

KLIMATSKA OSJETLJIVOST KRONOLOGIJE CRNOGA BORA (*Pinus nigra* Arnold.) NA SJEVERNOM VELEBITU

CLIMATE SENSITIVITY OF BLACK PINE (*Pinus nigra* Arnold.) CHRONOLOGY IN THE NORTHERN VELEBIT

Boris MIKLIĆ¹⁺, Anja ŽMEGAČ², Domagoj TRLIN², Marko OREŠKOVIĆ², Stjepan MIKAC², Igor ANIĆ^{2,3}

SAŽETAK

Zabrinutost oko mogućih posljedica klimatskih promjena i njihovog utjecaja na Mediteransko područje ukazuje na potrebu boljeg razumijevanja varijabilnosti klime dugo u povijest, a posebice izvan razdoblja obuhvaćenih instrumentalnim mjerenjima. Kako bismo poboljšali prostornu i vremensku pokrivenost hrvatskog Sredozemlja klimatskim podacima te bolje razumjeli utjecaj klimatskih promjena na rasta stabala, provedena su prva dendrokronološka istraživanja na području Sjevernog Velebita. Rezultati istraživanja 274 godine stare kronologije crnoga bora ukazuju da je glavni limitirajući čimbenik rasta stabala crnoga bora nedostatak vlage u ljetnom razdoblju godine. Korelacije kronologije rasta stabala i količine ljetnih oborina od 1954. do 2015. godine su značajne i pozitivne ($R=0.60$, $p=0.0099$) te vremenski stabilne. Time se stvorila mogućnost rekonstrukcije klime relativno daleko u prošlost za područje sjeverozapadnih Dinarida.

KLJUČNE RIJEČI: crni bor, sjeverni Velebit, dendroklimatologija, dendrokronologija, klimatske promjene,

1. UVOD

1. INTRODUCTION

Hrvatsko Sredozemlje kao dio sjeverozapadnog Mediterana jedno je od najosjetljivijih područja na recentne promjene klime u kojemu se očekuju ozbiljne i dalekosežne posljedice na okoliš (IPCC 2014, Schröter i dr., 2005). Promjene klime na čitavom Sredozemlju su obilježene standardnim obrascem povećanja trenda temperature zraka i značajnim padom ukupne količine oborina (Ugarković i Kelava, 2003). Takvi uvjeti će u skorjoj budućnosti rezultirati povećavanjem učestalosti sušnih razdoblja (Gao i Giorgi, 2008) što će dovesti do povećane pojave šumskih požara (Moriondo i dr., 2006). Suše i požari predstavljaju glavnu prijetnju opstanku mediteranskih šuma i sveukupnoj biološkoj biora-

znolikosti, a štete nastale kao posljedica suša i požara su puno većih razmjera od zahvaćenih površina (EEA, Peñuelas i dr., 2017).

Predviđanje budućih scenarija klimatskih promjena za navedeno područje posebno je izazovno i to posebice zbog velike prostorne varijabilnosti klime, poglavito oborina, ali i složenih atmosferskih prilika (Dünkeloh i Jacobeit, 2003, Trouet i dr., 2012). Iako buduće projekcije predviđaju povećanje sušnih razdoblja i značajno toplije uvjete do kraja 21. stoljeća i do 20% u odnosu na danas (IPCC 2013) one sadrže veliku nesigurnost.

Zabrinutost oko mogućih posljedica promjena i njihovog utjecaja na Mediteransko područje ukazuje na potrebu boljeg razumijevanja klime dugo u povijest, a posebice izvan

¹ Dr. sc. Boris Miklić, Hrvatske šume d.o.o.

² Anja Žmegač, mag. ing. silv., Domagoj Trlin, mag. ing. silv., Marko Orešković, mag. ing. silv., doc. dr. sc. Stjepan Mikac, Akademik Igor Anić, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Svetošimunska cesta 25, HR-10000 Zagreb

³ Akademik Igor Anić, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti

+Corresponding author: email: boris.miklic@hrsume.hr

razdoblja obuhvaćenih instrumentalnim mjerenjima. Kako bismo poboljšali prostornu i vremensku pokrivenost hrvatskog Sredozemlja deficitarnim klimatskim podacima, potrebne su nam dugoročne serije istih. U tom pogledu kronologije rasta stabala predstavljaju jedan od najpouzdanijih izvora podataka o prošlim klimatskim uvjetima te pružaju mogućnosti za bolje razumijevanje prirodne varijabilnosti klime.

Intenzivna dendroklimatološka istraživanja već su provedena u zapadnom Sredozemlju (npr. Gutiérrez, 1989, Macias i dr., 2006, Esper i dr., 2010), istočnom Mediteranu (D'Arrigo i Cullen, 2001, Touchan i dr., 2005, Akkemik i dr., 2008) i sjevernoj Africi (Esper i dr., 2007), ali nedovoljno i nesustavno na području Republike Hrvatske.

Osim toga u posljednje vrijeme su značajno povećane istraživačke aktivnosti, posebno u razvoju višestoljetnih do tisućljetnih kronologija reliktnih borova (*Pinus heldraichii*) (Trouet i dr., 2012, Trouet, 2014, Seim i dr., 2012, Panayotov i dr., 2010, Levanič i dr., 2020) međutim pokazalo se da je klimatski signal zabilježen u širini godova ove vrste relativno slab (Seim i dr., 2012, Klippel i dr., 2017, Klesse i dr., 2015 te ovisan o lokalnim stanišnim prilikama (Klippel i dr., 2017. Klimatski signal zabilježen u godovima znatno se povećava pri mjerenju širine kasnog drva (proljetne oborine; Klesse i dr., 2015 ili maksimalne gustoće kasnog drva (ljetna temperatura; Seim i dr., 2012, Klesse i dr., 2015, a posebice uporabom ugljikovih i kisikovih izotopa (Levanič i dr., 2020).

