.6
92.5	10	6.5	107.6
Σ/ha	170	61.5	969.8

Lokalitet 9.

Lokalitet 9 nalazi se na području Šegotskih padeža. To je također čista sastojine smreke, altimontansko-subalpinska zajednica smreke s gladcem. Kao što je prikazano na slici 77A), proces sušenja smrekovih sastojina na ovom lokalitetu započeo je 2004. godine (prikazano plavom bojom), a daljnje širenje sušenja nije zabilježeno. U svrhu istraživanja na ovom lokalitetu postavljene su dvije pokusne plohe – jedna unutar zahvaćenog dijela sastojine, gdje je evidentirano sušenje smreke, dok je druga, kontrolna ploha, smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 77. Prostorni položaj lokaliteta Šegotski Padeži s prikazom početka sušenja (plavo – 2004) A). Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima B) i distribucija volumena (m^3/ha) prema debljinskim stupnjevima.

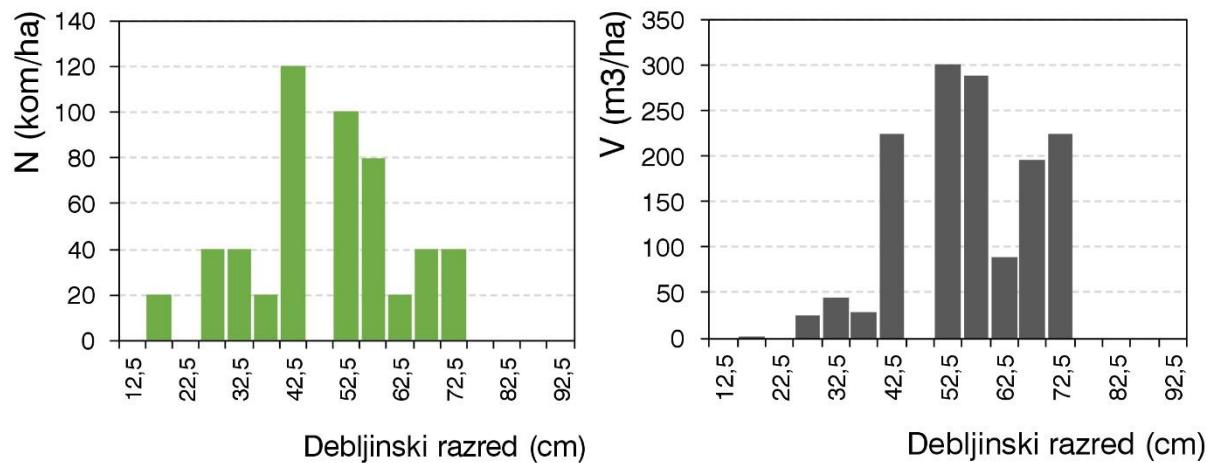
Ova sastojina ima 400 stabala po hektaru, pri čemu je najviše stabala u debljinskom stupnju 27,5 cm, u kojem je 90 stabala (slika 77B). Ukupna drvna zaliha iznosi 394,5 m^3/ha , pri čemu je najveći iznos volumena u debljinskom stupnju 47,5 cm, s vrijednošću od 76,9 m^3/ha (Slika 77C). Ukupna izračunata temeljnica iznosi 38,7 m^2/ha (Tablica 24).

Tablica 24. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m²/ha)- temeljnica, V (m³/ha)

d(cm)	N (kom/ha)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5	10	0.3	0.1
17.5	30	0.7	3.9
22.5	40	1.5	11.3
27.5	90	5.2	46.9
32.5	80	6.8	68.9
37.5	50	5.6	59.3
42.5	30	4.2	46.3
47.5	40	7	76.9
52.5	10	2.1	22.5
57.5	20	5.3	58.4
Σ/ha	400	38.7	394.5

Lokalitet 10.

Lokalitet 10 nalazi se na području Katalinca. To je također čista sastojine smreke, altimontansko-subalpinska zajednica smreke s gladcem. U svrhu istraživanja na ovom lokalitetu postavljena je samo kontrolna ploha, smještena u zdravom dijelu sastojine.



Slika 78. Distribucija broja stabala prema debljinskim stupnjevima (lijevo) i distribucija volumena (m^3/ha) prema debljinskim stupnjevima za lokalitet Katalinac (desno)

Ova sastojina ima 260 stabala po hektaru, pri čemu je najviše stabala u debljinskom stupnju 42,5 cm, u kojem je 60 stabala (slika 78). Ukupna drvna zaliha iznosi 710,7 m^3/ha , pri čemu je najveći iznos volumena u debljinskom stupnju 52,5 cm, s vrijednošću od 150,5 m^3/ha (Slika 78). Ukupna izračunata temeljnica iznosi 52 m^2/ha (Tablica 25).

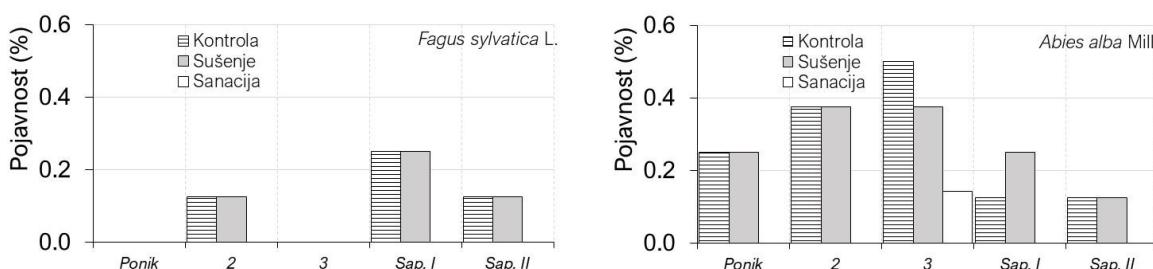
Tablica 25. Strukturne značajke istraživane plohe: N (kom/ha)- gustoća sastojine, G (m^2/ha)- temeljnica, V (m^3/ha)

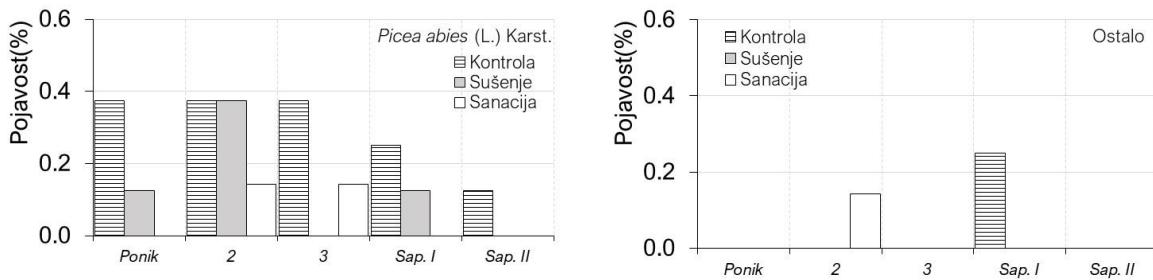
d(cm)	N (kom/ha)	G (m^2/ha)	V (m^3/ha)
17.5	10	0.2	0.7
22.5	0	0	0
27.5	20	1.3	12.9
32.5	20	1.9	21.9
37.5	10	1.1	13.9
42.5	60	8.5	111.9
47.5	0	0	0
52.5	50	10.7	150.5
57.5	40	10.2	143.9
62.5	10	3.1	44.2
67.5	20	7	98.4
72.5	20	8	112.4
Σ/ha	260	52	710.7

5.8. Pomlađivanje istraživanih sastojina

5.8.1. Pojavnost ponika i pomlatka na istraživanim plohamama

Pojavnost ponika i pomlatka na pokusnim plohamama odražava uspješnost prirodne regeneracije glavnih vrsta drveća u različitim tretmanima: kontrola (zdrava sastojina), sušenje i sanacija. Ukupna pojavnost analiziranih vrsta ne prelazi 50%, pri čemu se vrijednosti kreću u rasponu od 0 do 50%, ovisno o tretmanu i starosnoj kategoriji mladih biljaka. Najzastupljenija vrsta je obična jela (*Abies alba* Mill.), koja pokazuje najveću pojavnost na kontrolnim plohamama, gdje dolazi na 50% ploha. Na plohamama zahvaćenim sušenjem pojavnost je nešto niža, oko 40% ploha, dok je na saniranim površinama najmanje zastupljena, s pojavnosti od svega 15% u kategoriji biljaka starih tri godine (Slika 79). Obična smreka (*Picea abies* L. Karst.) također bilježi najveću pojavnost na kontrolnim plohamama u svim starosnim kategorijama (1–3 godine), s prosječnom pojavnosti na približno 40% istraživanih ploha. Nasuprot tome, smrekov ponik pokazuje najmanju zastupljenost na površinama na kojima je proveden sanitarni sjek (Slika 79). Obična bukva (*Fagus sylvatica* L.) pokazuje nešto nižu pojavnost u usporedbi s jelom i smrekom, pri čemu je njena regeneracija prisutna u približno 20% slučajeva na kontrolnim plohamama i onima zahvaćenima sušenjem. Međutim, na saniranim površinama nije zabilježena prisutnost bukovog ponika i pomlatka u analiziranim starosnim kategorijama niti na jednoj plohi (Slika 79).

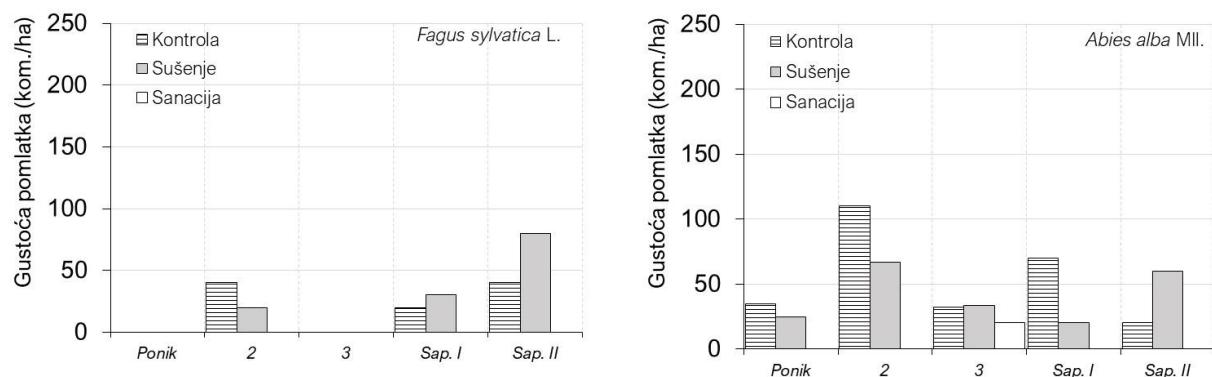


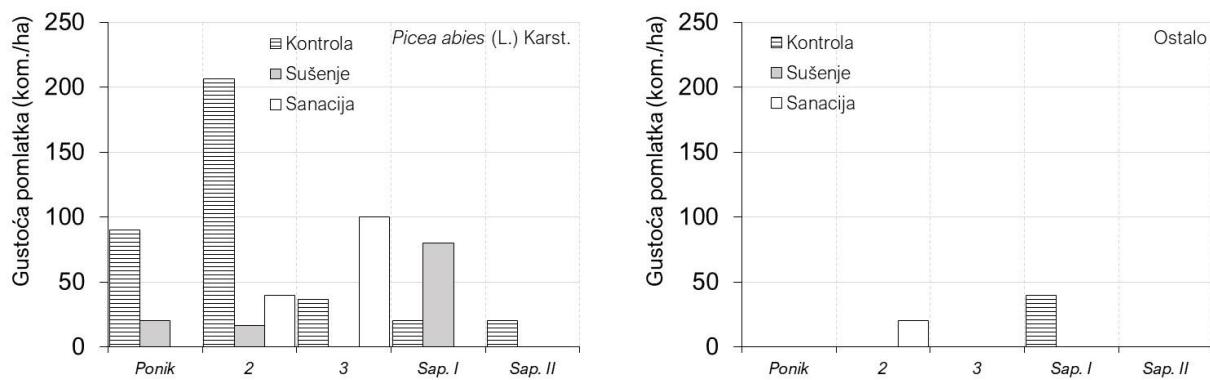


Slika 79. Pojavnost (%) ponika i pomlatka na istraživanim plohamama prema glavnim vrstama drveća. Gdje su: Ponik – biljka starosti 1.godinu, 2 – biljke starosti 2. godine, 3 – biljke starosti 3. godine, Sap.I – biljke starije od 3 godine do 25cm visine, Sap. II – biljke starije od 3 godine od 25 do 50 cm visine.

5.8.2. Gustoća ponika i pomlatka

Prosječna gustoća (kom./ha) je izračunata s obzirom na plohe na kojima je zabilježen ponik i pomladak glavnih vrsta drveća prema tretmanima (kontrola, sušenje, sanacija). Najveća gustoća ponika obične bukve zabilježena je na plohamama zahvaćenima sušenjem, gdje doseže 80 kom./ha u stadiju Sap. II, dok na kontrolnim plohamama doseže 40 kom./ha u istom razvojnog stadiju (Slika 80). Na saniranim plohamama bukva nije zabilježena. Obična jela pokazuje najveću gustoću na kontrolnim plohamama, s vrijednostima do 110 kom./ha u ranim stadijima razvoja, dok je na plohamama zahvaćenima sušenjem prisutna u manjem broju, s maksimalnom gustoćom od 70 kom./ha u stadiju Sap. I. Na saniranim plohamama njezina regeneracija je znatno slabija te je zabilježena samo u trećoj godini (20 kom./ha)(Slika 80).





Slika 80. Prosječna gustoća (kom./ha) ponika i pomlatka na istraživanim plohamama prema glavnim vrstama drveća.

Obična smreka ostvaruje najveću gustoću na kontrolnim plohamama, s najvećom vrijednošću od 207 kom./ha u drugoj godini, dok je na plohamama zahvaćenima sušenjem prisutna u manjem broju (Slika 80). Na saniranim plohamama smrekov ponik u trećoj godini doseže 100 kom./ha (Tablica 26). Ostale vrste drveća zabilježene su u manjoj mjeri.

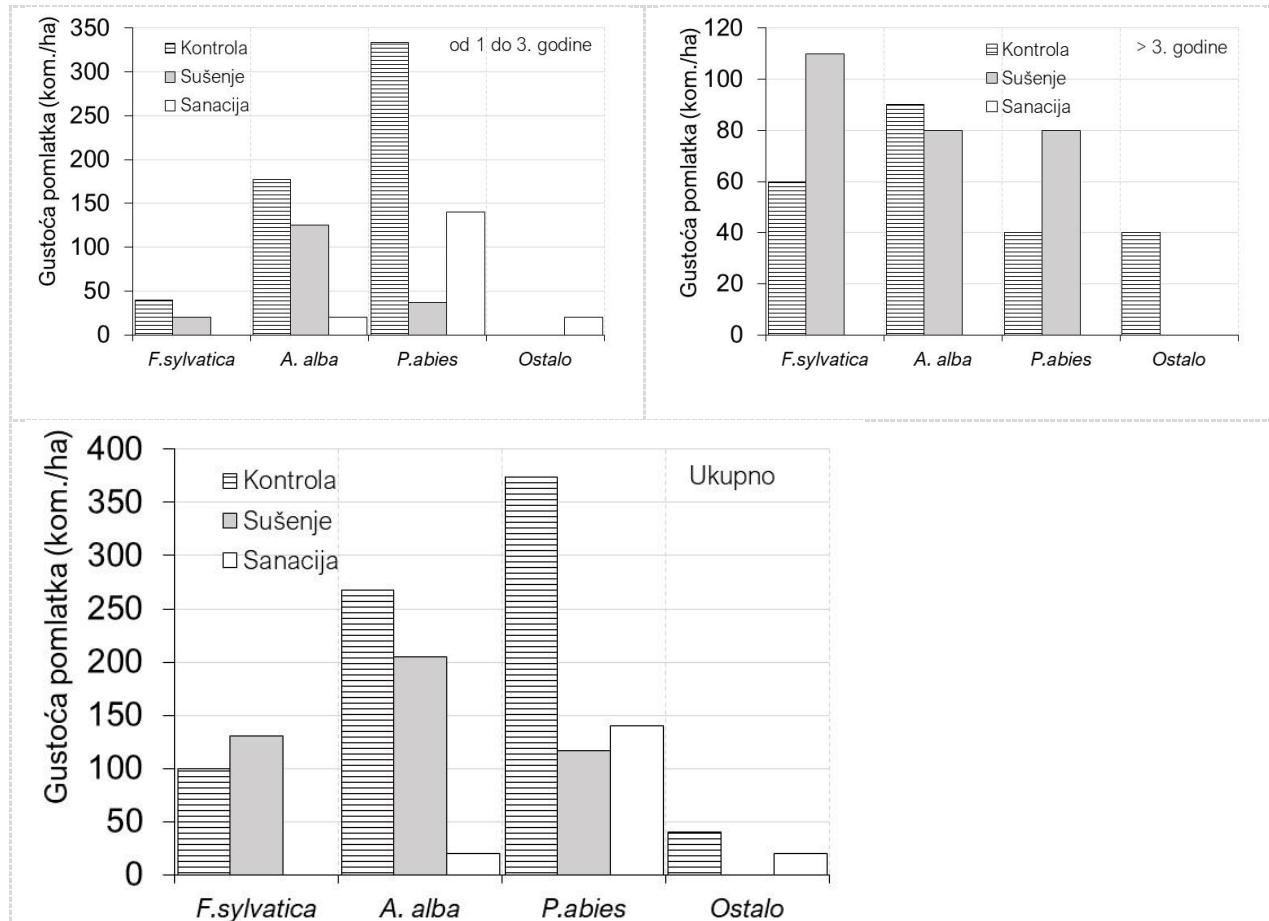
Tablica 26. Prosječna gustoća (kom./ha) ponika i pomlatka na istraživanim plohamama prema glavnim vrstama drveća

Tretman	<i>Fagus sylvatica</i>					<i>Abies alba</i>				
	Ponik	2	3	Sap. I	Sap. II	1	2	3	Sap. I	Sap. II
	(kom./ha)									
Kontrola		40		20	40	35	110	33	70	20
Sušenje		20		30	80	25	67	33	20	60
Sanacija								20		

Tretman	<i>Picea abies</i>					Ostalo				
	1	2	3	Sap. I	Sap. II	1	2	3	Sap. I	Sap. II
	(kom./ha)									
Kontrola	90	207	37	20	20				40	
Sušenje	20	17		80						
Sanacija		40	100				20			

Slika 81. prikazuje prosječnu ukupnu gustoću ponika i pomlatka glavnih vrsta drveća prema definiranim dobnim kategorijama i tretmanima. Rezultati pokazuju da su gustoće ponika i pomlatka obične jelje i smreke u kategorijama do tri godine starosti najviše na kontrolnim plohamama, dosežući 330 kom./ha za smrek i 175 kom./ha za jelu. S druge strane, biljke starije od tri godine najzastupljenije su na površinama zahvaćenima sušenjem, gdje obična bukva dominira s gustoćom od 110 kom./ha.