Reliktne borove kao što su bor munika (*Pinus heldreichii*) i molika (*Pinus peuce*) unatoč svojoj starosti, koja u određenim slučajevima iznosi i više od 1000. godina, pokazuju relativno slab i nedovoljno jak signal u širini godova koji nije dostatan za kvalitetne rekonstrukcije (Levanič i dr., 2020). Iako se klimatski signal kod obje vrste može znatno poboljšati analizama stabilnih izotopa ugljika (^{13}C) i kisika (^{18}O) ili gustoćom kasnog drva (MXD), one zahtijevaju puno više napora u vremenskom i financijskom smislu.

Za razliku od navedenih vrsta borova, crni bor (*Pinus nigra* Arnold) pokazuje znatno jači klimatski signal kako u širinama godova tako i u širinama kasnog drva. Osim toga, na području prašumskih sastojina na nepristupačnim terenima doseže i do 500. godina starosti, što ga čini pogodnom vrstom za dendroklimatološka istraživanja (Poljanšek i dr., 2019, Poljanšek i dr., 2012). U ekološkom smislu crni bor na području Dinarida osjetljiv na sušni stres (Poljanšek i dr., 2013), visoke temperature zraka (Levanič i dr., 2015), intenzivne ljetne suše (Levanič i dr., 2013 i prirodne požare (Nagel i dr., 2017).

Dendroklimatološka istraživanja u Republici Hrvatskoj do sada nisu sustavno provedena, iako postoji značajan potencijal za kreiranje stoljetnih kronologija stabala. Dosadašnja istraživanja klimatske osjetljivosti crnoga bora na području Dinarida su rijetka i nesustavna, ali ukazuju na golemi po-

tencijal ovog područja za stvaranje dugih, klimatski osjetljivih kronologija za potrebe rekonstrukcije prošlim klimatskih uvjeta te rekonstrukcije dinamike prašumskih sastojina i prirodnih nepogoda čak i do 1000 godina unatrag.

Ciljevi ovoga istraživanja su:

- utvrditi klimatsku osjetljivost crnoga bora
- utvrditi pogodnost i mogućnost uporabe kronologije crnoga bora za rekonstrukcije klime na području hrvatskog Sredozemlja

2. MATERIJAL I METODE RADA

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Područje istraživanja – *Research area*

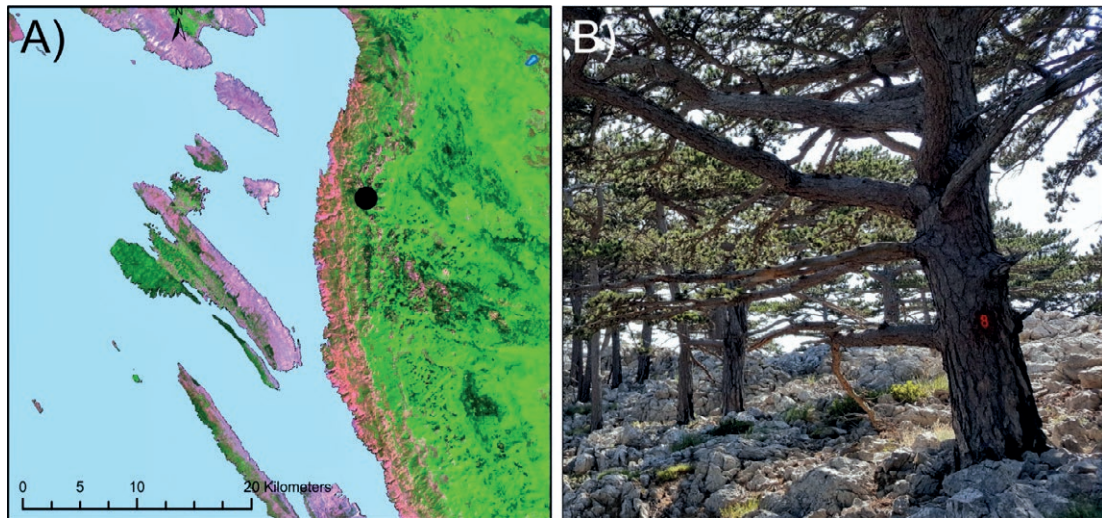
Istraživanje je provedeno na lokalitetu Borovi vrh smještenom istočno od Lukova na zapadnim obroncima Velebita (1084 m n. m.). Ovaj lokalitet predstavlja najrasprostranjeniji kompleks autohtonih sastojina crnog bora (*Pinus nigra* Arnold) na Sjevernom Velebitu. Istoimena sastojina nalazi se na području Nacionalnog parka Sjeverni Velebit i prostire se na oko 150 ha površine. Prema Aniću (1957) kompleks crnog bora na Borovom vrhu je bio mnogo veći u prošlosti o čemu svjedoče soliterna stabla i grupe stabala crnog bora u okolici. Područje Borovog vrha u prošlosti je više puta bilo zahvaćeno požarima (jedan od većih požara zabilježen je 1948. godine). Crni bor je na ovom lokalitetu izložen vrlo jakim udarima bure a razvija se na izraženo skeletoidnim tlima s dosta usitnjenog kamenja izmiješanog s tlom (Slika 1B).

2.2. Klimatske prilike – *Climate characteristics*

Lokalitet Borovi vrh se u klimatskom smislu nalazi na granici između područja s Cf klimom (tip C, podtip f – umjerenom toplom vlažnom klimom) i Cs klimom (tip C, podtip s – sredozemna klima). Samim svojim smjerom pružanja, duljinom i visinom predstavlja jasnu razdjelnicu kontinentalne i mediteranske regije. Uslijed dotoka vlažnih zračnih strujanja s morske strane ovo područje obilježeno je obilnim godišnjim količinama oborina (i do 2500–3000 mm) te niskim godišnjim temperaturnim prosjekom (4 – 6°C). Također, specifične su i temperaturne inverzije u depresijama koje potom uzrokuju dugo zadržavanje snijega (40 – 100 dana trajanje snježnog pokrivača većeg od 30 cm).