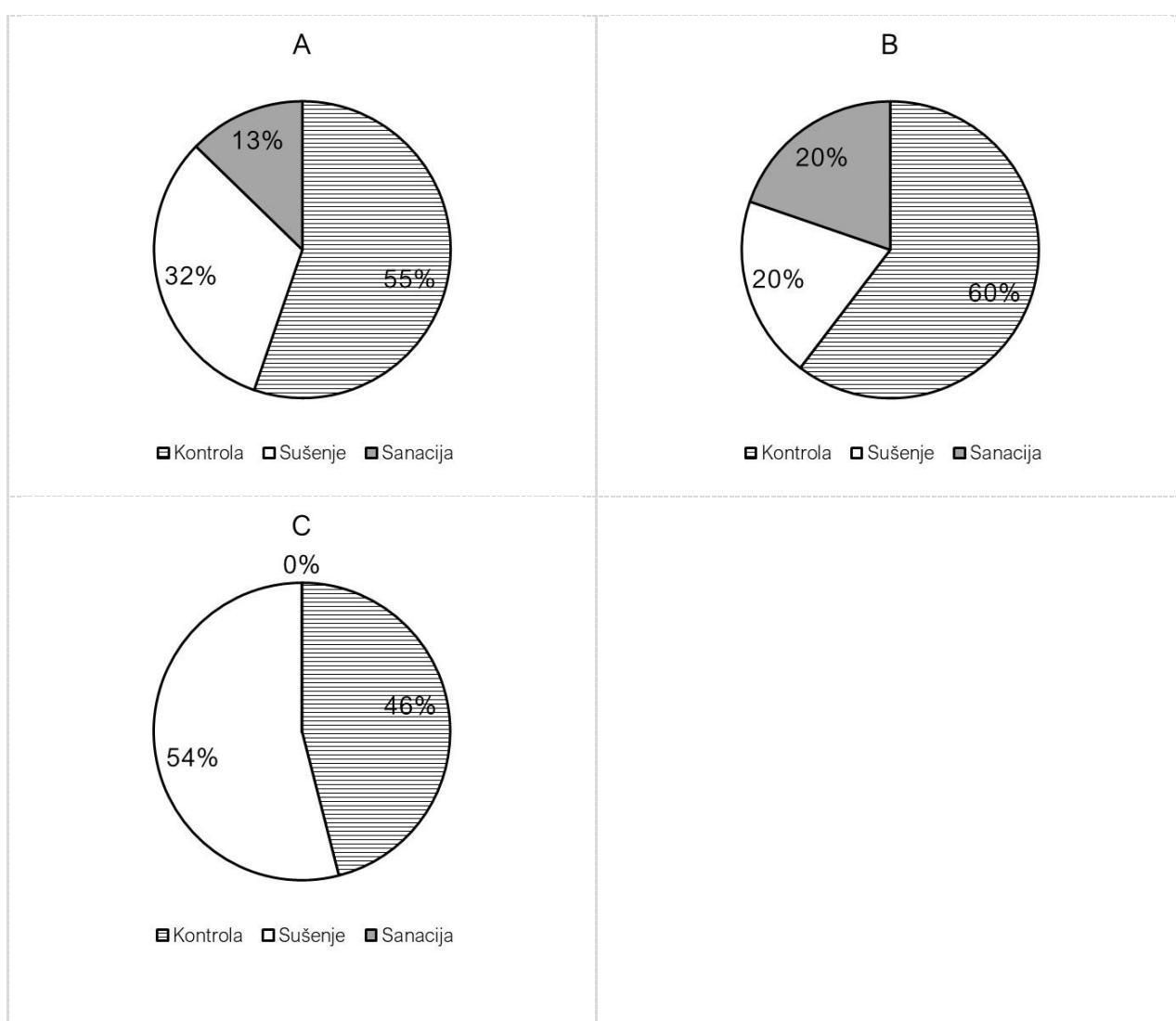
Kada se promatra ukupna prosječna gustoća, smreka i jela pokazuju najveće vrijednosti na kontrolnim plohamama (375 kom./ha i 270 kom./ha), dok je za bukvu najveća gustoća zabilježena na plohamama zahvaćenima sušenjem, dosežući 135 kom./ha.



Slika 81. Prosječna ukupna gustoća (kom./ha) ponika i pomlatka prema glavnim vrstama drveća i definiranim grupama: biljke od 1 do 3. godine starosti (lijevo) i biljke više od 3. godine starosti do 50 cm visine

Slika 82A. prikazuje relativni udio ukupnog broja ponika i pomlatka (do 50 cm visine) glavnih vrsta drveća u svim dobnim kategorijama u odnosu na tretmane. Rezultati pokazuju da je najveća zastupljenost glavnih vrsta zabilježena na kontrolnim plohamama, gdje one čine 55% ukupnog ponika i pomlatka. Površine zahvaćene sušenjem bilježe nešto manji udio, pri čemu glavne vrste čine 32% ukupne regeneracije, dok je najmanji postotak zabilježen na saniranim plohamama, gdje glavne vrste sudjeluju s tek 13%. Slika 82B. prikazuje relativni udio ukupnog broja ponika glavnih vrsta drveća u dobi od 1 do 3 godine, s obzirom na različite tretmane. Rezultati pokazuju da se najveći dio ponika

javlja na kontrolnim plohamama, gdje glavne vrste čine 60% ukupnog broja, što odgovara gustoći od 551 kom./ha (Tablica 27). Površine zahvaćene sušenjem te sanirane površine bilježe značajno niži udio ponika, pri čemu na svaku od ovih kategorija otpada po 20% ukupne regeneracije. Slika 82C. prikazuje relativni udio ukupnog broja ponika i pomlatka (kom./ha) glavnih vrsta drveća starijih od tri godine, visine do 50 cm, s obzirom na tretmane. Rezultati pokazuju da se 46% ukupnog broja biljaka (230 kom./ha, tablica 27) nalazi na kontrolnim plohamama, dok 54% (270 kom./ha, Tablica 27) otpada na površine zahvaćene sušenjem. U ovoj kategoriji na saniranim plohamama nije zabilježena prisutnost nijedne vrste.



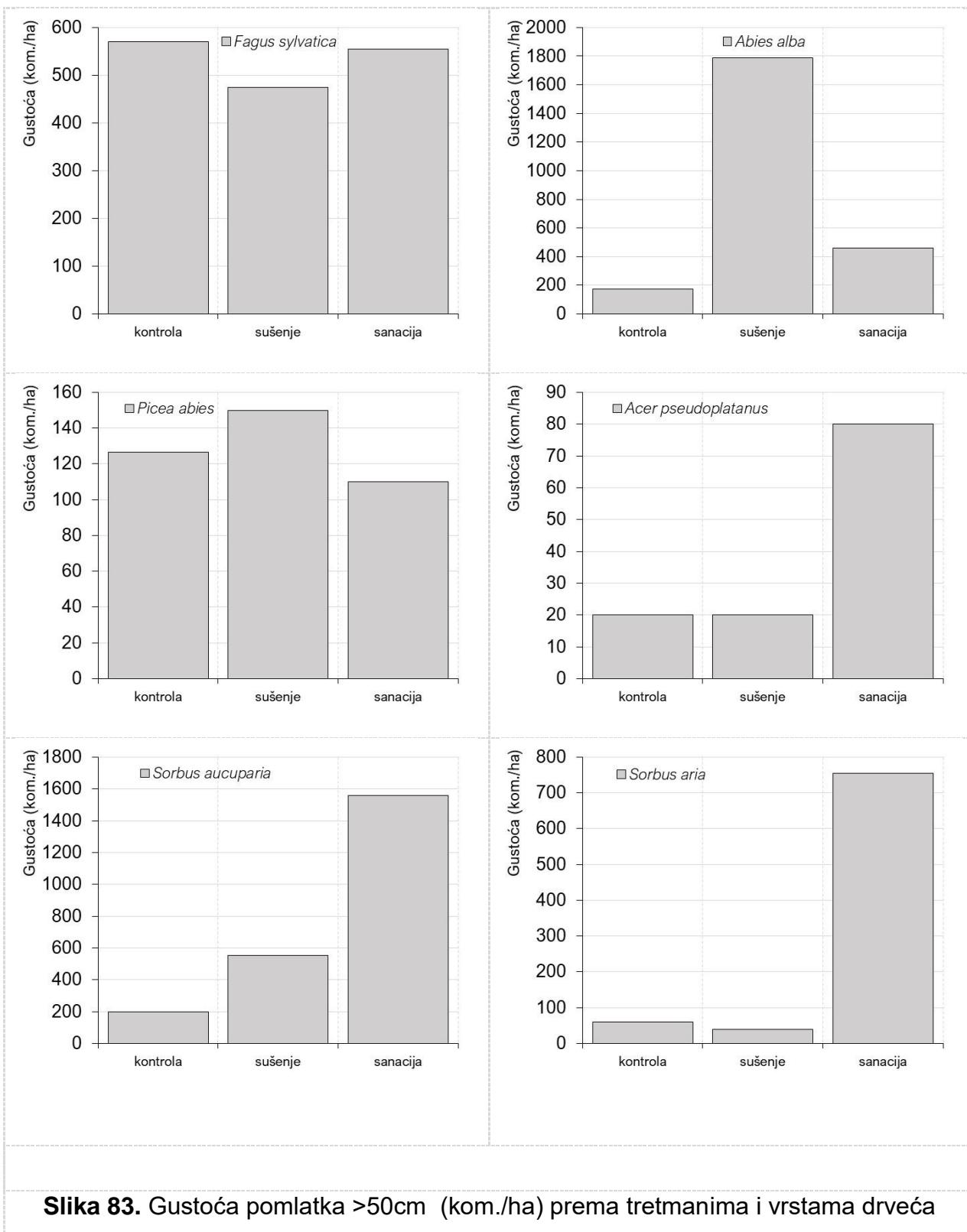
Slika 82. Relativni odnos ukupnog broja ponika i pomlatka (kom./ha) glavnih vrsta drveća obzirom na tretmane: kontrola, sušenje i sanacija. A – ukupno za sve uzraste, , B – prema broju biljaka od 1 do 3. godine starosti i C – ukupno sapl i sapli.

Tablica 27. Relativni odnos ukupnog borja ponika i pomlataka (do 50cm visine) (kom./ha) glavnih vrsta drveća s obzirom na tretmane: kontrola sušenje i sanacija

(1-3 god.)	F.sylvatica	A. alba	P.abies	Ostalo	Ukupno
Kontrola	40	178	333	0	551
Sušenje	20	125	37	0	182
Sanacija	0	20	140	20	180
(sapl, II)	F.sylvatica	A. alba	P.abies	Ostalo	Ukupno
Kontrola	60	90	40	40	230
Sušenje	110	80	80	0	270
Sanacija	0	0	0	0	0
Ukupno	F.sylvatica	A. alba	P.abies	Ostalo	Ukupno
Kontrola	100	268	373	40	781
Sušenje	130	205	117	0	452
Sanacija	0	20	140	20	180

5.8.3. Distribucija pomlatka prema visinskim klasama i vrstama drveća

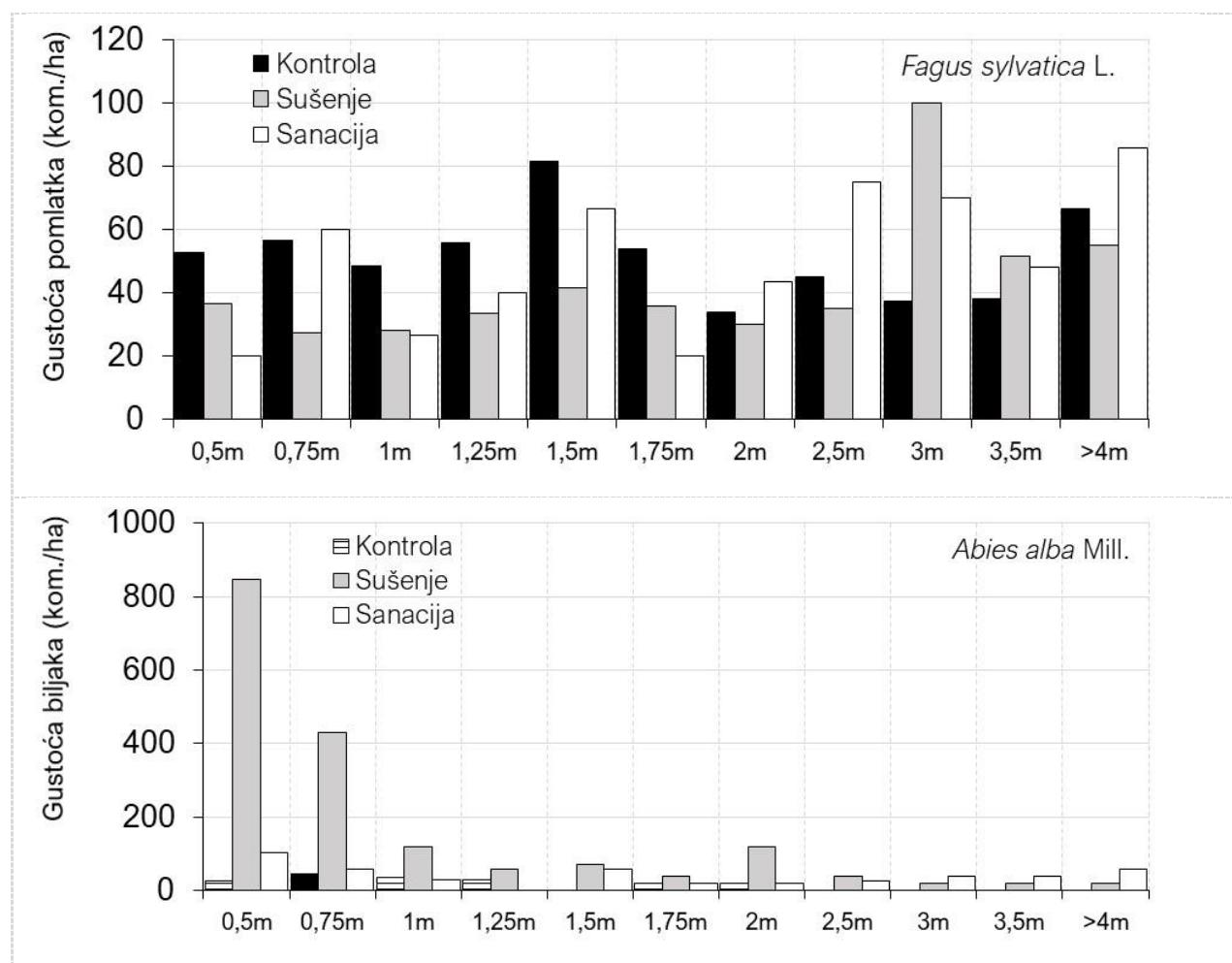
Slika 83. prikazuje gustoću pomlatka (>50cm) prema tretmanima i vrstama drveća ukupno za sve plohe, gdje vidimo da obična jela ima najveću gustoću na površinama zahvaćenim sušenjem (1800 kom./ha). pri čemu bukve ima značajno više, oko 550 stabala po hektaru, u odnosu na smrek, koja bilježi gustoću od približno 150 stabala po hektaru. Heliofilne vrste poput goskog javora (*Acer pseudoplatanus L.*) i jarebika (*Sorbus aucuparia L.*) imaju najveće gustoće na saniranim površinama pri čemu gorskog javora ima oko 80 stabala po hektaru, dok jarebika doseže oko 1600 stabala po hektaru. Mukinja (*Sorbus aria L.*) kao termofilna vrsta također ima najveću gustoću na saniranim površinama oko 800 kom./ha.

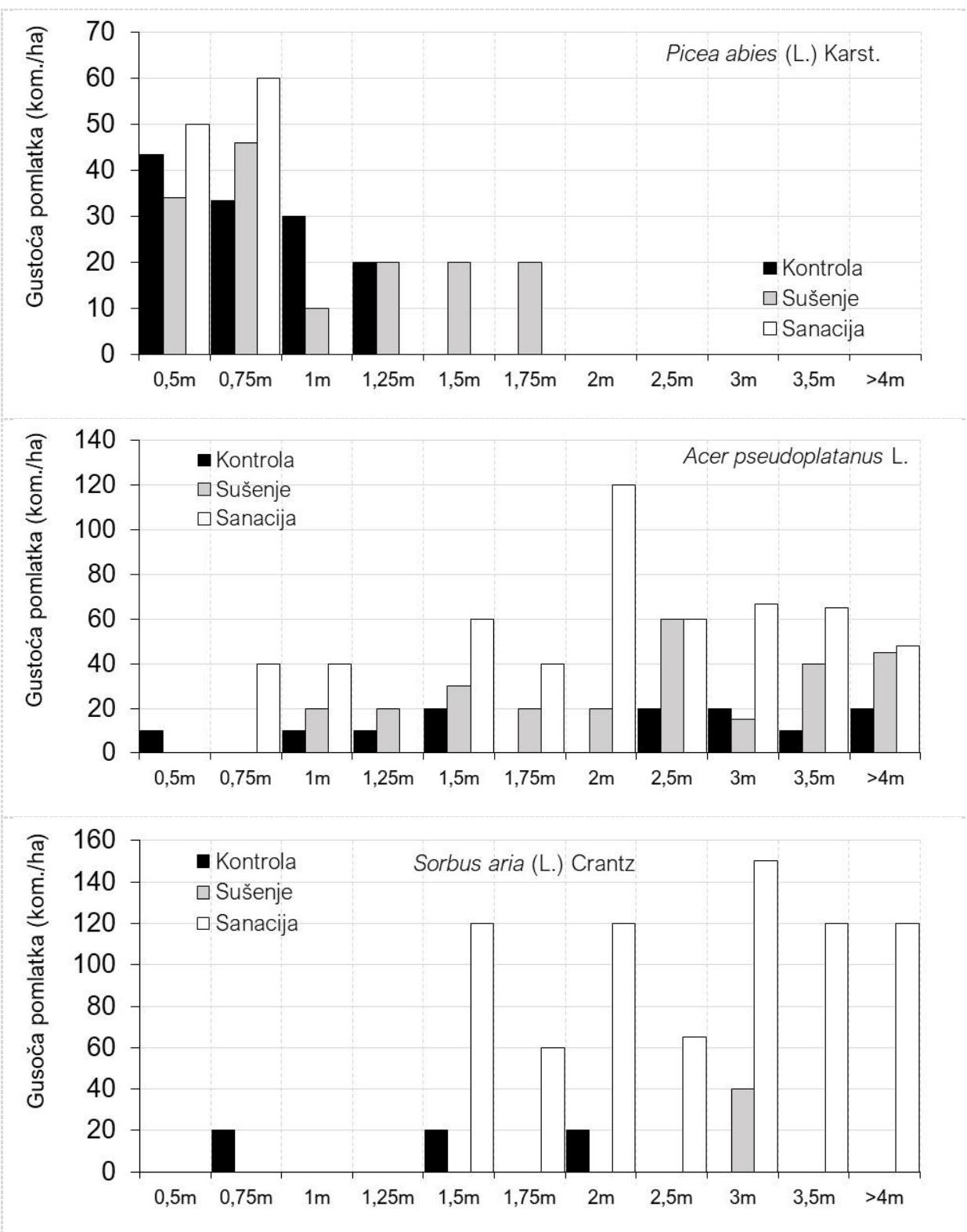


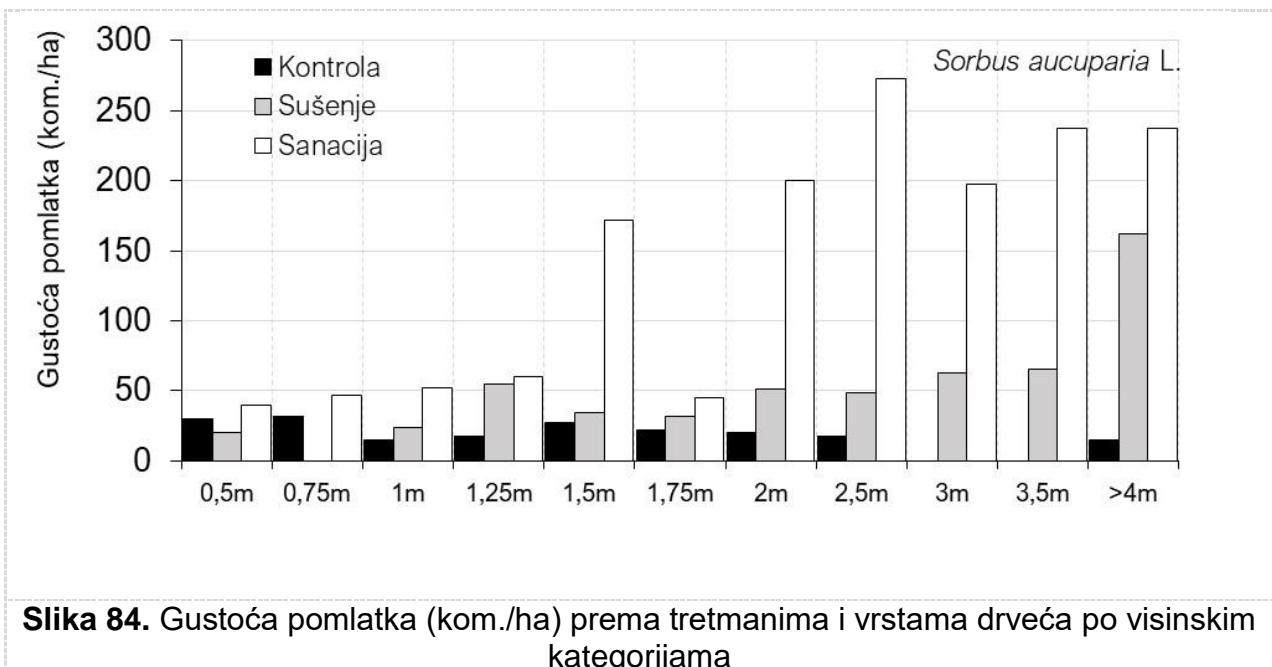
Slika 83. Gustoća pomlatka >50cm (kom./ha) prema tretmanima i vrstama drveća

Slika 84. prikazuje gustoću pomlatka (broj jedinki po hektaru) prema tretmanima i vrstama drveća unutar različitih visinskih kategorija. Rezultati pokazuju da obična bukva ima relativno ujednačenu zastupljenost u svim visinskim kategorijama i

tretmanima, s izuzetkom visinske kategorije od 3 m na površinama zahvaćenim sušenjem, gdje njena gustoća blago raste i iznosi 100 stabala po hektaru. Obična jela pokazuje najveću gustoću u visinskoj kategoriji do 0,5 m na površinama zahvaćenim sušenjem, gdje doseže oko 800 stabala po hektaru. Obična smreka neovisno o tretmanima, najveće gustoće bilježi u nižim visinskim kategorijama (0,5–1,75 m). Heliofilne vrste, poput jarebice postižu najveće gustoće (200–250 stabala po hektaru) u višim visinskim kategorijama (1,5–4 m) na saniranim površinama. Sličan trend uočava se i kod mukinje, vrste termofilnog karaktera, koja također pokazuje najveću gustoću (120–140 stabala po hektaru) u visinskom rasponu od 1,5 do 4 m na saniranim površinama.

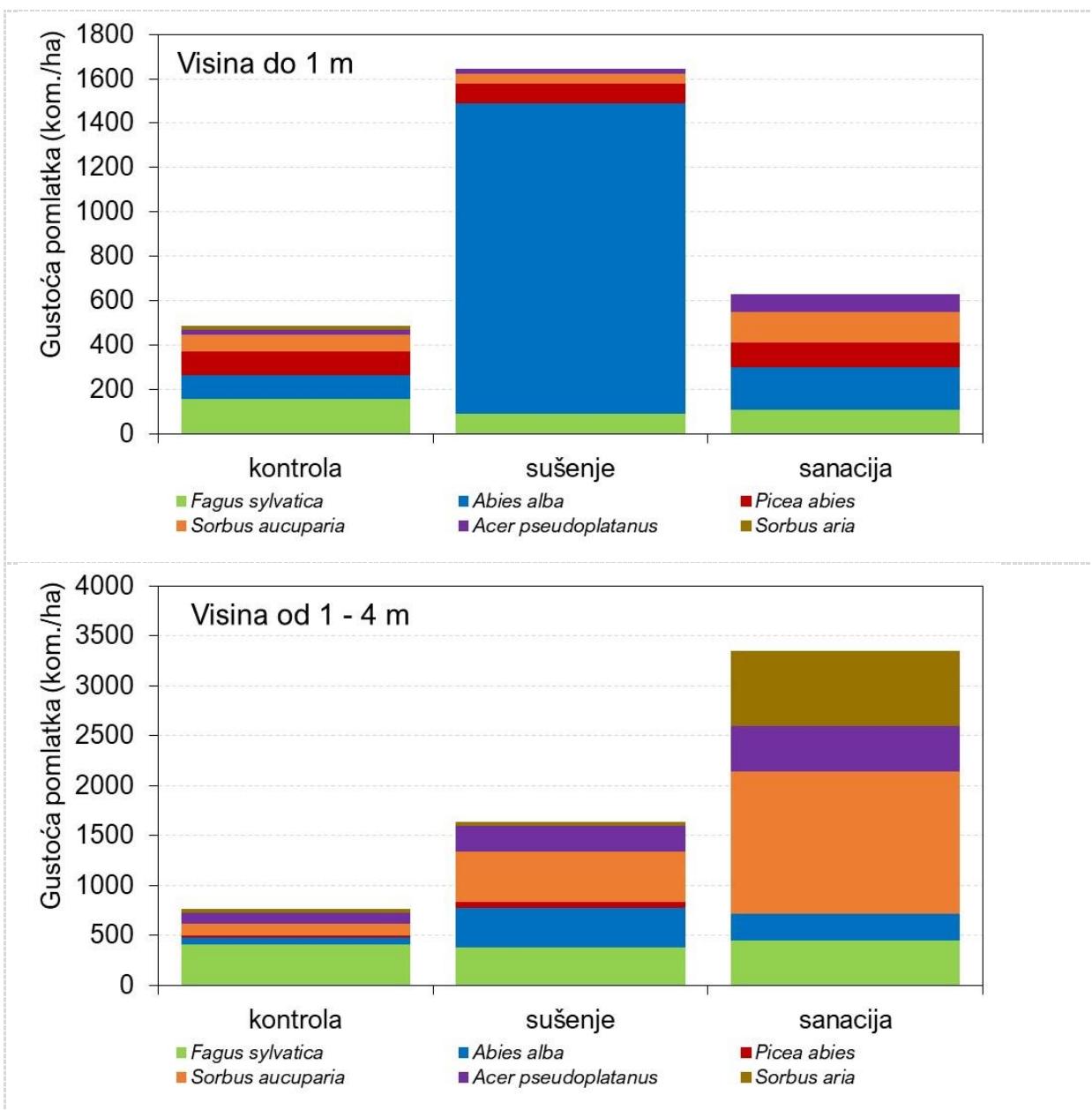


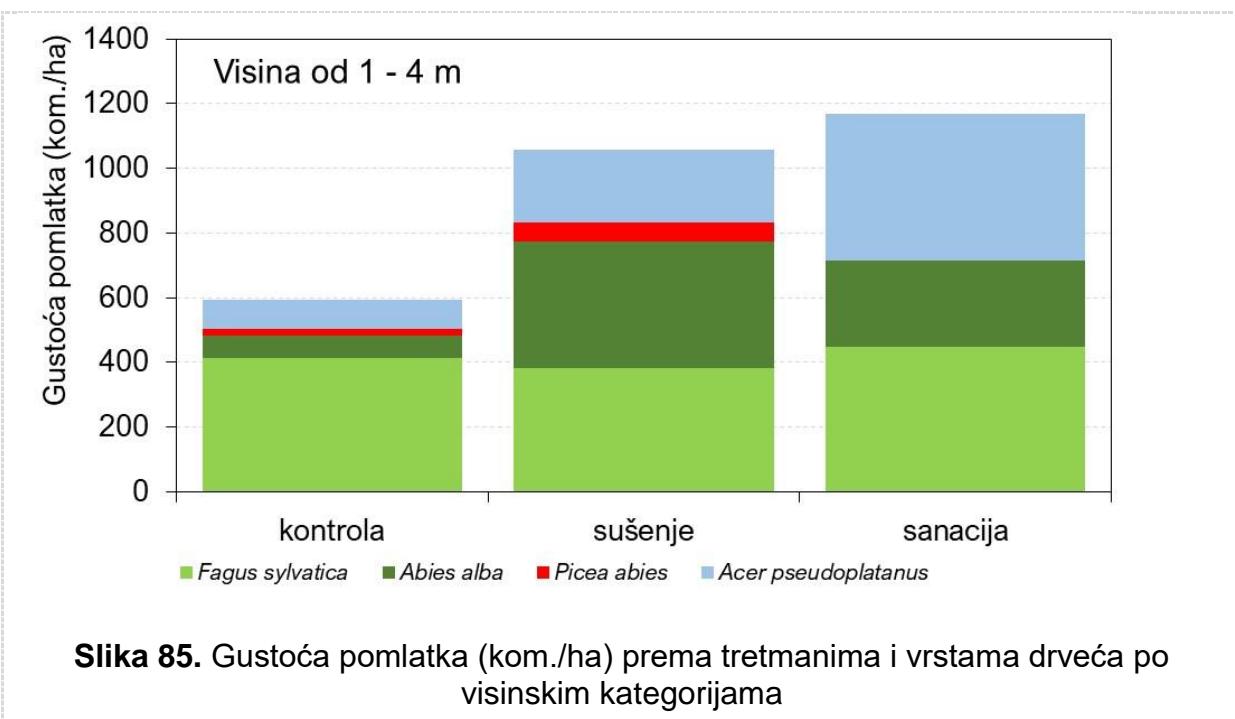




Slika 84. Gustoća pomlatka (kom./ha) prema tretmanima i vrstama drveća po visinskim kategorijama

Analiza gustoće pomlatka do 1 m visine za sve vrste prisutne na istraživanom području, unutar različitih tretmana, pokazuje da obična jela dominira na lokalitetima zahvaćenim sušenjem, s gustoćom od 1398 stabala po hektaru (Slika 85). Bukva i smreka javljaju se u podjednakim gustoćama na svim tretmanima, dok gorski javor i mukinja u ovoj kategoriji postižu nešto niže gustoće. Jarebika ima gustoću sličnu kao i smreka u svim tretmanima (Slika 85). Kod pomlatka visine između 1 i 4 m, najveće gustoće bilježe heliofilne vrste, prvenstveno gorski javor i jarebika, pri čemu su njihove vrijednosti najviše na saniranim površinama i površinama zahvaćenim sušenjem.





Slika 85. Gustoća pomlatka (kom./ha) prema tretmanima i vrstama drveća po visinskim kategorijama

Ako analiziramo samo glavne vrste u istom visinskom rasponu (1–4 m), bukva pokazuje ujednačenu zastupljenost u svim tretmanima s približno 400 stabala po hektaru. Obična jela postiže najveću gustoću na površinama zahvaćenim sušenjem (390 kom./ha) (Tablica 28). Obična smreka, s druge strane, ima najnižu gustoću na kontrolnim plohamama (20 kom./ha) i na površinama zahvaćenim sušenjem (60 kom./ha), dok na saniranim površinama nije zabilježena (Tablica 28). Kao tipična heliofilna vrsta, gorski javor postiže najveću gustoću na saniranim površinama (460 kom./ha).

Tablica 28. Gustoća pomlatka (kom./ha) prema tretmanima i vrstama drveća po visinskim kategorijama

Vrsta drveća	Fagus sylvatica < 1m kom. /ha	Abies alba	Picea abies	Sorbus aucuparia	Acer pseudoplatanus	Sorbus aria	Ukupno
Kontrola	158	106	107	77	20	20	488
Sušenje	92	1398	90	43	20		1643
Sanacija	107	195	110	139	80		630
> 1 < 4 m							
Kontrola	412	70	20	120	100	40	762
Sušenje	382	390	60	510	250	40	1633
Sanacija	449	267	0	1421	460	755	3351

5.9. Mjere sanacije

U skladu s evropskim smjernicama, gospodarenje u rizičnim i zaraženim zonama temelji se na principima integriranog suzbijanja štetnika (*Integrated Pest Management – IPM*), s naglaskom na **prevenciju, praćenje populacije i sanaciju zaraženih područja** (Bentz i dr., 2020.). Dok su prevencija i praćenje kontinuirani procesi, sanacija ovisi o razini zaraze i lokaciji zahvaćenih sastojina.