2.3. Prikupljanje i obrada uzoraka – *Data collection and sample preparation*

Uzorci za potrebe istraživanja analize prikupljeni su na mreži trajnih ploha koja se nalazi u Nacionalnoj mreži dendrokronoloških ploha u RH sa dominantnih stabala crnoga bora prsnog promjera na 1.30 m od razine tla u pravilu većeg od 30 cm. Uzorci su prikupljeni prema standardnoj



Slika 1. Geografski položaj (A) i izgled istraživane sastojine na lokalitetu Borovi vrh (foto: S. Mikac)
Figure 1. Geographical position (A) and view of the sample site on Borovi vrh (foto: S. Mikac)

metodologiji (Phipps, 1985) koristeći *Presslerovo* svrdlo za približno 1,30 m od razine tla. Na svakom stablu uzeta su dva izvrtka, pri čemu se pazilo da se uzorci uzimaju okomito na smjer pružanja padine kako bi se izbjegla pojava kompresijskog drva. Stabla sa tragovima antropogenog utjecaja u vidu ožiljaka od smolarenja nisu uzorkovana. Nakon prikupljanja, pripreme i sušenja izvrtaka pristupilo se standardnoj gruboj i finoj obradi uzoraka postepeno povećavajući granulacije brusnoga papira (krupnoće zrna od 120 - 600) (Stokes i Smiley, 1968).

2.4. Izmjera širine godova – *Tree ring width measurement*

Izmjera širina godova na uzorcima je napravljena pomoću programa CooRecorder v.9.3. (<http://www.cybis.se>) na snimljenim digitalnim fotografijama visoke rezolucije pomoću sustava ATRICS (Advanced Tree Ring Image Capturing System) sa automatiziranim mjernim stolom, lupom i digitalnom kamerom (Levanič, 2007). Očitane serije širina godova su unakrsno datirane kombinacijom vizualne i statističke metode koristeći program TSAP-Win™ (<http://www.rinntech.de>). Za statističku provjeru datiranja korišteni su pokazatelji kao što su: tBP (Baillie i Pilcher, 1973) i Gleichläufigkeit koeficijent (Eckstein i Bauch, 1969). Kontrola kvalitete datacije provedena je naknadno pomoću programa COFECHA (Holmes, 1983). Standardizacija, odnosno uklanjanje varijabilnosti frekvencije koja je posljedice ontogenetskog rasta stabala provedena je pomoću Spline metode (frekvencije odziva 0.50 i valne duljine 0.67 duljine svake individualne serije) koristeći paket “*dplr*” u R-u (Bunn, 2008). Standardizirane serije su uprosječene u jedinstvenu kronologiju (RWI) izračunatu pomoću *Tukey's biweight robust mean* (Mosteller i Tukey, 1977) kako bi se minimalizirao utjecaj ekstremnih vrijednosti. Na taj način

je napravljena rezidualna kronologija koja je korištena za korelacijske analize (RWI). Za statističku analizu kronologije korišteni su pokazatelji prosječne osjetljivosti (*MS*), prosječna korelacija između pojedinačnih serija (*Rbar*) te autokorelacija prvoga reda (*ACI*).

Za procjenu pouzdanosti kronologije korišten je izražen populacijski signal (EPS) (Wigley i dr., 1984) kako bi utvrdili prihvatljiv period kronologije za analize klime. Period sa vrijednosti EPS-a iznad 0,85 smatra se dovoljno točnim za rekonstrukciju klime (Briffa i Jones, 1990).

2.5. Klimatski podaci – *Climate data*

Klimatski podaci korišteni za korelacijske analize (mjesечne vrijednosti temperature zraka i oborina) preuzete su od državne hidrometeorološke postaje Zavižan za razdoblje od 1954.-2015. Izabrana meteorološka postaja nalazi se na visini od 1594 m te je udaljena od istraživanog područja 4 kilometara zračne udaljenosti. Za prostorne korelacije korišteni su umreženi podaci E-OBS20.0e.

2.6. Analiza podatka – *Data analysis*

Jednostavna linearna korelacijska analiza između klimatskih čimbenika i rezidualne indeksne kronologije (RWI) provedena je koristeći lokalne klimatske podatke za razdoblje od 1954 - 2015.godine dobivene s meteorološke postaje Zavižan. Korelacijski koeficijenti između mjesечnih vrijednosti temperature zraka i ukupne mjesечne količine oborina te rezidualnih kronologija izračunati su koristeći paket “*treeclim*” u R-u (Zang i Biondi, 2015) za razdoblje od 19 mjeseci (od lipnja prethodne godine do rujna tekuće godine). Vremenska stabilnost klimatskog signala analizirana je koristeći pomične korelacije duljine 30 godina s pomakom od 1 godine također koristeći paket “*treeclim*” u R-u (Zang i Biondi, 2015).

3. REZULTATI

3. RESULTS

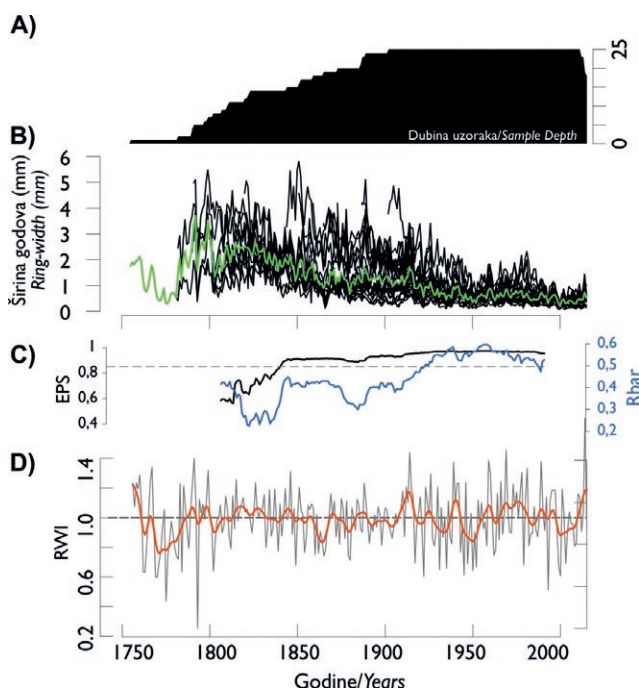
3.1. Kronologija širina godova crnoga bora – Tree rings width chronologies

Ukupno je prikupljeno i kvalitetno datirano 49 individualnih serija širina godova s ukupno 25 stabala crnoga bora (Slika 2). Maksimalno utvrđena duljina kronologije iznosi 274 godine. Prosječna širina godova iznosi 1,16 mm sa standardnim odstupanjem ± 0.843 mm.