Ključne sanacijske mjere uključuju:

- **Prevenciju:** pravovremene prorede u čistim smrekovim sastojinama i prebornu sječu u bukovo-jelovim sastojinama s primjesom smreke, s naglaskom na sanitarno-higijenske funkcije; reguliranje sastojinskog oblika (vrsta, omjer i struktura smjese) te ograničavanje pošumljavanja smreke samo na pogodna staništa.
- **Praćenje:** pravovremeno otkrivanje zaraženih stabala tijekom mirovanja vegetacije kako bi se smanjila populacija potkornjaka sanitarnom sječom prije proljetnog rojenja.
- **Sanaciju: Tehnička:** uklanjanje i transport zaraženih stabala te drvnog materijala oštećenog vjetrolomima, čime se smanjuju uvjeti za razmnožavanje potkornjaka. Drvni materijal treba premjestiti na stovarišta (uz obavezno okoravanje trupaca) ili na daljnju preradu. Po potrebi se mogu koristiti insekticidi i fungicidi za zaštitu trupaca na stovarištima.

Biološka: Priprema staništa, sadnja sadnica ili sjetva sjemena

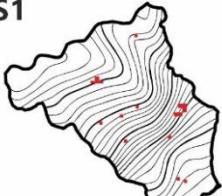
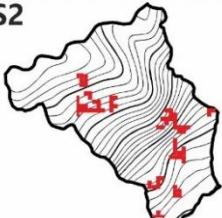
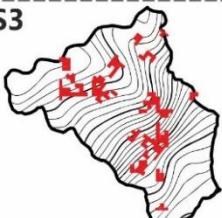
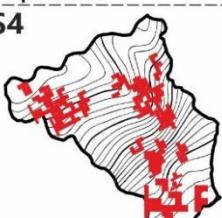
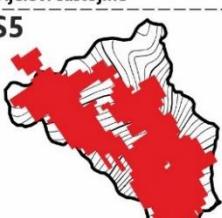
Prije provedbe tehničke i biološke sanacije zahvaćenih površina, potrebno je prvo **kartirati zahvaćeno područje**, zatim provesti **sanitarnu sječu** i izvućidrvnu masu, pri čemu se s njom postupa prema prethodno opisanim metodama.

Biološkoj sanaciji prethodi **analiza intenziteta stanišnih promjena** uzrokovanih nepogodom te procjena mogućih smjerova klimatskih promjena na konkretnoj lokaciji. Na temelju tih analiza odabiru se vrste drveća za obnovu **sjetvom ili sadnjom sadnica**, pri čemu je cilj postići što prirodniji omjer smjese.

Ako zbog visokog rizika povezanog s budućim klimatskim promjenama nije moguće postići prirodni sastav, potrebno je odabratи vrste koje su bolje prilagođene **predviđenim klimatskim uvjetima** kako bi se osigurala dugoročna stabilnost sastojine

Na površinama (u pravilu smrekovim sastojinama) koje su zahvaćene napadom potkornjaka i drugim prirodnim nepogodama koja nisu više pogodna za običnu smreku treba podržavati druge otporne vrste (ob. bukva i ob. jela npr.)

5.9.1. Postupci sanacije sastojina oštećenih potkornjacima

Površina	Preporuke	Situacije
S1  Površina projekcije krošnje	Pojedinačna stabla Površina projekcije pojedinačnog stabla Ekološke posljedice Nema većih ekoloških posljedica na stabilnost šume. Krošnje susjednih stabala će zatvoriti nastale progale. Štete su na razini pojedinačnih stabala.	Postupci Evidencija, doznaka i sječa, te izvoženje zaraženih stabala. Provoditi kontinuirano monitoring daljnog širenja potkornjaka i monitoring šteta (GIS baza)
S2  Površina progala < 0.01ha	Skupine stabala Nekoliko stabala zajedno < 0.01 ha (1 ar) Ekološke posljedice Nema većih ekoloških posljedica na stabilnost i gospodarenje. Krošnje susjednih stabala će zatvoriti progale. Štete su na razini skupina stabala.	Postupci Evidencija, doznaka i sječa, te izvoženje zaraženih stabala. Provoditi kontinuirano monitoring daljnog širenja potkornjaka i monitoring šteta (GIS baza)
S3  Površina progala > 0.01 < 1 ha	Grupe stabala Mala (0.01 – 0.2 ha) Srednja (0.2 – 0.5 ha) Velika (0.5 – 1.0 ha) Ekološke posljedice Manje ekoloških posljedica na stabilnost sastojine i gospodarenje. Krošnje susjednih stabala neće zatvoriti progale. Štete su na razini grupa stabala. Trajni prekid sklopa.	Postupci Evidencija, doznaka i sječa, te izvoženje zaraženih stabala. Popunjavanje nastalih progala. Provoditi kontinuirano monitoring daljnog širenja potkornjaka i monitoring šteta (GIS baza)
S4  Veći dijelovi sastojine (>30%)	Veći dijelovi sastojine Potpuni prekid sklopa < 30% sastojine Ekološke posljedice Značajne ekološke posljedice na stabilnost sastojine i gospodarenje. Trajni prekid sklopa na većim dijelovima sastojine.	Postupci Evidencija, doznaka i sječa, te izvoženje zaraženih stabala. Popunjavanje nastalih progala! Izlučivanje novih sastojina! Provoditi kontinuirano monitoring daljnog širenja potkornjaka i monitoring šteta (GIS baza).
S5  Kompletna sastojina (>30%)	Sastojina Sastojina značajno oštećena potpuni prekid sklopa na kompletnoj sastojini. Ekološke posljedice Značajne ekološke posljedice na stabilnost sastojine i gospodarenje. Sastojina je potpuno uništena.	Postupci Evidencija, doznaka i sječa, te izvoženje zaraženih stabala. Revizija plana upravljanja. Potpuna sanacija sastojina. Provoditi kontinuirano monitoring daljnog širenja potkornjaka i monitoring šteta (GIS baza).

Slika 86. Shematski prikaz postupaka direktnе sanacije sastojina obične smreke

Čiste sastojine obične smreke

Sanacija sastojine obične smreke zahvaćenih sušenjem od potkornjaka obuhvaća sve sastojine prema Pravilnik o popisu stanišnih tipova, karti staništa te ugroženim i rijetkim stanišnim tipovima (NN 088/2014) u Prilogu III donosi Popis ugroženih i rijetkih stanišnih tipova zastupljenih na području Republike Hrvatske značajnih za ekološku mrežu Natura 2000 na kojem se nalaze i kategorija **9410. Acidofilne šume smreke brdskog i planinskog pojasa (*Vaccinio-Piceetea*)** koje obuhvaćaju sljedeće stanišne tipove:

- E.7.3.1. Gorske šume smreke sa šumskim pavlovcem,**
- E.7.3.2. Preplaninske šume smreke s čopocem ,**
- E.7.3.3. Preplaninske šume smreke s ljepikom ,**
- E.7.3.4. Preplaninske šume smreke s alpskom pavitinom**
- E.7.3.5. Šume smreke s bijelim šašem na dolomitu.**

Navedeni stanišni tipovi prevladaju u gorskome vegetacijskom pojasu Gorskog Kotara, Velebita i Like. U sloju drveća ovih sastojina prevladava obična smreka, primiješani su u manjem omjeru bukva i jela. Sastojine su različitih površina od nekoliko hektara do nekoliko desetaka hektara i često raspršene u zoni subalpskih bukovih šuma.

Kod provođenje sanacije posebnu pažnju treba voditi o stanju i brojnosti podrasta koji u dobrom dijelu preuzimaju druge vrste drveća kao što su bukva i jela, tako da mjere trenutne sanacije ali i budućeg gospodarenja (šumskouzgojne zahvate njege) treba usmjeriti na razvoj i podržavanje tih vrsta drveća kako bi se povećala raznolikost sastojina i stabilnost poglavito u slučaju budućih promjena klime. Osnovni cilj sanacije/obnove ovakvih sastojina nije očuvanje smreke u postojećem obimu nego povećanje stabilnosti ovih šuma u smislu praćenja prirodnih procesa pa čak i u slučajevima da smreka potpuno nestaje iz ovih područja. Sanaciju treba obavljati samo u slučajevima gdje je došlo do većih šteta na šumama prema prikazanoj shemi.

Tablica 29. Radovi sanacije sastojina (odnose samo na kategorije od S1 i S3 prema shemi za sanaciju)

- Redovito vađenje sušaca smreke radi sprječavanja dalnjeg širenja bolesti
- Redovita njega sastojina (čišćenje, prorjeđivanje) ovisno o stanju na terenu
- Popunjavanje većih površina sadnicama smreke* (sadnice obične smreke starosti 2+0 gustoće sadnje 2500-3000 kom./ha).
- Priprema staništa (uklanjanje korovske vegetacije)
- Popunjavanje, gdje je moguće, provesti i u manjim skupinama sa sadnicama smreke a ne nužno homogeno po cijeloj površini.
- U situacijama koje odgovaraju uvjetima staništa uz popunjavanje smrekom raditi i oplemenjivanje sastojina pratećim vrstama kao što su gorski javor, gorski jasen naročito kod većih površina sušenja (sadnice gorskog javora i jasena starosti 2+0 gustoće 500 kom./ha).
- Također gdje prilike na terenu odgovaraju oplemenjivanje provesti u manjim skupinama iste vrste drveća.
- Redovito provoditi šumskouzgojne zahvate njegе šume
- Gospodarenje sastojinama usmjeravati prema raznodbavnim sastojinama skupinasto-grupimične strukture.

* Popunjavanjem smreke u grupama i skupinama u mlađima razvojnim stadijima stvara se heterogeni oblik sklopa budućih sastojina čime se odmah dugoročno povećava stabilnost buduće sastojine

* Premda se o formama smreke u nas nije vodilo puno računa preporučamo gdje je to moguće (apeliramo na rasadničarsku proizvodnju) u manjem postotku nastojati uzbajati i saditi formu smreke *viminalis* koja je ujedno otpornija na vjetorizvale.

Čiste sastojine obične smreke gorskog pojasa

Sanacija obuhvaća sastojine čiste smreke u gorskom pojusu bez ikakvih primjesa drugih vrsta i to u slučaju situacije S4 i S5 na danoj shemi. Stanje na terenu je takvo da nema pojavnosti podrasta drugih vrsta (bukve i jele) nego stanište isključivo odgovara smreci. Uglavnom se radi o područjima (mezo i mikrolokalitetima) kao što su vrtače, uvale koje su još uvijek pogodne za rast i razvoj čistih sastojina obične smreke.



Slika 87. Izgled sastojine nakon sušenja smreke (nema podrasta drugih vrsta)

Tablica 30. Radovi sanacije sastojina (odnose samo na kategorije S4 i S5 prema shemi za sanaciju)

- Doznaka i uklanjanje svih oštećenih/odumrlih stabala
- Umjetna obnova većih površina sadnicama smreke* (sadnice obične smreke starosti 2+0 gustoće sadnje 2000 kom./ha).
- Priprema staništa (uklanjanje korovske vegetacije)
- Uzgojnim zahvatima podržavati postojeći pomladak obične smreke.
- Gospodarenje sastojinama usmjeravati prema raznodbnnim sastojinama skupinasto-grupimične strukture.
- Redovita njega sastojina (čišćenje, prorjeđivanje) ovisno o stanju na terenu
- **Obnove provoditi oplodnim sječama na malim površinama (1H)**

Čiste sastojine obične smreke gorskog pojasa s pojavom podrasta drugih vrsta (bukva)

CILJ: Stvoriti mješovitu sastojinu bukve i smreke

Sanacija obuhvaća sastojine čiste smreke u gorskom pojusu gdje se pojavio podrast obične bukve (slika 88.) i to u slučaju situacije S4 i S5 na danoj shemi. S obzirom da se sastojine obične smreke u ovom pojusu nalaza u zoni pretplaninskih bukovih šuma, lokaliteti koji su nekada bili pogodni isključivo za smreknu danas postaju pogodni za dolazak obične bukve. Sanaciju obaviti sadnjom sadnica obične bukve po cijeloj površini te sadnjom sadnica obične smreke u manjim grupama. Uzgojnim zahvatima podržavati postojeći pomladak obične bukve te šumske voćkarice i plemenite listače ukoliko su se pojavile.



Slika 88. Izgled sastojine nakon sušenja smreke s razvijenim podrastom obične bukve

Tablica 31. Radovi sanacije sastojina (odnose samo na kategorije S4 i S5 prema shemi za sanaciju)

- Doznaka i uklanjanje svih oštećenih/odumrlih stabala
- Umjetna obnova većih površina sadnicama obične bukve (sadnice obične bukve starosti 2+0 gustoće sadnje 6000 do 7000 kom./ha).
- Priprema staništa (uklanjanje korovske vegetacije)
- Popunjavanje, gdje je moguće, provesti u manjim skupinama sa sadnicama obične smreke (sadnice obične smreke starosti 2+0 gustoće sadnje 2000 kom./ha).
- Redovita njega sastojina (čišćenje, prorjeđivanje) ovisno o stanju na terenu
- Gospodarenje sastojinama usmjeravati prema raznодobnim sastojinama skupinasto-grupimične strukture.
- **Obnove provoditi prebornom sjećom (skupinasto-grupimično)**

Čiste sastojine obične smreke gorskog pojasa s pojavom podrasta drugih vrsta (bukva i jela)

CILJ: Stvoriti mješovitu sastojinu jele, smreke, bukve.

Sanacija obuhvaća sastojine čiste smreke u gorskom pojusu gdje se pojavio pomladak bukve, jele i smreke (slika 89.) i to u slučaju situacije S4 i S5 na danoj shemi. S obzirom da su ove sastojine obične smreke u prošlosti nastale umjetnim podizanjem u zoni bukovo – jelovih šuma sanaciju obaviti sadnjom sadnica obične bukve i obične jele po cijeloj površini te sadnjom sadnica obične smreke u manjim gurpama. Uzgojnim zahvatima podržavati postojeći pomladak bukve, jele i smreke te šumske voćkarice i plemenite listače ukoliko su se pojavile.



Slika 89. Izgled sastojine nakon sušenja smreke s razvijenim podrastom obične bukve i jele

Tablica 32. Radovi sanacije sastojina (odnose samo na kategorije S4 i S5 prema shemi za sanaciju)

- Doznaka i uklanjanje svih oštećenih/odumrlih stabala
- Priprema staništa (uklanjanje korovske vegetacije)
- Umjetna obnova većih površina sadnicama obične bukve i obične jele (sadnice obične bukve starosti 2+0 gustoće sadnje 3500 do 5000 kom./ha, sadnice obične jele starosti 2+0 gustoće sadnje 3000 do 4000 kom./ha).
- Popunjavanje, gdje je moguće, provesti u manjim skupinama sa sadnicama obične smreke (sadnice obične smreke starosti 2+0 gustoće sadnje 2000 kom./ha).
- Redovita njega sastojina (čišćenje, prorjeđivanje) ovisno o stanju na terenu
- Gospodarenje sastojinama usmjeravati prema raznодobnim sastojinama skupinasto-grupimične strukture.
- **Obnove provoditi prebornom sjećom (skupinasto-grupimično)**

6. RASPRAVA

6.1. Ekološka niša obične smreke u Republici Hrvatskoj

Održivo gospodarenje šumskim ekosustavima i očuvanje općekorisnih funkcija šuma zahtijeva sveobuhvatno razumijevanje ključnih ekoloških čimbenika koji utječu na prostorno-vremensku dinamiku šumskih ekosustava

Pogodnost staništa za šumske vrste određena je složenim međudjelovanjem biotskih i abiotskih čimbenika pri čemu klima ima ključnu ulogu u oblikovanju ekoloških uvjeta koji omogućuju opstanak i razvoj vrsta (Lawler i dr., 2009). Prema rezultatima modela pogodnosti staništa za običnu smreku u Hrvatskoj najvažniji čimbenici koji najviše utječu na njezinu sadašnju ali i buduću rasprostranjenost su količina oborina u ljetu (PPT_sm), Evaporacija (Eref) i kapacitet tla za vodu (PAW) (Slika 38). Istraživanja u Sloveniji (Kermavnar i dr., 2023) pokazuju kako odumiranje smrekovih šuma snažno korelira sa deficitom ljetnih oborina i evapotranspiracijom te geološkoj podlozi koja određuje kapacitet tla za vodu što potvrđuju i rezultati ovog istraživanja. Buduće projekcije pogodnosti staništa obične smreke u Hrvatskoj, temeljene na dvama scenarijima emisija stakleničkih plinova (optimistični-RCP4.5 i pesimistični-RCP8.5), ukazuju na značajan gubitak pogodnog staništa, osobito u istočnom dijelu Dinarida (Slika 39). S obzirom na to da su ljetne oborine i evaporacija među ključnim čimbenicima koji određuju pogodnost staništa, očekivane klimatske promjene jasno ukazuju na znatno smanjenje pogodnog staništa za rast smreke u budućnosti. Brojna istraživanja dokazala su da klimatske promjene utječu na pogodnost staništa šumskih vrsta (Anderson-Teixeira i dr., 2013; Lawler i dr., 2009; Wieser i dr., 2019), osobito u planinskim područjima (Theurillat i Guisan, 2001). Zbog učestalih toplinskih valova i suša, predviđa se smanjenje otpornosti populacija smreke na rubnim dijelovima njezina areala (S. Bennett i dr., 2015; Carnicer i dr., 2021; Vilà-Cabrera i Jump, 2019). Prema rezultatima istraživanja Obratov-Petković i dr., (2022), prirodna rasprostranjenost smrekovih šuma na Balkanu bit će podložna promjenama uslijed promjene ekoloških uvjeta. Isti autori navode da će se granica prirodne rasprostranjenosti smreke pomaknuti prema višim nadmorskim visinama i sjevernijim područjima što se djelomično može očekivati i na području sjevernoga Velebita i Gorskog Kotara.

6.2. Dinamika populacije smrekovog potkornjaka (*Ips typographus* L.)

Analiza dinamike brojnosti populacije smrekovog osmerozubog potkornjaka (*Ips typographus* L.) pokazala je postojanje značajne statističke povezanosti između prosječnih (od 12,73 °C do 18,26 °C) maksimalnih ljetnih temperatura zraka i međugodišnje varijabilnosti brojnosti potkornjaka na području sjevernoga Velebita. Ukupna objašnjena varijabilnost gustoće populacije potkornjaka pomoću ljetnih temperatura zraka iznosi 54% (Slika 40B). Ovi rezultati se podudaraju sa drugim istraživanjima koji pokazuju kako temperatura zraka značajno utječe na razvoj i reprodukciju (Wermelinger i Seifert, 1998) a samim time i na fenologiju i brojnost generacija potkornjaka (Jakoby i dr., 2019).

U srednjoj Europi smrekov osmerozubi potkornjak obično ima dvije generacije godišnje dok u ekstremno toplim godinama razvija i treću generaciju (Wermelinger i dr., 2012). Dinamika i razvoj nove generacije potkornjaka snažno su kontrolirani temperaturom zraka, gdje toplija klima utječe na povećanje broja generacija te samim time i na dinamiku progradacije (Jönsson i dr., 2012). S obzirom na promjene klime masovni napadi potkornjaka postati će učestaliji i intenzivniji (Logan i dr., 2003). Trenutno se takvi događaji uglavnom javljaju kao posljedica velikih poremećaja, poput oluja ili dugotrajnih sušnih razdoblja (Krejza i dr., 2021; Seidl i dr., 2016). Prema podacima o dugogodišnjem monitoringu brojnosti populacija potkornjaka na sjevernome Velebitu (Hrašovec, 2023), najveća brojnost populacije smrekovog potkornjaka zabilježena je u 2007., 2012., 2017. i 2022. godini. Ovi trendovi se podudaraju s razdobljima izrazito visokih ljetnih temperatura zabilježenih na Velebitu tijekom 2003., 2007., 2012., 2017., 2018. i 2022. godine što potvrđuje povezanost između toplinskih ekstrema i dinamike populacije ovog štetnika.

U razdoblju od 1958. do 2023. godine ljetne temperature zraka kretale su se u rasponu od minimalnih 12,73 °C do maksimalnih 18,26 °C (Slika 41), gdje prosječna ljetna temperatura zraka za isto razdoblje iznosi 15,35 °C. Međutim, u promatranom razdoblju evidentno je značajno povećanje prosječnih ljetnih temperatura zraka. Posljednja tri desetljeća (od 1992. godine) bila su iznadprosječno topla u odnosu na cjelokupno analizirano razdoblje, pri čemu su navedene sušne godine bile osobito toplije od prosjeka (Tablica 4). Kada uzmemo u obzir kako je potrebna temperature za rojenje smrekovog potkornjaka 16,5 °C (Lobinger, 1994) vidimo kako ovaj trend

povećanja prosječne ljetne temperature pogoduje progradaciji potkornjaka. Na slici 50. vidimo odnos između površina odumiranja smreke i brojnosti populacija potkornjaka koji ne ukazuje na postojanje značajne statističke povezanosti između povećanja brojnosti potkornjaka i površina šuma zahvaćenih odumiranjem smreke. Drugim riječima, rast populacije ovog štetnika ne može se smatrati prediktorskim faktorom povećane smrtnosti smrekovih sastojina. Također niz recentnih godina u kojima su zabilježene velike brojnosti populacija potkornjaka nisu nužno dovele do većeg sušenja sastojina smreke. Ovaj obrazac možemo pripisati činjenici da su odumrla stabla bila fiziološki oslabljena, dok su preostala stabla, zahvaljujući smanjenoj konkurenциji stekla bolje uvjete za rast, te su posljedično tome i veću otpornost na stresne čimbenike.

6.3. Klimatska osjetljivost obične smreke na Velebitu

Kada promatramo varijabilnosti kronologija prirasta temeljnica obične smreke na istraživanom području uočena su dva jasno izražena razdoblja s različitim trendovima rasta. Pozitivan trend u prirastu temeljnica zabilježen je u razdoblju od 1950. do 1977. godine, dok je od 1977. do 2013. godine utvrđen negativan trend (Slika 42). Ove promjene u obrascima rasta mogu se pripisati trendovima oborina i temperatura zraka. Sličan obrazac utjecaja klime na rast smreke zabilježen je u Norveškoj gdje su Čermák i dr., (2017) analizirali promjene u rastu stabala tijekom dva razdoblja: 1915.-1964. i 1964.-2012. Autori povezuju te promjene s iznadprosječnim temperaturama u drugom razdoblju, naglašavajući da nedostatak oborina postaje ključan, limitirajući faktor u dinamici rasta smreke u uvjetima visokih temperatura zraka.

Rezultati korelacijske analize između klimatskih varijabli i indeksnih kronologija smreke pokazali su značajnu pozitivnu povezanost rasta s oborinama (Prec) i indeksom suše (SPEI) što je u skladu s istraživanjima iz srednje (Altman i dr., 2017; Andreassen i dr., 2006; Buntgen i dr., 2007; Obladen i dr., 2021) i jugoistočne Europe (Begović i dr., 2020; Jevšenak i dr., 2021; Levanić i dr., 2008; Orešković i dr., 2024). Potvrđujući važnost proljetnih i ljetnih oborina kao ključnih čimbenika za rast smreke.

Visoke temperature zraka prethodne godine negativno utječu na radikalni prirast, što je potvrđeno i u drugim istraživanjima (Begović i dr., 2020; Bouriaud i Popa, 2009; Orešković i dr., 2024). Suprotno tome, u sjevernoj Europi, gdje su ljeta hladnija, više

temperature mogu pozitivno utjecati na rast smreke, što ukazuje na postojanje regionalnih razlike u klimatskoj osjetljivosti (Basnet i dr., 2024; Martinez del Castillo i dr., 2024) na području areala smreke u Europi.

Pomične korelacije ukazuju da je navedena klimatska osjetljivost smreke s obzirom na oborine i indeks suše stabilna tijekom promatranog vremenskog razdoblja i to na svim plohama dok se osjetljivost na ljetne temperature zraka mijenja tokom vremena. Tijekom promatranog vremenskog razdoblja (od 1920 do 2018) rast stabala smreke sve je više ograničen visokim temperaturama zraka. Ovi rezultati su u skladu s istraživanjima koja pokazuju da porast temperatura i povećana evapotranspiracija povećavaju klimatsku osjetljivost smreke (Čermák i dr., 2017; D'Andrea i dr., 2023). Analizom glavnih komponenti (PCA) prema kronologijama rasta utvrđeno je da smreke bez obzira na mikrostanište i nadmorsku visinu dijele zajednički klimatski signal, odnosno pokazuju da su visoke ljetne temperature zraka glavni ograničavajući čimbenik za rast stabala smreke. Prva glavna komponenta (PC1) objašnjava najveći dio ukupne varijance i značajno korelira sa svim kronologijama smreke (Slika 45A). Druga komponenta (PC2), koja obuhvaća oko 9% varijance, povezana je uglavnom s lokalitetom iz Štirovače. Jednostavni linearni Pearson-ovi koreacijski koeficijenti za razdoblje od 1954. do 2018. pokazuju da je rast stabala značajno pozitivno povezan s većim količinama oborina tijekom ljeta (srpanj-rujan) prethodne i tekuće godine, dok više temperature u istom razdoblju negativno utječu na prirast. Ovi nalazi potvrđuju da su oborine ključan čimbenik rasta smreke, dok visoke temperature ograničavaju njen rast na području sjevernoga Velebita.

U primarnoj prašumi Smrčeve doline identificirane su tri sigurne, a potencijalno i četiri generacije stabala obične smreke s rasponom starosti od približno 150 do 380 godina. Usporedba sa sastojinama zahvaćenima sušenjem pokazuje značajne razlike u dobnoj strukturi, pri čemu su te sastojine većinom unimodalne ili bimodalne strukture te znatno mlađe, s prosječnom starosti između 100 i 180 godina. Sukcesijski lokaliteti, poput Šegotskih Padeža i Katalinca, pokazuju izrazito uski raspon godina i predstavljaju karakteristične primjere sukcesijskih stadija smreke na prethodno obešumljenim područjima.

6.4. Dinamika sušenja smreke na Velebitu

6.4.1. Primarna prašuma, Sekundarna prašuma i gospodarske šume

Analiza dinamike sušenja smreke na Velebitu napravljena je za tri različita tipa sastojina prema područjima i to: područje primarne prašume Smrčeve doline, područje sekundarnih prašuma (sastojine unutar Nacionalnog parka Sjeverni Velebit kojima se prestalo gospodariti prije gotovo 30 godina) i gospodarske sastojine za period 1985. - 2023. Iz analize uočavamo godine s velikim odumiranjem kao što su: 2004., 2007. i 2008. godina. Za pretpostaviti je da je suša 2003. godine bila pokretač prve masovne gradacije smrekovog potkornjaka na istraživanom području.. Obzirom na istraživana područja uočavamo da su prema površini odumrlih sastojina najviše zahvaćene gospodarske i nekada gospodarene sastojine u odnosu na područja primarne prašume Smrčeve doline koja su najmanje zahvaćena odumiranjem (Slika 37A). Ovakvi rezultati podudaraju se sa drugim istraživanjima koji ukazuju kako je intenzitet prirodnih nepogoda a samim time i površine veći u gospodarskim šumama u odnosu na zaštićena područja (Potterf i dr., 2023; Senf i dr., 2017; Sommerfeld i dr., 2018). Međutim, kada promatramo vremensku dinamiku odumiranja sastojina smreke za tri analizirana područja šuma vidimo da su vremenski sinkronizirani, što sugerira da su vrhunci odumiranja potaknuti prirodnim događajima koji istodobno utječu na gospodarena i ne gospodarena područja. Ovi rezultati potvrđuju sve veću učestalost ekstremnih događaja kao glavnih pokretača sušenja smrekovih šuma u Europi (Seidl i dr., 2017).

Prostorni obrazac progala nastalih sušenjem smreke pokazuje značajne razlike i to u ukupnom broju pojedinačnih progala između gospodarskih šuma i sekundarnih prašuma u odnosu na primarnu prašumu Smrčeve doline. Broj progala podjednak je za gospodarske (376) i sekundarne prašume (367) dok su na području prašume ustanovljen svega 54 progale. Ovi rezultati se podudaraju sa istraživanjima Potterfa i dr.h, (2023) koji su također utvrdili značajnu razliku u ukupnoj količini individualnih progala kao rezultata poremećaja između strogog zaštićenih rezervata i gospodarskih šuma. Kada promatramo prosječnu površinu progala razlike nisu toliko izražene između istraživanih područja. primjećuju se male razlike pa je Prosječna površina progala najveća u gospodarskim sastojinama 0.43 ha, nešto manja 0,37 ha u prašumama a najmanja u sekundarnim sastojinama 0.29 ha. Istraživanja Sommerfelda i dr.h, (2018) ukazuju kako su progale unutar zaštićenih područja manje i kompleksnijih

oblika u odnosu na područja gospodarskih šuma što nije slučaj i na području sjevernoga Velebita. Razlog tomu se može pripisati što su sastojine obične smreke puno prirodnije po strukturi i sastavu vrsta u odnosu na mnoga istraživana područja u Europi. Maksimalna površina sušenja za sekundarne prašume iznosila je 2,79 ha, za gospodarske šume 2,61 ha i za prašumu smrčeve doline 1,80 ha.

6.4.2. Prostorna analiza sušenja prema tipovima vegetacije

Sušenje sastojina obične smreke u Nacionalnom parku Sjeverni Velebit predstavlja značajan ekološki problem, pri čemu ključnu ulogu ima progradacija smrekovog potkornjaka (*Ips typographus*). Iako su sušna razdoblja prethodno oslabili smrekove sastojine, upravo su napadi potkornjaka bili neposredni uzrok njihovog propadanja. Ovi nalazi su u skladu s istraživanjima Hlásnya i Turčánia, (2013), koji su istaknuli povezanost klimatskih ekstrema i povećane podložnosti smreke na sekundarne štetnike. Najveće površine zahvaćene sušenjem zabilježene su u altimontansko-subalpinskim smrekovim šumama s obrubljenim gladcem, gdje je ukupno posušeno 51,5 ha (6,38 % ukupne površine zajednice), to možemo pripisati činjenici da ova zajednica čini najveće neprekinute komplekse čistih smrekovih šuma na području Nacionalnog parka Sjeverni Velebit. Značajne površine sušenja zabilježene su i u dinarskoj bukovo-jelovojoj šumi s mišjim uhom, gdje je ukupno posušeno 25,1 ha (4,79 % površine zajednice). Iako se smreka u ovoj zajednici javlja samo kao primiješana vrsta, gubitak čistih smrekovih grupa i skupina ukazuje na to da su nepovoljni klimatski uvjeti, u kombinaciji s napadom potkornjaka, značajno utjecali na njezinu vitalnost. Iako se mješovite sastojine smatraju otpornijima na negativne učinke klimatskih promjena istraživanja Pretzscha i dr.h, (2013), ukazuju na veliku osjetljivost obične smreke na porast temperatura i evapotranspiraciju u mješovitim sastojinama. U razdoblju od 2007. do 2016. godine na području Nacionalnog parka Sjeverni Velebit, ukupno se posušilo 110,5 ha smrekovih sastojina, što čini 1,14 % ukupne površine svih analiziranih zajednica. Najveća sušenja zabilježena su 2004. i 2007. godine, što se može povezati s jakim sušama prethodnih godina (Ionita i Viorica, 2021). Povećana učestalost ovakvih klimatskih ekstrema pogoduje populacijama potkornjaka. Ovi rezultati jasno ukazuju da dinamika sušenja smrekovih sastojina ovisi o sinergiji ekoloških čimbenika (biotskih i abiotiskih).

6.4.3. Utjecaj geomorfoloških čimbenika na sušenje

Topografski čimbenici mogu imati značajan utjecaj na dinamiku rasta šuma čak i na prostorno bliskim područjima (Primicia i dr., 2015). Prema istim autorima osim starosti, najveći utjecaj na rast i vitalnost stabala imaju nadmorska visina, eksponcija i nagib terena. Ovi faktori izravno utječu na mikroklimatske uvjete, dostupnost vode i hranjivih izloženost ekološkim stresorima, što može rezultirati značajnim razlikama u rastu i dinamici sastojina. Rezultati analize odumiranja sastojina smreke s obzirom na nadmorskiju visinu ukazuju na to da su najveće površine zahvaćene odumiranjem na nadmorskim visinama od 1200 do 1350 m, podjednako u gospodarskim šumama i sekundarnim prašumama (starim šumama kojima se gospodarilo do 1999.) dok na području primarne prašume Smrčeve doline sušenja su rjeđa, ali češće prisutna na većim visinama, između 1250 i 1500 m. Postotni udio odumrlih sastojina u odnosu na ukupnu površinu pokazuje najveće vrijednosti u nižim i srednjim nadmorskim visinama dok na visinama iznad 1400 m relativni udio odumiranja postaje zanemariv. Ovakvi rezultati analize odumiranja mogu se objasniti s termičkim gradijentom temperature zraka u odnosu na nadmorskiju visinu. S porastom nadmorske visine dolazi do smanjenja prosječne ljetne temperature zraka i povećanja oborina (Rangwala i Miller, 2012). Postotni udio odumrlih sastojina u odnosu na ukupnu površinu najveće vrijednosti pokazuje na blagim nagibima do 30° te na jugozapadnim eksponcijama, što upućuje na izraženiji utjecaj klimatskih čimbenika, osobito povećane insolacije i sušnog stresa, koji u tim zonama mogu intenzivirati proces odumiranja sastojina.

Posebno je važno razumjeti kako nadmorska visina modulira temperaturne i oborinske režime, dok eksponcija određuje količinu sunčevog zračenja i vlagu tla, čime se stvaraju specifični uvjeti za vitalnosti smrekovih populacija.

Utjecaj nadmorske visine kao čimbenika koji smanjuje utjecaj visokih temperatura zraka na rast stabala smreke značajan je i na sjevernome Velebitu. Na višim nadmorskim visinama, stabla pokazuju manju osjetljivost na visoke temperature, dok stabla na nižim visinama bilježe izraženiju negativnu korelaciju s ljetnim temperaturama prethodne godine (Altman i dr., 2017; Hartl-Meier i dr., 2014; Lévesque i dr., 2013). Slični obrasci su zabilježeni i u Dinaridima, gdje smreke na nižim visinama trpe veći negativni utjecaj ljetnih temperatura, dok je taj utjecaj na višim visinama blaži zbog hladnijih uvjeta (Begović i dr., 2020; Jevšenak i dr., 2021; Orešković i dr., 2024).