Prosječna osjetljivost (MS) koja predstavlja varijaciju u širinama godova iz godine u godinu iznosi 0,25 što ukazuje da su serije širina godova osjetljive i stoga pogodne za korelacijsku analizu s klimatskim čimbenicima. Unutarserijska korelacija (korelacija između uzoraka s jednakih stabala) r_{bar} iznosi 0.704, prosječna korelacija uzoraka između različitih stabla $r_{bar.bt}$ iznosi 0.551. Izraženi populacijski signal (EPS) prikazuje za koje razdoblje kronologija sastavljena od limitiranog broja stabala točno predstavlja kronologiju teoretske populacije. Razdoblja kronologije s vrijednosti EPS-a iznad 0.85 se smatraju dovoljno adekvatne za rekonstrukciju klime (Cook i Kairiukstis, 1990). EPS iznad 0.85 je ostvaren u razdoblju 1816 - 2015. godine (Slika 2).

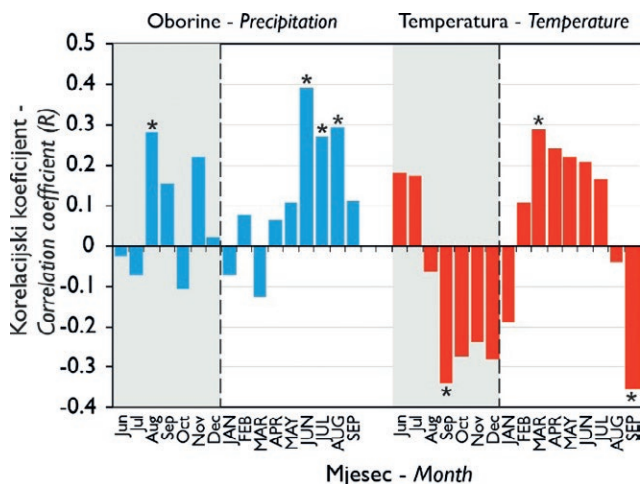
3.2. Analiza odnosa klime i rasta stabla – Analysis of the Climate-Growth Relationship

Rezultati korelacijskih analiza ukazuju na značajan ($P < 0.05$) pozitivan utjecaj oborina te značajan negativan utjecaj tem-



Slika 2. Dubina uzoraka (A), kronologija širina godova (B), vrijednosti EPS i unutar serijske korelacije (C) te rezidualna kronologija stabala (D).

Figure 2. Sample depth (A), tree rings width chronology (B), EPS and R_{bar} values (C) and residual chronology (D).



Slika 3. Rezultati jednostavnih korelacija kronologije crnoga bora s klimatskim čimbenicima

Figure 3. Results of simple correlation analysis of black pine chronology with climate factors

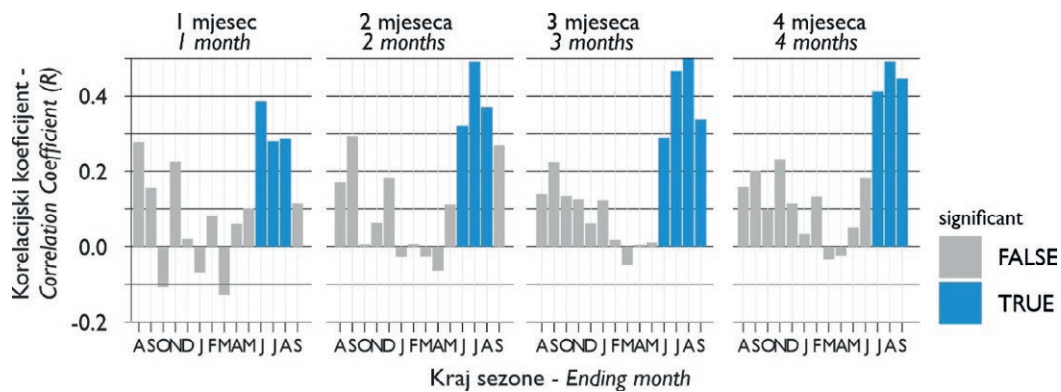
perature zraka na radijalni prirast borovih stabala. Značajne ($P < 0.05$) pozitivne korelacije između kronologije stabala crnoga bora i oborina utvrđene su za mjesec lipanj ($R = 0.39$), srpanj ($R = 0.27$) i kolovoz ($R = 0.30$) tekuće godine (Slika 3). Značajne negativne korelacije utvrđene su za prosječnu temperaturu zraka u rujnu prethodne godine ($R = -0.34$) te u rujnu tekuće godine nastanka goda ($R = -0.35$). Pozitivan utjecaj temperature zraka na radijalni rast stabala crnoga bora utvrđen je samo u ožujku tekuće godine ($R = 0.29$).

Sezonske korelacije predstavljaju prosjek klimatskih čimbenika za sezonu (prosječno 2, 3 i 4 mjeseca) a prikazane su na slici 4. Sezonske korelacije ukazuju na značajne i jak klimatski signal za ukupnu količinu oborina u razdoblju od lipnja - kolovoza (JJA) tekuće godine u iznosu ($R = 0.60$).

3.3. Vremenska stabilnost korelacije – Temporal stability of Climate-Growth Relationship

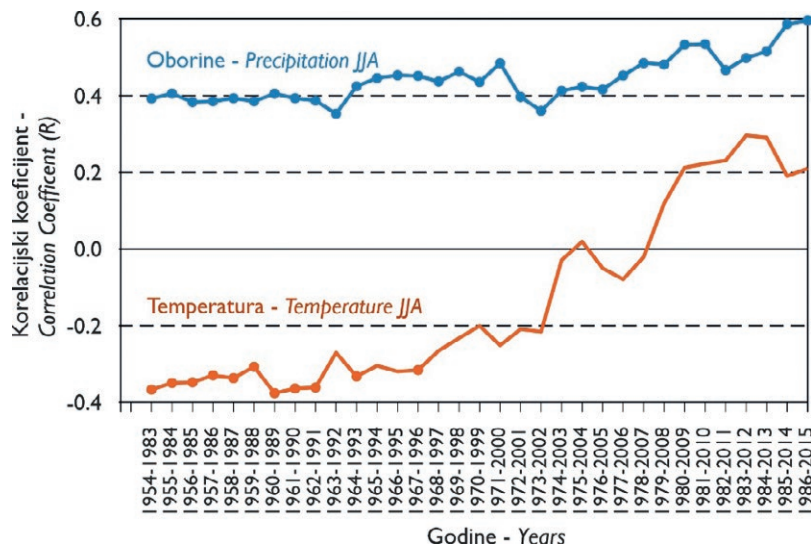
Za rekonstrukcije klime ključno je testirati vremensku stabilnost klimatskog signala tijekom razdoblja koje pokrivaju instrumentalna mjerenja. Na temelju analize korelacije (slika 4), ukupna količina oborina u ljeto (lipanj-kolovoz, JJA) odabrana je kao varijabla s najvećom korelacijom, odnosno s najvećim utjecajem na varijabilnost rasta stabala crnoga bora te je stoga korištena u testu vremenske stabilnosti (slika 5).

Vremenska stabilnost korelacije analizirana je koristeći pomičnu korelaciju za duljinu razdoblja od 30 godina s korakom od 1 godine (slika 5). Značajan pozitivan signal oborina u ljeto (JJA) utvrđen je tijekom cijelog promatranog razdoblja od 1954. – 2015. godine s blagim porastom od 2006. godine. Za razliku od oborina, temperaturni signal nakon 1996. značajno pada (Slika 5). Analizom klimatske



Slika 4. Rezultati sezonskih korelacija sa oborinama za duljine sezona 1, 2, 3 i 4 mjeseca. Oznake na x osi predstavljaju kraj mjeseca odnosno promatrane sezone. Statistički značajne korelacije označene su plavom bojom.

Figure 4. Seasonal correlation coefficients for precipitation with 1,2,3 and 4 month season length. Ending month for the season is on the x axis. Statistically significant correlations are marked blue.



Slika 5. Rezultati pomičnih korelacija za ukupnu količinu oborine od lipnja do kolovoza (JJA) te za prosječnu temperaturu zraka od lipnja do kolovoza za razdoblje od 1954. – 2015. godine.

Figure 5. Moving correlation for the precipitation total from June to August (JJA) and average air temperature from June to August (JJA) for the period 1954.-2015.

stabilnosti utjecaj oborina je potvrđen kao stabilan i relativno visok tijekom analiziranog razdoblja.

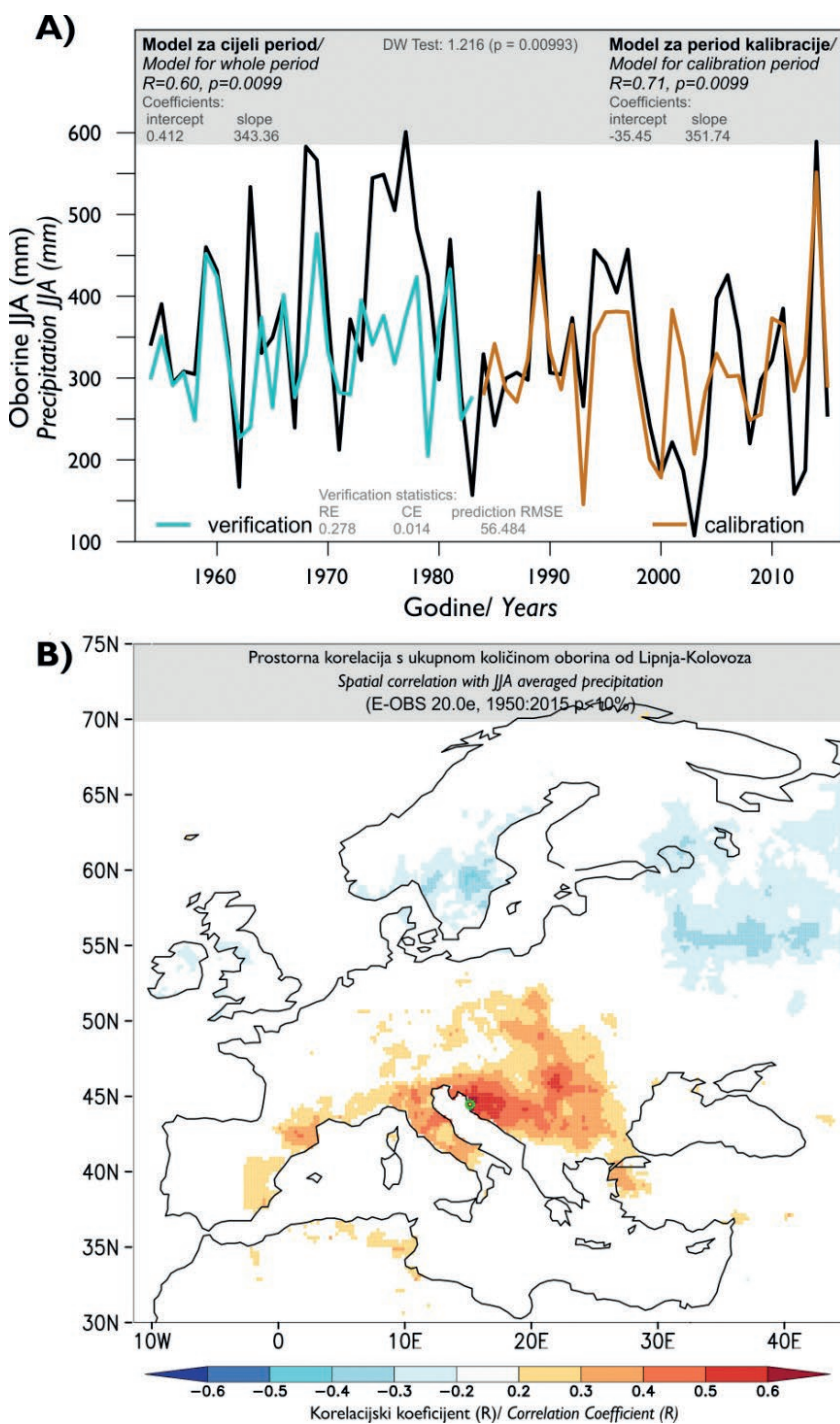
3.4. Prostorna korelacija – *Spatial correlation*