6.5. Pomlađivanje istraživanih sastojina

Razumijevanje uloge prirodnih poremećaja u dinamici šuma, naročito segment obnove šume nakon poremećaja, postaje sve važnije u kontekstu gospodarenja šumama pod utjecajem klimatskih promjena (Seidl i dr., 2011). Obnova subalpinskih smrekovih šuma složen je proces koji ovisi o postojećoj strukturi sastojine prije propadanja te o nizu ekoloških čimbenika, uključujući temperaturu, dostupnost sjemena, vegetaciju na tlu, pedološke uvjete, mraz i sušu (Oršanić, 2001).

U ovom istraživanju uspoređena je prirodna obnova, odnosno sukcesija vegetacije u smrekovim sastojinama u 3 različita tretmana: obnova u kontrolnim (zdravim) sastojinama koje nisu zahvaćene sušom, obnova u sastojinama zahvaćenim sušenjem (unutar zone nacionalnog parka Sjeverni Velebit) i u gospodarskim sastojinama gdje je obavljena sanacija zahvaćene površine. Sva tri tretmana imaju bitno različite ekološke uvjete koji značajno uvjetuju uspješnost prirodne obnove kao i smjer budućeg razvoja sastojina. Rezultati analize prirodne obnove obične jеле (*Abies alba*), obične smreke (*Picea abies*) i obične bukve (*Fagus sylvatica*) u različitim tretmanima (kontrola, sušenje i sanacija) pokazuju značajne razlike u pojavnosti i gustoći ponika i pomlatka. Općenito, najveća pojavnost i gustoća regeneracije u ranim razvojnim stadijima (1–3 godine) jеле i smreke zabilježena je na kontrolnim plohamama, dok su površine zahvaćene sušenjem pokazale manji intenzitet obnove, a sanirane plohe imale najmanju brojnost pomlatka. Promatraljući ukupnu gustoću ponika i pomlatka za kategorije do 3 godine starosti i do 50 cm visine, smreka i jela pokazuju najveće vrijednosti na kontrolnim plohamama (375 kom./ha i 270 kom./ha), dok je za bukvu najveća gustoća zabilježena na plohamama zahvaćenima sušenjem (135 kom./ha). Prema Diaciju, (2002) konkurenčija prizemne vegetacije na progalamama značajan je i ograničavajući faktor za obnovu obične smreke, a djelomično i za običnu jelu. Stoga je odsustvo prizemne vegetacije ključni čimbenik uspješne prirodne obnovu obje vrste drveća.

Analiza gustoće pomlatka višeg od 50 cm u različitim tretmanima pokazuje značajne razlike u brojnosti glavnih vrsta drveća. Rezultati ukazuju na to da je obična jelu najzastupljenija na površinama zahvaćenima sušenjem, gdje doseže gustoću od 1800 stabala po hektaru, što sugerira da se uspješnije regenerira u uvjetima postepenog odumiranja sastojine. Nasuprot tome, bukva postiže značajno nižu gustoću (550

stabala/ha), ali je ipak prisutna u većem broju nego smreka, koja na istim površinama bilježi svega 150 stabala po hektaru. Difuzna otvaranja sklopa, kakva nastaju uslijed poremećaja uzrokovanih potkornjacima, stvarajući potpuno drugačije uvjete za prirodnu regeneraciju u odnosu na druge nepogode (Červenka i dr., 2020) pogodovat će regeneraciji obične jеле i bukve (Diaci, 2002). Ključna razlika u odnosu na druge tipove poremećaja leži u činjenici da sastojine ne odumiru odjednom, već je taj proces postupan i traje nekoliko godina (Červenka i dr., 2020). Novonastale progale uslijed sušenja ne mogu potaknuti obnovu smreke jer otvaranje sklopa uzrokuje nepovoljne promjene u smislu konkurenциje prizemne vegetacije (Holeksa i dr., 2012). Prema Diaci (2002) u progalamama većim od 0,1 ha gusta prizemna vegetacija otežava regeneraciju obične smreke.

Kod heliofilnih vrsta, poput gorskog javora (*Acer pseudoplatanus*) i jarebika (*Sorbus aucuparia*), najveće gustoće su na saniranim površinama. Gorski javor postiže gustoću od 80 stabala po hektaru, dok je jarebika znatno brojnija, s 1600 stabala po hektaru. Mukinja (*Sorbus aria*), kao termofilna vrsta, također pokazuje najveću gustoću na saniranim površinama, što ukazuje na promjene stanišnih uvjeta prema termofilnijim uvjetima koji nastaju nakon intenzivnih zahvata poput sanitarnog sjeka.

Ovi rezultati pokazuju da različiti intenziteti poremećaja značajno utječu na procese obnove. Postupno odumiranje stabala kroz sušenje pogoduje obnovi jеле i bukve, dok na sanirane površine dolaze pionirske i heliofilne vrste, poput jarebika i gorskog javora. Rezultati istraživanja Slanařa i dr.h, (2017) ukazuju na značajnu prirodnu obnovu bukve unutar smrekovih sastojina, što je u skladu s dugoročnim istraživanjima koja potvrđuju njezino širenje diljem Europe (Rohner i dr., 2012). S druge strane, smreka pokazuje zadovoljavajuću sposobnost obnove u zdravim sastojinama dok se u uvjetima sušenja najslabije obnavlja što upućuje na njezinu osjetljivost na promjene ekoloških uvjeta. Budući da se čiste smrekove sastojine na sjevernom Velebitu nalaze unutar zone pretplaninskih bukovih šuma i dinarskih šuma jеле na vapnenačkim blokovima, prisutnost dostupnog sjemena, zajedno s povoljnim ekološkim uvjetima, upućuje na vjerojatnost da će upravo ove dvije vrste – bukva i jela – postupno zauzimati određene dijelove koje trenutno prekriva smreka. Prema Dakskobleru, (2008), očekuje se da će bukva posebno zauzimati starije smrekove sastojine, no njezina ekspanzija neće biti jednako izražena na nepovoljnim staništima poput mrazišta, izrazito strmih, kamenitih i sušnih terena, gdje se prepostavlja da će smreka i dalje zadržati svoju prisutnost.

7. ZAKLJUČCI

- 1.** Projekcije pogodnosti staništa za običnu smrek u Hrvatskoj, bez obzira na scenarij ukazuju na značajan gubitak povoljnog staništa u skoroj budućnosti. Najveći gubitak pogodnog staništa možemo očekivati na južnim i istočnim dijelovima recentne geografske rasprostranjenosti u Hrvatskoj. S druge strane, dio područja Gorskog kotara te pojedini dijelovi sjevernog Velebita posebice na većim nadmorskim visinama će zadržati uvjete koji će i dalje omogućiti rast i opstanak smreke.
- 2.** Prosječne maksimalne ljetne temperature zraka (svibanj – kolovoz) značajno utječu na međugodišnju dinamiku brojnosti populacije smrekovog potkornjaka. S obzirom da u budućnosti očekujemo veće ljetne temperature zraka kao posljedica klimatskih promjena možemo zaključiti da će budući uvjeti uvelike pogodovati povećanju brojnosti populacije potkornjaka na sjevernome Velebitu. Premda je teško dovesti u vezu povećanje brojnosti i štete na šumama obične smreke ipak možemo smatrati da će budući uvjeti predstavljati rizik za gospodarenje i zaštitu šuma obične smreke.
- 3.** Trendovi rasta i klimatska osjetljivost ukazuju da je smreka sve više pod negativnim pritiskom visokih temperatura zraka i deficita vlage. Premda se ukupne oborine nisu mijenjale tijekom promatranog razdoblja ipak povećanje temperature utječe na evapotranspiraciju i smanjenja vlage u sustavu. Takvi stresni uvjeti značajno smanjuju vitalnost smreke i čine ju ranjivom na napade potkornjaka.
- 4.** Istraživane sastojine obične smreke izuzev prašumskih lokaliteta na području NP Sjeverni Velebit su unimodalne dobne strukture, nastale u vrlo kratkom vremenskom razdoblju, najvjerojatnije u procesu sekundarne sukcesije. Određene sastojine ili njihovi dijelovi još uvijek su zadržale pionirski karakter dok se druge sastojine ili njihovi dijelovi nalaze u prijelaznom stadiju silvidinamike prema bukovim ili mješovitim bukovo-jelovim sastojinama. U ovom drugom slučaju odumiranja smreke uslijed napada potkornjaka su djelomično ubrzala proces silvidinamike prema prirodnijem sastavu vrsta i strukturi sastojina.
- 5.** Nadmorska visina, nagib i ekspozicija značajno utječu na intenzitet sušenja smrekovih sastojina. Najveći udio odumrlih stabala zabilježen je na nižim nadmorskim

visinama (1200–1350 m) i južnim (termofilijim) ekspozicijama, gdje je stres uzrokovani toplinskim valovima i sušom izraženiji. Vjerovatnosti odumiranja se značajno smanjuje na nadmorskim visinama iznad 1350 m, dok su sastojine smreke na nižim nadmorskim visinama značajno izložene većem odumiranju.

6. Sastojinske karakteristike primarnih prašuma obične smreke ukazuju na raznодобну strukturu s postojanjem tri do četiri vidljive generacije stabala s primjercima stabala starijima od 300 godina. Usporedno sa smrekom bukva pokazuje još raznovrsniju dobnu strukturu s pet do šest generacija i pojedinačnim stablima starijima od 400 godina. Nasuprot tome, sekundarne prašume ili negospodarske sastojine uglavnom imaju unimodalnu ili bimodalnu distribuciju starosti, s prosječnom starosti između 100 i 180 godina, što odražava njihov sukcesijski razvoj na područjima koja su prethodno bila obešumljena. Uz naravno nadmorsklu visinu, struktura primarne prašume pokazala je veću otpornost na odumiranje u usporedbi s gospodarskim šumama i sekundarnim prašumama, što ukazuje na važnost raznодobne strukture kao potencijalnog modela u gospodarskim sastojinama.

7. Odumiranje sastojina kao posljedica napada potkornjaka, stvaraju mikrostanišne uvjete koji pogoduju obnovi jele i bukve, dok velike otvorene površine nastale tehničkom sanacijom pogoduju većoj pojavnosti pionirskih, termofilnih i heliofilnih vrsta. Na tako saniranim površinama i progalamama većim od 0,1 ha obnova smreke je bezuspješna naročito zbog konkurenkcije gustog sloja prizemnog rašća.

8. Buduće gospodarenje kao i planiranje gospodarenja sastojinama obične smreke treba biti fleksibilno uz konstanti monitoring svih navedenih ugroza i prijetnji. Budući razvoj sastojina treba usmjeriti obzirom na situaciju na terenu. Smreku treba favorizirati samo na onim dijelovima reljefa gdje su uvjeti vlage i temperature takvi da ne pogoduju razvoju bukve i drugih termofilnih vrsta. Obnove takvih sastojina provoditi oplodnim sjećama na malim površinama u dva sijeka (naplodni i dovršni). U slučajevima gdje dolazi do pojave pomlatka bukve i jele treba raditi na njegovom oslobađanju i budući razvoj sastojina usmjeriti prema čistim bukovim ili mješovitim bukvo-jelovim šumama. U takvim slučajevima koristi grupimično skupinaste oplodne ili preborne sječe.

8. LITERATURA

- Abegg, M., Brändli, U.-B., Cioldi, F., Fischer, C., Bonardi, A., Huber, M., Keller, M., Meile, R., Rösler, E., Speich, S., Traub, B., i Vidondo, B. (2014). *Fourth national forest inventory—Result tables and maps on the Internet for the NFI 2009-2013 (NFI4b)*. <https://doi.org/10.21258/1057112>
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. IEEE Transactions on Automatic Control. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., i Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Altman, J., Fibich, P., Santruckova, H., Dolezal, J., Stepanek, P., Kopacek, J., Hunova, I., Oulehle, F., Tumajer, J., i Cienciala, E. (2017). Environmental factors exert strong control over the climate-growth relationships of *Picea abies* in Central Europe. *Science of The Total Environment*, 609, 506–516.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.134>
- Anderson-Teixeira, K. J., Miller, A. D., Mohan, J. E., Hudiburg, T. W., Duval, B. D., i DeLucia, E. H. (2013). Altered dynamics of forest recovery under a changing climate. *Global Change Biology*, 19(7), 2001–2021.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12194>
- Andreassen, K., Solberg, S., Tveito, O. E., i Lystad, S. L. (2006). Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway. *Forest Ecology and Management*, 222(1), 211–221.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.029>
- Bače, R., Schurman, J., Brabec, M., Čada, V., Després, T., Janda, P., Lábusová, J., Mikoláš, M., Morrissey, R., Mrhalová, H., Nagel, T., Novakova, M., Seedre, M., Synek, M., Trotsiuk, V., i Svoboda, M. (2017). Long-term responses of canopy-understory interactions to disturbance severity in primary *Picea abies*

- forests. *Journal of Vegetation Science*, 28, 1128–1139.
<https://doi.org/10.1111/jvs.12581>
- Baće, R., Svoboda, M., Janda, P., Morrissey, R., Wild, J., Clear, J., Čada, V., i Donato, D. (2015). Legacy of Pre-Disturbance Spatial Pattern Determines Early Structural Diversity following Severe Disturbance in Montane Spruce Forests. *PloS one*, 10, e0139214.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139214>
- Baier, P., Pennerstorfer, J., i Schopf, A. (2007). PHENIPS—A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. *Forest Ecology and Management - FOREST ECOL MANAGE*, 249, 171–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.020>
- Baillie, M. G. L., i Pilcher, J. R. (1973). *A Simple Crossdating Program for Tree-Ring Research*. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/260029>
- Bakšić, D., Perković, I., Pernar, N., Vukelić, J., i Vrbek, B. (2011). Pedofiziografske značajke i sadržaj teških metala Pb, Zn, Cd i Cu u smrekovim šumama sjevernoga Velebita i Štirovače. *Croatian Journal of Forest Engineering : Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 32(1), 111–118.
- Barringer, B. C., Koenig, W. D., i Knops, J. M. H. (2013). Interrelationships among life-history traits in three California oaks. *Oecologia*, 171(1), 129–139.
<https://doi.org/10.1007/s00442-012-2386-9>
- Basnet, S., Burger, A., Homolová, Z., Märker, F., Trouillier, M., i Wilmking, M. (2024). Effect of bedrock, tree size and time on growth and climate sensitivity of Norway spruce in the High Tatras. *European Journal of Forest Research*.
<https://doi.org/10.1007/s10342-024-01725-6>
- Begović, K., Rydval, M., Mikac, S., Čupić, S., Svobodova, K., Mikoláš, M., Kozák, D., Kameniar, O., Frankovič, M., Pavlin, J., Langbehn, T., i Svoboda, M. (2020). Climate-growth relationships of Norway Spruce and silver fir in primary forests of the Croatian Dinaric mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 288–289, 108000. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108000>
- Bennett, K. D., Tzedakis, P. C., i Willis, K. J. (1991). Quaternary Refugia of North European Trees. *Journal of Biogeography*, 18(1), 103.
<https://doi.org/10.2307/2845248>
- Bennett, S., Wernberg, T., Arackal Joy, B., de Bettignies, T., i Campbell, A. H. (2015). Central and rear-edge populations can be equally vulnerable to

warming. *Nature Communications*, 6(1), 10280.

<https://doi.org/10.1038/ncomms10280>

Bentz, B. J., Jönsson, A. M., Schroeder, M., Weed, A., Wilcke, R. A. I., i Larsson, K. (2019). Ips typographus and Dendroctonus ponderosae Models Project Thermal Suitability for Intra- and Inter-Continental Establishment in a Changing Climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00001>

Biedermann, P., Müller, J., Grégoire, J.-C., Gruppe, A., Hagge, J., Hammerbacher, A., Hofstetter, R., Kandasamy, D., Kolarik, M., Kostovcik, M., Krokene, P., Sallé, A., Six, D., Turrini, T., Vanderpool, D., Wingfield, M., i Bässler, C. (2019). Bark Beetle Population Dynamics in the Anthropocene: Challenges and Solutions. *Trends in Ecology and Evolution*, 34.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.06.002>

Blöschl, G., Komma, J., Nester, T., Rogger, M., Salinas, J. L., i Viglione, A. (2018). Die Wirkung des Waldes auf Hochwässer (The effect of forests on floods). *Wildbach- und Lawinenverbau : Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*, 181, 288–296.