Analiza prostornih korelacija napravljena je za količinu oborina u ljeto (JJA) koja se pokazala kao najznačajnija i vremenski stabilna varijabla u korelaciji s kronologijom bora na istraživanom području. Pri tome su korišteni podaci iz baze E-OBS 20.0e. Analiza je pokazala značajnu korelaciju ($R > 0.5$) na širem području sjeverozapadnog dijela Dinarida (Slika 6B).

Model odnosa ljetnih oborina (JJA) i kronologije crnoga bora prikazana je na slici 6A. Ukupna korelacija između količine oborina u ljeto i kronologije bora iznosi 0.60, $p=0.0099$. U razdoblju od 1984. do 2015. godine koeficijent korelacije iznosi 0.71, $p=0.0099$.

4. RASPRAVA 4. DISCUSSION

Crni bor u ovom istraživanju pridolazi na gornjoj granici prirodnog rasprostiranja (epimediteran) na području sjevernoga Velebita, gdje se kao glavni limitirajući čimbenik rasta pokazala količina oborina, odnosno nedostatak vlage. Na to ukazuje značajna pozitivna korelacija kronologije rasta s oborinama u ljetu tekuće godine nastanka goda (od lipnja do kolovoza). Unatoč većim količinama oborina izmjerenih na obližnjoj meteorološkoj postaji Zavižan (prosječno oko 350 mm oborina u ljeto) očekivat bi bilo da oborinski signal nije toliko izražen, jer stabla imaju dovoljne količine oborina za rast. No ipak, ovako izražen klimatski signal se može objasniti lokalnim stanišnim prilikama poglavito propusnom geološkom podlogom i vrlo plitkim tлом visoke vodopropusnosti. Stoga veće količine oborina



Slika 6. Regresijski model ovisnosti količine oborina u ljeto (od lipnja do kolovoza) podijeljen na dva razdoblja (kalibracijsko i verifikacijsko) (A). Prostorna korelacija s umreženim podacima iz baze E-OBS20.0e (B).

Figure 6. Regression model of summer precipitation influence (June to August) divided into two periods (calibration and verification) (A). Spatial correlation with networked data from the E-OBS20.0e database (B).

u ljetnim mjesecima (od lipnja do kolovoza) kad je stablima najpotrebnije za rast, značajno pozitivno utječu na širinu godova istraživane populacije bora.

Tijekom promatranog razdoblja od 1954. – 2015. godine količina oborina u ljeto pokazuje trend pada. Do 1980. godine prosjek ljetnih oborina (od lipnja do kolovoza) iznosi 400 mm, a nakon 1980. godine 313 mm, što u relativnom omjeru iznosi oko 22% manje oborina. U istom razdoblju

ljetna temperatura zraka porasla je s 11.2 na 12.1 °C, čime su povećani suši uvjeti. Odgovor bora na suše uvjete se najbolje može predočiti analizom pomičnih korelacija pomoću kojih je utvrđeno povećanje osjetljivosti na oborine posebno nakon 1980. godine.

U većem dijelu mediteranske regije oborine su glavni čimbenik, čiji manjak ograničava rast stabala te je vjerojatna ciljna varijabla za rekonstrukcije hidroklimatskih uvjeta na

cijelom području Mediterana (Luterbacher i dr., 2006). Rezultati ovih istraživanja se podudaraju s drugim istraživanjima u regiji (Levanič i dr., 2013, Klesse i dr., 2015 i na području Mediterana (Martín-Benito i dr., 2008, Martín-Benito i dr., 2013, Lebourgeois i dr., 2012). Prema Levanič i dr. (2013) veće oborine u mjesecu srpnju značajno utječu na rast crnoga bora, dok povećanje temperature zraka i smanjenje oborina pospješuju vodni stres koji je pak najvjerojatniji uzrok pada trenda rasta borova na širem području Mediterana (Martín-Benito i dr. 2010).

Pojedina istraživanja utvrdila su da klimatski signal nije dovoljno snažan ako se promatra samo širina godova, već je on sadržan u gustoći (MXD), širini kasnog drva (Klesse i dr., 2015, Klippel i dr., 2017) ili izotopima (Levanič i dr., 2020). U istraživanju provedenom na dvije vrste reliktnih borova (*Pinus heldreichii* i *Pinus peuce*) na južnom Balkanu, Levanič i dr. (2020) pronašli su slab temperaturni signal i slab do nepostojeći oborinski signal sadržan u širini godova. U našem istraživanju, crni bor na lokalitetu Borovi vrh pokazuje jak signal u širini godova te time i potencijal za rekonstrukciju padalina za šire područje Mediterana.

Dobivenom duljinom kronologije od 274 godine otvorila se mogućnost rekonstrukcije klime relativno daleko u prošlost. Provjera klimatske stabilnosti potvrđeno je da količina oborina ima stabilan i relativno visok utjecaj tijekom analiziranog razdoblja te se može koristiti za rekonstrukcije klime. S obzirom na dobiveni jaki signal s oborinama, napravljene su i prostorne korelacije sa prostornim klimatskim podacima. Rezultati ove analize pokazuju da kronologija crnog bora značajno reflektira ljetne oborine na širem području sjeverozapadnog dijela Dinarida, što ukazuje na potencijal za buduće rekonstrukcije klime za geografsko područje veće od samog istraživanog lokaliteta.

Naše istraživanje crnog bora na lokalitetu Borovi vrh na sjevernom Velebitu čvrsto podupire mogućnost uporabe ove vrste za rekonstrukciju klime na području hrvatskog Sredozemlja, i šire, te upućuje na daljnja istraživanja drugih reliktnih populacija duž jadranske obale radi boljeg razumijevanja povijesnih klimatskih uvjeta toga područja.

5. ZAHVALA

5. ACKNOWLEDGEMENTS

Ovo istraživanje nastalo je kao rezultat primijenjenih istraživanja u sklopu projekta Mjere prilagodbe klimatskim promjenama za održivo upravljanje prirodnim resursima - "MEMORIE" financiranog iz Operativnog programa Konkurentnost i kohezija 2014. – 2020. godine, Shema za jačanje primijenjenih istraživanja za mjere prilagodbe klimatskim promjenama, (ref. oznaka: KK.05.1.1.02) kojega je sufinancirala Europska unija iz Europskog fonda za regionalni razvoj.

LITERATURA REFERENCES

- Akkemik, Ü., R. D'Arrigo, P. Cherubini, N. Köse, i G. Jacoby. 2008: Tree-Ring Reconstructions of Precipitation i Streamflow for North-Western Turkey. *International Journal of Climatology*, 28:173–183, <https://doi.org/10.1002/joc.1522>.
- Aniç, M. 1957: Crni bor u Sjevernom Velebitu. *Glasnik Za Šumske Pokuse*, (13):461–508.
- Baillie, M., i J. Pilcher. 1973: A simple cross-dating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bull*, 38:35–43.
- Briffa, K. R., i P. D. Jones. 1990: Basic chronology statistics and assessment; Pp. 137–152. In *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. E. R. Cook, i L. A. Kairiukstis, eds, Kluwer Academic Publishers.
- 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>.
- D'Arrigo, R., i H. Cullen. 2001: A 350-year (AD 1628–1980) reconstruction of Turkish precipitation. *Dendrochronologia*, 19:169–177.
- Dünkeloh, A., i J. Jacobeit. 2003: Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948–98. *International Journal of Climatology*, 23(15):1843–1866, <https://doi.org/10.1002/joc.973>.
- Eckstein, D., i J. Bauch. 1969: Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 88(1):230–250, <https://doi.org/10/dcq67m>.
- Esper, J., D. Frank, U. Büntgen, A. Verstege, J. Luterbacher, i E. Xoplaki. 2007: Long-term drought severity variations in Morocco. *Geophysical Research Letters*, 34(17) <https://doi.org/10.1029/2007GL030844>.
- Esper, J., D. Frank, G. Battipaglia, U. Büntgen, C. Holert, K. Treydte, R. Siegwolf, M. Saurer, i C. Esper. 2010: Low-frequency noise in d 13 C and d 18 O tree ring data: A case study of *Pinus uncinata* in the Spanish Pyrenees. *Global Biogeochemical Cycles*, 24.
- Gao, X., i F. Giorgi. 2008: Increased Aridity in the Mediterranean Region under Greenhouse Gas Forcing Estimated from High Resolution Simulations with a Regional Climate Model. *Global and Planetary Change*, 62:195–209, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.02.002>.
- Gutiérrez, E. 1989: Dendroclimatological study of *Pinus sylvestris* L. in Southern Catalonia (Spain). *Tree-Ring Research*, 49.
- Holmes, R. L. 1983: Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. .
- Klesse, S., M. Ziehmer, G. Rousakis, V. Trouet, i D. Frank. 2015: Synoptic drivers of 400 years of summer temperature and precipitation variability on Mt. Olympus, Greece. *Climate Dynamics*, 45(3):807–824, <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2313-3>.
- Klippel, L., P. Krusic, R. Brandes, C. Hartl, V. Trouet, M. Meko, i J. Esper. 2017: High-elevation inter-site differences in Mount Smolikas tree-ring width data. *Dendrochronologia*, 44 <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.05.006>.
- Lebourgeois, F., P. Mérian, F. Courdier, J. Ladiet, i P. Dreyfus. 2012: Instability of climate signal in tree-ring width in Mediterranean mountains: a multi-species analysis. *Trees*, 26(3):715–729, <https://doi.org/10/fj6md7>.