Bouriaud, O., i Popa, I. (2009). Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees*, 23(1), 95–106. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0258-z>

Bucci, S. J., Scholz, F. G., Goldstein, G., Meinzer, F. C., i Sternberg, L. D. S. L. (2003). Dynamic changes in hydraulic conductivity in petioles of two savanna tree species: Factors and mechanisms contributing to the refilling of embolized vessels. *Plant, Cell and Environment*, 26(10), 1633–1645.
<https://doi.org/10.1046/j.0140-7791.2003.01082.x>

Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

Bunn A, Korpela M, i Biondi F. (2021). *dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.2. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.*

Buntgen, U., Frank, D. C., Kaczka, R. J., Verstege, A., Zwijacz-Kozica, T., i Esper, J. (2007). Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the

- Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Tree Physiology*, 27(5), 689–702. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.5.689>
- Carnicer, J., Vives-Ingla, M., Blanquer, L., Méndez-Camps, X., Rosell, C., Sabaté, S., Gutiérrez, E., Sauras, T., Peñuelas, J., i Barbeta, A. (2021). Forest resilience to global warming is strongly modulated by local-scale topographic, microclimatic and biotic conditions. *Journal of Ecology*, 109(9), 3322–3339. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13752>
- Carrer, M., Castagneri, D., Prendin, A. L., Petit, G., i von Arx, G. (2017). Retrospective Analysis of Wood Anatomical Traits Reveals a Recent Extension in Tree Cambial Activity in Two High-Elevation Conifers. *Frontiers in Plant Science*, 8, 737. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00737>
- Carrer, M., Motta, R., i Nola, P. (2012). Significant Mean and Extreme Climate Sensitivity of Norway Spruce and Silver Fir at Mid-Elevation Mesic Sites in the Alps. *PLOS ONE*, 7(11), e50755. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050755>
- Celedon, J. M., i Bohlmann, J. (2019). Oleoresin defenses in conifers: Chemical diversity, terpene synthases and limitations of oleoresin defense under climate change. *The New Phytologist*, 224(4), 1444–1463. <https://doi.org/10.1111/nph.15984>
- Cestar, D., Hren, V., Kovačević, Z., Martinović, J., i Pelcer, Z. (1977). *Tipološke značajke šuma na profilu Štirovača-Lešće* (str. 103). Šumarski institut Jastrebarsko.
- Cestar D., Hren V., Kovačević Z., Martinović J., i Pelcer Z. (1978). *Ekološko-gospodarski tipovi šuma okoliša Zavižana* (str. 110). Šumarski institut Jastrebarsko.
- CH2014-Impacts. (bez dat.). Preuzeto 04. ožujak 2025., od <https://ch2014-impacts.ch/index.php?lang=en&id=chapter>
- Chałupka, W. (2007). Reproduction. U M. G. Tjoelker, A. Boratyński, i W. Bugała (Ur.), *Biology and Ecology of Norway Spruce* (str. 97–114). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4841-8_8
- Choat, B., Nolf, M., Lopez, R., Peters, J. M. R., Carins-Murphy, M. R., Creek, D., i Brodribb, T. J. (2019). Non-invasive imaging shows no evidence of embolism repair after drought in tree species of two genera. *Tree Physiology*, 39(1), 113–121. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy093>

- Christiansen, E., i Horntvedt, R. (1983). Combined Ips/Ceratocystis attack on Norway spruce, and defensive mechanisms of the trees. *Zeitschrift Für Angewandte Entomologie*, 96(1–5), 110–118. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1983.tb03650.x>
- CIFOR. (2020, srpanj 7). CIFOR Annual Report 2019: Forests in a time of crises. *CIFOR-ICRAF*. <https://www.cifor-icraf.org/knowledge/publication/7670/>
- Clark, P., Dyke, A., Shakun, J., Carlson, A., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J., Hostetler, S., i McCabe, A. (2009). The Last Glacial Maximum. *Science (New York, N.Y.)*, 325, 710–714. <https://doi.org/10.1126/science.1172873>
- Čavlović, J. (2010). *PRVA NACIONALNA INVENTURA ŠUMA REPUBLIKE HRVATSKE*. Zagreb: Ministarstvo regionalnog razvoja, šumarstva i vodnog gospodarstva Republike Hrvatske.
<https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/knjiga/9563>
- Čermák, P., Mikita, T., Kadavý, J., i Trnka, M. (2021). Evaluating Recent and Future Climatic Suitability for the Cultivation of Norway Spruce in the Czech Republic in Comparison with Observed Tree Cover Loss between 2001 and 2020. *Forests*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/f12121687>
- Čermák, P., Rybníček, M., Žid, T., Andreassen, K., Børja, I., i Kolář, T. (2017). Impact of climate change on growth dynamics of Norway spruce in south-eastern Norway. *Silva Fennica*, 51(2). <https://doi.org/10.14214/sf.1781>
- Červenka, J., Bače, R., Zenáhlíková, J., i Svoboda, M. (2016). Changes in stand structure, dead wood quantity and quality in mountain spruce forest after severe disturbance. *Zpravy Lesnického Vyzkumu*, 61.
- Červenka, J., Bače, R., Zenáhlíková, J., i Svoboda, M. (2020). *The structure of natural regeneration in a mountain spruce forest 5 years after parent stand dieback*.
- Dakskobler, I. (2008). Pregled bukovih rastišč v Sloveniji = A Review of beech sites in Slovenia. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 87, 3–14.
- D'Andrea, G., Šimůnek, V., Pericolo, O., Vacek, Z., Vacek, S., Corleto, R., Olejár, L., i Ripullone, F. (2023). Growth Response of Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) in Central Bohemia (Czech Republic) to Climate Change. *Forests*, 14(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/f14061215>

- Diaci, J. (2002). Regeneration dynamics in a Norway spruce plantation on a silver fir-beech forest site in the Slovenian Alps. *Forest Ecology and Management*, 161(1), 27–38. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00492-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00492-3)
- Douglass, A. E. (1920). Evidence of Climatic Effects in the Annual Rings of Trees. *Ecology*, 1(1), 24–32. <https://doi.org/10.2307/1929253>
- Eatough Jones, M., Fenn, M., i Paine, T. (2011). The effect of nitrogen additions on bracken fern and its insect herbivores at sites with high and low atmospheric pollution. *Arthropod-Plant Interactions*, 5, 163–173. <https://doi.org/10.1007/s11829-011-9125-8>
- Foster, D. R., i Motzkin, G. (1998). Ecology and Conservation in the Cultural Landscape of New England: Lessons from Nature's History. *Northeastern Naturalist*, 5(2), 111–126. <https://doi.org/10.2307/3858582>
- Franklin, J., Spies, T., Van Pelt, R., Carey, A., Thornburgh, D., Berg, D., Lindenmayer, D., Harmon, M., Keeton, W., Shaw, D., Bible, K., i Chen, J. (2002). Disturbances and Structural Development of Natural Forest Ecosystems With Silvicultural Implications, Using Douglas-Fir Forests as an Example. *Forest Ecology and Management*, 155. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00575-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00575-8)
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press.
- Gasparini, P., Di Cosmo, L., Floris, A., i Laurentis, D. (2022). *Italian National Forest Inventory—Methods and Results of the Third Survey # Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio—Metodi e Risultati della Terza Indagine*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98678-0>
- Gschwantner, T., Gabler, K., Schadauer, K., i Weiss, P. (2010). National forest inventory reports—Austria. *National forest inventories: Pathways for common reporting*, 57–71.
- Guidotti, A. (2020). *Master's thesis in environmental sciences On the processes and factors shaping the Norway spruce's (Picea abies) forests in the Southern Swiss Alps*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000438047>
- Haas, J. (2023, srpanj 19). *Bark beetle outbreaks in forests: A pan-European view - FOREST EUROPE*. FOREST EUROPE - Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. <https://foresteurope.org/bark-beetle-outbreaks-in-forests-a-pan-european-view/>

- Hacket-Pain, A., Ascoli, D., Berretti, R., Mencuccini, M., Motta, R., Nola, P., Piussi, P., Ruffinatto, F., i Vacchiano, G. (2019). Temperature and masting control Norway spruce growth, but with high individual tree variability. *Forest Ecology and Management*, 438, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.014>
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., i Lister, D. H. (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), 623–642.
<https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Hartl-Meier, C., Dittmar, C., Zang, C., i Rothe, A. (2014). Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees*, 28(3), 819–829. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1>
- Hartmann, H., Ziegler, W., Kolle, O., i Trumbore, S. (2013). Thirst beats hunger – declining hydration during drought prevents carbon starvation in Norway spruce saplings. *New Phytologist*, 200(2), 340–349.
<https://doi.org/10.1111/nph.12331>
- Haylock, M., Hofstra, N., Tank, A., Klok, E., Jones, P., i New, M. (2008). A European Daily High-Resolution Gridded Data Set of Surface Temperature and Precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research*, 113.
<https://doi.org/10.1029/2008JD010201>
- Hewitt, G. (2000). The genetic legacy of the Quaternary ice ages. *Nature*, 405(6789), 907–913. <https://doi.org/10.1038/35016000>
- Hewitt, G. M. (2004). Genetic consequences of climatic oscillations in the Quaternary. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 359(1442), 183–195.
- Hlásny, T., i Haas, J. (2023, srpanj 26). *Managing bark beetle outbreaks in the 21st century – Policy brief—FOREST EUROPE*. FOREST EUROPE - Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe.
https://foresteurope.org/publications_type/managing-bark-beetle-outbreaks-in-the-21st-century-policy-brief/
- Hlásny, T., König, L., Krokene, P., Lindner, M., Montagné-Huck, C., Müller, J., Qin, H., Raffa, K., Schelhaas, M.-J., Svoboda, M., Viiri, H., i Seidl, R. (2021). Bark Beetle Outbreaks in Europe: State of Knowledge and Ways Forward for

Management. *Current Forestry Reports*, 7, 1–28.

<https://doi.org/10.1007/s40725-021-00142-x>

Hlásny, T., i Turčáni, M. (2013). Persisting bark beetle outbreak indicates the unsustainability of secondary Norway spruce forests: Case study from Central Europe. *Annals of Forest Science*, 70(5), Article 5.
<https://doi.org/10.1007/s13595-013-0279-7>

Holeksa, J. (1998). Breakdown of tree stand and spruce regeneration versus structure and dynamics of a Carpathian subalpine spruce forest. *Monographiae Botanicae*, 82, 1–209. <https://doi.org/10.5586/mb.1998.001>

Holeksa, J., Zielonka, T., i Źywiec, M. (2012). Norway spruce *Picea abies* regeneration and canopy disturbance in a Carpathian subalpine forest. U *Spruce: Ecology, Management and Conservation* (str. 1–40).

Holmes, R. L. (1983). *Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement*. <https://repository.arizona.edu/handle/10150/261223>

Honkaniemi, J., Rammer, W., i Seidl, R. (2020). Norway spruce at the trailing edge: The effect of landscape configuration and composition on climate resilience. *Landscape Ecology*, 35(3), 591–606. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00964-y>

Hrašovec, Boris. (2023). *Nacionalni park „Sjeverni Velebit“: Feromonski monitoring potkornjaka- godina 2023*. Fakultet šumarstva i drvne tehnologije.

Huggett, R. J. (2004). *Fundamentals of Biogeography* (2. izd.). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203356586>

Igor Anić. (2009). Šumskouzgojni postupci u šumama Republike Hrvatske. U *Uzgajanje šuma 2*. Interna skripta, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije.

Ionita, M., i Viorica, N. (2021). Changes in drought features at the European level over the last 120 years. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 1685–1701. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1685-2021>

IPCC AR6. (2023). <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional*

Environmental Change, 14(2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

- Jakoby, O., Lischke, H., i Wermelinger, B. (2019). Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). *Global Change Biology*, 25(12), 4048–4063. <https://doi.org/10.1111/gcb.14766>
- Jandl, R. (2020). Climate-induced challenges of Norway spruce in Northern Austria. *Trees, Forests and People*, 1, 100008.
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100008>
- Jevšenak, J., Tychkov, I., Gričar, J., Levanič, T., Tumajer, J., Prislan, P., Arnič, D., Popkova, M., i Shishov, V. V. (2021). Growth-limiting factors and climate response variability in Norway spruce (*Picea abies* L.) along an elevation and precipitation gradients in Slovenia. *International Journal of Biometeorology*, 65(2), 311–324. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02033-5>
- Jönsson, A., Schroeder, M., Lagergren, F., Anderbrant, O., i Smith, B. (2012). Guess the impact of *Ips typographus*—An ecosystem modelling approach for simulating spruce bark beetle outbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology*, s 166–167, 188–200. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.07.012>
- Kasumović, L. (2015). *Prilagodba razvojnoga ciklusa, prezimljavanja i prostorne distribucijesmrekovih potkornjaka(*Ips typographus* L. i *Pityogenes chalcographus* L.)u odnosu na temeljne stanišne čimbenike* [Info:eu-repo/semantics/doctoralThesis, University of Zagreb. Faculty of Forestry].
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:507105>
- Kausrud, K., Okland, B., Skarpaas, O., Grégoire, J.-C., Erbilgin, N., i Stenseth, N. C. (2012). Population dynamics in changing environments: The case of an eruptive forest pest species. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 87(1), 34–51. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00183.x>
- Kermavnar, J., Kutnar, L., i Pintar, A. M. (2023). Ecological factors affecting the recent *Picea abies* decline in Slovenia: The importance of bedrock type and forest naturalness. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 16(2), 105.
<https://doi.org/10.3832/ifor4168-016>
- Koenig, W. D., Knops, J. M. H., Carmen, W. J., i Pearse, I. S. (2015). What drives mast? The phenological synchrony hypothesis. *Ecology*, 96(1), 184–192.
<https://doi.org/10.1890/14-0819.1>

- Krejza, J., Cienciala, E., Světlík, J., Bellan, M., Noyer, E., Horáček, P., Štěpánek, P., i Marek, M. V. (2021). Evidence of climate-induced stress of Norway spruce along elevation gradient preceding the current dieback in Central Europe. *Trees*, 35(1), 103–119. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02022-6>
- Kunca, A., Zúbrik, M., Galko, J., Vakula, J., Leontovýč, R., Konôpká, B., Nikolov, C., Gubka, A., Longauerova, V., Malova, M., Rell, S., i Lalík, M. (2019). Salvage felling in the Slovak Republic's forests during the last twenty years (1998–2017). *Central European Forestry Journal*, 65, 3–11. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0007>
- Kutnar, L., Kermavnar, J., i Pintar, A. (2021). Climate change and disturbances will shape future temperate forests in the transition zone between Central and SE Europe. *Annals of Forest Research*, 64, 67–86. <https://doi.org/10.15287/afr.2021.2111>
- Latałowa, M., i van der Knaap, W. O. (2006). Late Quaternary expansion of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. In Europe according to pollen data. *Quaternary Science Reviews*, 25(21), 2780–2805. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.06.007>
- Lawler, J. J., Shafer, S. L., White, D., Kareiva, P., Maurer, E. P., Blaustein, A. R., i Bartlein, P. J. (2009). Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology*, 90(3), 588–597. <https://doi.org/10.1890/08-0823.1>
- Levanič, T. (2007). Atrics – A New System for Image Acquisition in Dendrochronology. *Tree-Ring Research*, 63(2), 117–122. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-63.2.117>
- Levanič, T., Gričar, J., Gagen, M., Jalkanen, R., Loader, N. J., McCarroll, D., Oven, P., i Robertson, I. (2008). The climate sensitivity of Norway spruce [Picea abies (L.) Karst.] in the southeastern European Alps. *Trees*, 23(1), 169. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0265-0>
- Lévesque, M., Saurer, M., Siegwolf, R., Eilmann, B., Brang, P., Bugmann, H., i Rigling, A. (2013). Drought response of five conifer species under contrasting water availability suggests high vulnerability of Norway spruce and European larch. *Global Change Biology*, 19(10), 3184–3199. <https://doi.org/10.1111/gcb.12268>
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Baratti, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M. J., i Marchetti, M.

- (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Lobinger, G. (1994). Die Lufttemperatur als limitierender Faktor für die Schwärzmaktivität zweier rindenbrütender Fichtenborkenkäferarten, *Ips typographus* L. und *Pityogenes chalcographus* L. (Col., Scolytidae). *Anzeiger für Schädlingskunde Pflanzenschutz Umweltschutz*, 67(1), 14.
- Logan, J., Regniere, J., i Powell, J. (2003). Assessing the Impacts of Global Warming on Forest Pest Dynamics. *Frontiers in Ecology and The Environment - FRONT ECOL ENVIRON*, 1. <https://doi.org/10.2307/3867985>
- Lyr, H., Fiedler, H.-J., i Tranquillini, W. (1999). *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Mansfeld, V. (2011). Norway spruce in forest ecosystems of the Czech Republic in relation to different forest site conditions. *Journal of Forest Science*, 57, 514–522. <https://doi.org/10.17221/14/2011-JFS>
- Marchi, M., Castellanos-Acuña, D., Hamann, A., Wang, T., Ray, D., i Menzel, A. (2020). ClimateEU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe. *Scientific Data*, 7(1), 428. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00763-0>
- Marini, L., Økland, B., Jönsson, A. M., Bentz, B., Carroll, A., Forster, B., Grégoire, J.-C., Hurling, R., Nageleisen, L. M., Netherer, S., Ravn, H. P., Weed, A., i Schroeder, M. (2017). Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*, 40(12), 1426–1435. <https://doi.org/10.1111/ecog.02769>
- Markus, Z., Rauthe-Schöch, A., Hänsel, S., Finger, P., Rustemeier, E., i Schneider, U. (2022). GPCC Full Data Daily Version 2022 at 1.0°: Daily Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data: Globally Gridded Daily Totals (Verzija 2022, str. approx. 25 MB per gzip file) [NetCDF]. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC, <http://gpcc.dwd.de/>) at Deutscher Wetterdienst. https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_D_V2022_100
- Martinez del Castillo, E., Torbenson, M. C. A., Reinig, F., Tejedor, E., de Luis, M., i Esper, J. (2024). Contrasting Future Growth of Norway Spruce and Scots Pine

Forests Under Warming Climate. *Global Change Biology*, 30(11), e17580.

<https://doi.org/10.1111/gcb.17580>

Matić, S. (2011). Utjecaj stanišnih promjena i načina gospodarenja na sušenje obične smreke (*Picea abies* Karst.) u Hrvatskoj. *Croatian Journal of Forest Engineering : Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 32(1), 7–16.

Maunoury-Danger, F., Fresneau, C., Eglin, T., Berveiller, D., Francois, C., Lelarge-Trouverie, C., i Damesin, C. (2010). Impact of carbohydrate supply on stem growth, wood and respired CO₂ δ¹³C: Assessment by experimental girdling. *Tree physiology*, 30, 818–830. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq039>

McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., i Yepez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>

Mencuccini, M., Piussi, P., i Zanzi Sulli, A. (1995). Thirty years of seed production in a subalpine Norway spruce forest: Patterns of temporal and spatial variation. *Forest Ecology and Management*, 76(1), 109–125.
[https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03555-O](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03555-O)

Metslaid, M., Jõgiste, K., Nikinmaa, E., Moser, W., i Porcar-Castell, A. (2007). Tree variables related to growth response and acclimation of advance regeneration of Norway spruce and other coniferous species after release. *Forest Ecology and Management*, 250, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.009>

Mezei, P., Jakuš, R., Pennerstorfer, J., Havašová, M., Škvarenina, J., Ferenčík, J., Slivinský, J., Bičárová, S., Bilčík, D., Blaženec, M., i Netherer, S. (2017). Storms, temperature maxima and the Eurasian spruce bark beetle *Ips typographus*—An infernal trio in Norway spruce forests of the Central European High Tatra Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 242, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.004>

Milan Oršanić. (2001). *Strukturne osobine i dinamika šumskih sastojina obične smreke (Picea abies (L.) Karst) na sjevernom Velebitu*. Sveučilište u Zagrebu Šumarski fakultet, Doktorska disertacija.

Ministerie van Landbouw, N. en V. (2020, rujan 14). *2019 report on the Czech forests: Record harvesting and restoration - Nieuwsbericht - Agroberichten*

Buitenland [Nieuwsbericht]. Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur.

<https://www.agroberichtenbuitenland.nl/actueel/nieuws/2020/09/14/czechia-report-on-forestry-2019>

Mitchell, A.F., A. F. (1974). *Field guide to the trees of Britain and northern Europe*.

<https://biblio.co.nz/book/field-guide-trees-britain-northern-europe/d/1494851277>

Modrzyński, J. (2007). Outline of Ecology. U M. G. Tjoelker, A. Boratyński, i W.

Bugała (Ur.), *Biology and Ecology of Norway Spruce* (str. 195–253). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4841-8_11

Mosteller, F., i Tukey, J. W. (1977). *Data analysis and regression: A second course in statistics*. Reading, Mass. : Addison-Wesley Pub. Co.

<https://trove.nla.gov.au/version/28634358>

Nikolov, C., Konôpka, B., Kajba, M., Galko, J., Kunca, A., i Janský, L. (2014). Post-disaster Forest Management and Bark Beetle Outbreak in Tatra National Park, Slovakia. *Mountain Research and Development*, 34, 326–335.

<https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-13-00017.1>

Nothdurft, A., i Engel, M. (2020). Climate sensitivity and resistance under pure- and mixed-stand scenarios in Lower Austria evaluated with distributed lag models and penalized regression splines for tree-ring time series. *European Journal of Forest Research*, 139(2), 189–211. <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01234-x>

Obladen, N., Dechering, P., Skiadaresis, G., Tegel, W., Keßler, J., Höllerl, S., Kaps, S., Hertel, M., Dulamsuren, C., Seifert, T., Hirsch, M., i Seim, A. (2021). Tree mortality of European beech and Norway spruce induced by 2018-2019 hot droughts in central Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108482. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108482>

Obratov-Petković, D., Beloica, J., Čavlović, D., Djurdjević, V., Belanović Simić, S., i Bjedov, I. (2022). Modelling Response of Norway Spruce Forest Vegetation to Projected Climate and Environmental Changes in Central Balkans Using Different Sets of Species. *Forests*, 13(5), Article 5.

<https://doi.org/10.3390/f13050666>

Økland, B., Nikolov, C., Krokene, P., i Vakula, J. (2016). Transition from windfall- to patch-driven outbreak dynamics of the spruce bark beetle *Ips typographus*.

Forest Ecology and Management, 363, 63–73.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.007>

Orešković, M., Trlin, D., Anić, I., Oršanić, M., Prša, L., i Mikac, S. (2024). Climate Sensitivity and Tree Growth Patterns in Subalpine Spruce-Dominated Forests of the North-Western Dinaric Alps. *Forests*, 15, 1972.
<https://doi.org/10.3390/f15111972>

Pach, M., Bielak, K., Bončina, A., Coll, L., Höhn, M., Kašanin-Grubin, M., Lesiński, J., Pretzsch, H., Skrzyszewski, J., Spathelf, P., Tonon, G., Weatherall, A., i Zlatanov, T. (2022). Climate-Smart Silviculture in Mountain Regions. U R. Tognetti, M. Smith, i P. Panzacchi (Ur.), *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions* (str. 263–315). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-80767-2_8

Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M. E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., Hauf, Y., Jasinevičius, G., Labonne, S., Linkevičius, E., Mahnken, M., Milanovic, S., Nabuurs, G.-J., Nagel, T. A., Nikinmaa, L., Panyatov, M., Bercak, R., Seidl, R., Ostrogović Sever, M. Z., ... Schelhaas, M.-J. (2023). Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*, 29(5), 1359–1376.
<https://doi.org/10.1111/gcb.16531>

Peet, R., i Christensen, N. (1987). Competition and Tree Death. *Bioscience*, 37.
<https://doi.org/10.2307/1310669>

Pickett, S. T. A., i White, P. S. (Ur.). (1985). Contributors. U *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics* (str. xi–xii). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-554520-4.50004-6>

Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., i Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, 7(1), 217–240.
<https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>

Potterf, M., Svitok, M., Mezei, P., Jarčuška, B., Jakuš, R., Blaženec, M., i Hlásny, T. (2023). Contrasting Norway spruce disturbance dynamics in managed forests and strict forest reserves in Slovakia. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 96(3), 387–398. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpac045>

Prelovsek, M., Mihevc, A., Hajna, N., i Kranjc, A. (2010). *Introduction to the Dinaric Karst*. <https://doi.org/10.3986/9789612541989>

- Pretzsch, H., Schütze, G., i Uhl, E. (2013). Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology*, 15(3), 483–495.
<https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x>
- Primicia, I., Camarero, J., Janda, P., Čada, V., Morrissey, R., Trotsiuk, V., Bače, R., Teodosiu, M., i Svoboda, M. (2015). Age, competition, disturbance and elevation effects on tree and stand growth response of primary *Picea abies* forest to climate. *Forest Ecology and Management*, 354, 77–86.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.034>
- Raffa, K., Aukema, B., Bentz, B., Carroll, A., Hicke, J., Turner, M., i Romme, W. (2008). Cross-scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification: The Dynamics of Bark Beetle Eruptions. *BioScience*, 58(6), 501–517. <https://doi.org/10.1641/B580607>
- Rangwala, I., i Miller, J. R. (2012). Climate change in mountains: A review of elevation-dependent warming and its possible causes. *Climatic Change*, 114(3), 527–547. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0419-3>
- Ravazzi, C. (2002). Late Quaternary history of spruce in southern Europe. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 120(1), 131–177.
[https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(01\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(01)00149-X)
- Remmert, H. (2012). *The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems*. Springer Science i Business Media.
- Rohner, B., Bigler, C., Wunder, J., Brang, P., i Bugmann, H. (2012). Fifty years of natural succession in Swiss forest reserves: Changes in stand structure and mortality rates of oak and beech. *Journal of Vegetation Science*, 23(5), 892–905. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01408.x>
- Savva, Y., Oleksyn, J., Reich, P. B., Tjoelker, M. G., Vaganov, E. A., i Modrzynski, J. (2006). Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees*, 20(6), 735–746.
<https://doi.org/10.1007/s00468-006-0088-9>
- Schmidt-Vogt, H. (1977). *Die Fichte: Taxonomie, Verbreitung, Morphologie, Ökologie, Waldgesellschaften*. Parey.
- Schweingruber, F. H. (1988). *Tree rings: Basics and applications of dendrochronology*. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-1273-1>

- Secchi, F., i Zwieniecki, M. A. (2012). Analysis of Xylem Sap from Functional (Nonembolized) and Nonfunctional (Embolized) Vessels of *Populus nigra*: Chemistry of Refilling. *Plant Physiology*, 160(2), 955–964.
<https://doi.org/10.1104/pp.112.200824>
- Seidl, R., Fernandes, P., Fonseca, T., Gillet, F., Jönsson, A., Merganicova, K., Netherer, S., Arpacı, A., Bontemps, J.-D., Bugmann, H., Olabarria, J., Lasch, P., Meredieu, C., Moreira, F., Schelhaas, M., i Mohren, G. M. J. (2011). Modelling natural disturbances in forest ecosystems: A review. *Ecological Modelling*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.040>
- Seidl, R., Müller, J., Hothorn, T., Bässler, C., Heurich, M., i Kautz, M. (2016). Small beetle, large-scale drivers: How regional and landscape factors affect outbreaks of the European spruce bark beetle. *Journal of Applied Ecology*, 53(2), 530–540. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12540>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairotta, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A., i Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402.
<https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Seim, A., Marquer, L., Bisson, U., Hofmann, J., Herzig, F., Kontic, R., Lechterbeck, J., Muigg, B., Neyses-Eiden, M., Rzepecki, A., Rösch, M., Walder, F., Weidemueller, J., i Tegel, W. (2022). Historical Spruce Abundance in Central Europe: A Combined Dendrochronological and Palynological Approach. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 909453.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.909453>
- Senf, C., Pflugmacher, D., Hostert, P., i Seidl, R. (2017). Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 453–463.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.004>
- Slanař, J., Vacek, Z., Vacek, S., Bulušek, D., Cukor, J., Štefančík, I., Bílek, L., i Král, J. (2017). Long-term transformation of submontane spruce-beech forests in the Jizerské hory Mts.: Dynamics of natural regeneration. *Central European Forestry Journal*, 63. <https://doi.org/10.1515/forj-2017-0023>

- Sommerfeld, A., Senf, C., Buma, B., D'Amato, A. W., Després, T., Díaz-Hormazábal, I., Fraver, S., Frelich, L. E., Gutiérrez, Á. G., Hart, S. J., Harvey, B. J., He, H. S., Hlásny, T., Holz, A., Kitzberger, T., Kulakowski, D., Lindenmayer, D., Mori, A. S., Müller, J., ... Seidl, R. (2018). Patterns and drivers of recent disturbances across the temperate forest biome. *Nature Communications*, 9(1), 4355. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06788-9>
- Speer, J. H. (2013). *Fundamentals of Tree Ring Research*. UAPress.
<https://uapress.arizona.edu/book/fundamentals-of-tree-ring-research>
- Sproull, G., Adamus, M., Bukowski, M., Krzyżanowski, T., Szewczyk, J., Statwick, J., i Szwagrzyk, J. (2015). Tree and stand-level patterns and predictors of Norway spruce mortality caused by bark beetle infestation in the Tatra Mountains. *Forest Ecology and Management*, 354, 261–271.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.006>
- Stjepan Mikac, Marko Orešković, Domagoj Trlin, Anja Žmegač, Stjepan Dekanić, Vinko Paulić, Damir Ugarković, Milan Oršanić, i Igor Anić. (2023). *Memorijalne prilagodbe klimatskim promjenama za održivo upravljanje prirodnim resursima* (Klimatske promjene i šumarstvo).
- Svoboda, M., Janda, P., Nagel, T. A., Fraver, S., Rejzek, J., i Bače, R. (2012). Disturbance history of an old-growth sub-alpine Picea abies stand in the Bohemian Forest, Czech Republic. *Journal of Vegetation Science*, 23(1), 86–97. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01329.x>
- Szymański, S. (2007). Silviculture of Norway Spruce. U M. G. Tjoelker, A. Boratyński, i W. Bugała (Ur.), *Biology and Ecology of Norway Spruce* (Sv. 78, str. 295–307). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4841-8_13
- Šumskogospodarska osnova 2016. - 2025. (bez dat.). <https://poljoprivreda.gov.hr/>. Preuzeto 04. listopad 2024., od <https://poljoprivreda.gov.hr/istaknute-teme/sume-112/sumarstvo/sumskogospodarska-osnova-2016-2025/250>
- Tatsumi, S., Yamaguchi, K., i Furuya, N. (2022). ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 14. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.13900>
- Theurillat, J.-P., i Guisan, A. (2001). Potential Impact of Climate Change on Vegetation in the European Alps: A Review. *Climatic Change*, 50(1), 77–109. <https://doi.org/10.1023/A:1010632015572>

- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), Article 1. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Thünen: Forest damage due to drought and heat.* (bez dat.). Preuzeto 04. ožujak 2025., od <https://www.thuenen.de/en/thuenen-topics/forests/forests-in-climate-change/1/forest-damage-due-to-drought-and-heat>
- Thünen: The German National Forest Inventory.* (bez dat.). Preuzeto 04. ožujak 2025., od <https://www.thuenen.de/en/thuenen-topics/forests/the-german-national-forest-inventory>
- Tjoelker, M. G., Boratyński, A., i Bugała, W. (Ur.). (2007). *Biology and Ecology of Norway Spruce* (Sv. 78). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4841-8>
- Tollefsrud, M., R., K., F., G., Johnsen, Ø., Skrøppa, T., Cheddadi, R., W.O., K., Latałowa, M., R., T., T., L., T., G., C., B., i Sperisen, C. (2008). Genetic consequences of glacial survival and postglacial recolonization in Norway spruce: Combined analysis of mitochondrial DNA and fossil pollen. *Molecular Ecology*, 17, 4134–4150.
- Tomasella, M., Häberle, K.-H., Nardini, A., Hesse, B., Machlet, A., i Matyssek, R. (2017). Post-drought hydraulic recovery is accompanied by non-structural carbohydrate depletion in the stem wood of Norway spruce saplings. *Scientific Reports*, 7(1), 14308. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14645-w>
- Tresch, S., Roth, T., Schindler, C., Hopf, S.-E., Remund, J., i Braun, S. (2023). The cumulative impacts of droughts and N deposition on Norway spruce (*Picea abies*) in Switzerland based on 37 years of forest monitoring. *Science of The Total Environment*, 892, 164223.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164223>
- Vacchiano, G., Hacket-Pain, A., Turco, M., Motta, R., Maringer, J., Conedera, M., Drobyshev, I., i Ascoli, D. (2017). Spatial patterns and broad-scale weather cues of beech mast seeding in Europe. *New Phytologist*, 215(2), 595–608.
<https://doi.org/10.1111/nph.14600>
- Verbitskii, V., i Verbitskaya, T. (2007). Ecological optimum of ectothermic organisms: Static-dynamical approach. *Nature Precedings*, 2.
<https://doi.org/10.1038/npre.2007.1324.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J.,

- Morán-Tejeda, E., i Sanchez-Lorenzo, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 52–57.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>
- Vilà-Cabrera, A., i Jump, A. S. (2019). Greater growth stability of trees in marginal habitats suggests a patchy pattern of population loss and retention in response to increased drought at the rear edge. *Ecology Letters*, 22(9), 1439–1448. <https://doi.org/10.1111/ele.13329>
- Vrbek, B., i Pilaš, I. (2006). *Istraživanje tipova tala područja Štirovače u Nacionalnom parku Sjeverni Velebit* (str. 26). Šumarski institut Jastrebarsko, Odjel za ekologiju i uzgajanje šuma.
- Vukelić, J. (2012). *Šumska vegetacija Hrvatske*. <https://www.bib.irb.hr/681998>
- Vukelić, J., R., M. (2005). Šumska vegetacija sjevernoga Velebita. U *Šume i šumarstvo sjevernoga Velebita*. <https://www.bib.irb.hr/231009>
- Wermelinger, B., Epper, C., Kenis, M., Ghosh, S., i Holdenrieder, O. (2012). Emergence patterns of univoltine and bivoltine *Ips typographus* (L.) populations and associated natural enemies. *Journal of Applied Entomology*, 136(3), 212–224. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2011.01629.x>
- Wermelinger, B., i Seifert, M. (1998). Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology*, 122(1–5), 185–191.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1998.tb01482.x>
- Wieser, G., Oberhuber, W., i Gruber, A. (2019). Effects of Climate Change at Treeline: Lessons from Space-for-Time Studies, Manipulative Experiments, and Long-Term Observational Records in the Central Austrian Alps. *Forests*, 10(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/f10060508>
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., i Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 201–213.
- www.cybis.se. (bez dat.). *Cybis.se: Technical writing, software development, dendrochronology*. Preuzeto 04. listopad 2024., od <https://www.cybis.se/>
- www.rinntech.de. (bez dat.). *RINNTECH - Technology for tree and wood analysis—Home*. Preuzeto 04. listopad 2024., od <https://www.rinntech.com/index-9671.php>

- Zang, C., i Biondi, F. (2015). Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38, 431–436.
<https://doi.org/10.1111/ecog.01335>
- Zang, C., Hartl-Meier, C., Dittmar, C., Rothe, A., i Menzel, A. (2014). Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: Climatic drivers and levels of variability. *Global Change Biology*, 20(12), 3767–3779.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12637>
- Zarzycki, K. (1984). *Ekologiczne liczby wskaźnikowe roślin naczyniowych polski*.
Polska Akademia Nauk - Instytut Botaniki.
- Zavod za Gozdove, O. (2023). *Letna poročila—Zavod za gozdove Slovenije*.
<https://www.zgs.si/informacije/publikacije/letna-porocila>