- Levanič, T. 2007: Atrics – A New System for Image Acquisition in Dendrochronology. *Tree-Ring Research*, 63(2):117–122, <https://doi.org/10/drtfwm>.
- Levanič, T., S. Poljanšek, i E. Toromani. 2015: Early summer temperatures reconstructed from black pine (*Pinus nigra* Arnold) tree-ring widths from Albania. *The Holocene*, 25(3):469–481, <https://doi.org/10.1177/0959683614561882>.
- Levanič, T., J. Jevšenak, i P. Hafner. 2020: Stable Isotopes Reveal Climate Signal Hidden in Tree Rings of Endemic Balkan Pines. *Atmosphere*, 11(2):135, <https://doi.org/10/gg2c4w>.
- Levanič, T., I. Popa, S. Poljanšek, i C. Nechita. 2013: A 323-year long reconstruction of drought for SW Romania based on black pine (*Pinus Nigra*) tree-ring widths. *International Journal of Biometeorology*, 57(5):703–714, <https://doi.org/10/ghg5t2>.
- Luterbacher, J., E. Xoplaki, C. Casty, H. Wanner, A. Pauling, M. Küttel, T. Rutishauser, S. Brönnimann, E. Fischer, D. Fleitmann, J. F. González Rouco, R. García-Herrera, M. Barriendos, F. Rodrigo, J. Gonzalez-Hidalgo, M. Saz, L. Gimeno, P. Ribera, M. Brunet, i E. Ladurie. 2006: Chapter 1 Mediterranean climate variability over the last centuries: A review; Pp. 27. In *Developments in Earth and Environmental Sciences*. Vol. 4. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80004-2).
- Macias, M., L. Andreu-Hayles, O. Bosch, J. Camarero, i E. Gutiérrez. 2006: Increasing Aridity is Enhancing Silver Fir *Abies Alba* Mill.) Water Stress in its South-Western Distribution Limit. *Climatic Change*, 79:289–313, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9071-0>.
- Martin-Benito, D., H. Beeckman, i I. Cañellas. 2013: Influence of drought on tree rings and tracheid features of *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a mesic Mediterranean forest. *European Journal of Forest Research*, 132(1):33–45, <https://doi.org/10/f4j3z2>.
- Martín-Benito, D., P. Cherubini, M. del Río, i I. Cañellas. 2008: Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. *Trees*, 22(3):363–373, <https://doi.org/10/ckg85r>.
- Moriondo, M., P. Good, R. Durão, M. Bindi, C. Giannakopoulos, i J. Corte-Real. 2006: Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Climate Research*, 31:85–95, <https://doi.org/10.3354/cr031085>.
- Mosteller, F., i J. W. Tukey. 1977: *Data Analysis and Regression: A Second Course in Statistics*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co, pp.
- Nagel, T. A., S. Mikac, M. Dolinar, M. Klopčič, S. Keren, M. Svoboda, J. Diaci, A. Boncina, i V. Paulic. 2017: The natural disturbance regime in forests of the Dinaric Mountains: A synthesis of evidence. *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT*, 388:29–42, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.047>.
- Panayotov, M., P. Bebi, V. Trouet, i S. Yurukov. 2010: Climate signals in *Pinus peuce* and *Pinus heldreichii* tree-ring chronologies from the Pirin Mountains in Bulgaria. *Trees - Structure and Function*, 24:479–490, <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0416-y>.
- Peñuelas, J., J. Sardans, I. Filella, M. Estiarte, J. Llusà, R. Ogaya, J. Carnicer, M. Bartrons, A. Rivas-Ubach, O. Grau, G. Peguero, O. Margalef, S. Pla-Rabés, C. Stefanescu, D. Asensio, C. Preece, L. Liu, A. Verger, A. Barbeta, A. Achotegui-Castells, A. Gargallo-Garriga, D. Sperllich, G. Farré-Armengol, M. Fernández-Martínez, D. Liu, C. Zhang, I. Urbina, M. Camino-Serrano, M. Vives-Inglà, B. D. Stocker, M. Balzarolo, R. Guerrieri, M. Peaucelle, S. Marañón-Jiménez, K. Bórnez-Mejías, Z. Mu, A. Descals, A. Castellanos, i J. Terradas. 2017: Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services. *Forests*, 8(12):463, <https://doi.org/10.3390/f8120463>.
- Phipps, R. L. 1985: *Collecting, Preparing, Crossdating, and Measuring Tree Increment Cores*. pp.
- Poljanšek, S., A. Ceglar, i T. Levanič. 2013: Long-term summer sunshine/moisture stress reconstruction from tree-ring widths from Bosnia and Herzegovina. *Climate of the Past*, 9(1):27–40, <https://doi.org/10.5194/cp-9-27-2013>.
- Poljanšek, S., D. Ballian, T. A. Nagel, i T. Levanič. 2012: A 435-Year-Long European Black Pine (*Pinus nigra*) Chronology for the Central-Western Balkan Region. *Tree-Ring Research*, 68(1):31–44, <https://doi.org/10.3959/2011-7.1>.
- Poljanšek, S., J. Jevsenak, J. Gricar, i T. Levanič. 2019: Seasonal radial growth of Black pine (*Pinus nigra* Arnold) from Bosnia and Herzegovina, monitored by the pinning method and manual band dendrometers. *Acta Silvae et Ligni*, 119:1–11, <https://doi.org/10.20315/ASetL.119.1>.
- Schröter, D., W. Cramer, R. Leemans, I. Prentice, M. Araújo, N. Arnell, A. Bondeau, H. Brugmann, T. R. Carter, C. Gracia, Vega-Leinert, M. Erhard, F. Ewert, M. Glendinning, J. House, S. Kankaanpää, R. J. T. Klein, S. Lavorel, M. Lindner, i B. Zierl. 2005: Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science* 310 (2005) 5752, 310.
- Seim, A., U. Büntgen, P. Fonti, H. Haska, F. Herzig, W. Tegel, V. Trouet, i K. Treydte. 2012: Climate sensitivity of a millennium-long pine chronology from Albania. *Climate Research*, 51:217–228, <https://doi.org/10.3354/cr01076>.
- Stokes, M. A., i T. L. Smiley. 1968: *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Chicago Press, 96 pp.
- Touchan, R., E. Xoplaki, G. Funkhouser, J. Luterbacher, M. Hughes, N. Erkan, Ü. Akkemik, i J. Stephan. 2005: Reconstructions of spring/summer precipitation for the Eastern Mediterranean from tree-ring widths and its connection to large-scale atmospheric circulation. *Biotechnology Letters*, 1–24, <https://doi.org/10.1007/s10529-005-0187-5>.
- Trouet, V. 2014: A Tree-Ring Based Late Summer Temperature Reconstruction (AD 1675–1980) for the Northeastern Mediterranean. *Radiocarbon*, 56(4):S69–S78, https://doi.org/10.2458/azu_rc.56.18323.
- Trouet, V., M. Panayotov, A. Verstege, i D. C. Frank. 2012: A tree-ring based reconstruction of Balkan temperatures back to Medieval Times reveals a robust pan-European summer teleconnection mode. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 21:PP21B-2020,.
- Ugarković, D., N. Kelava Ugarković, 2013: Changes and trends of climate elements and indices in the region of Mediterranean Croatia. *Journal of Central European Agriculture* 14 (1): 236–249. DOI: 10.5513/JCEA01/14.1.1189.
- Wigley, T. M. L., K. R. Briffa, i P. D. Jones. 1984: On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2):201–213, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2).
- Zang, C., i F. Biondi. 2015: treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4):431–436, <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>.
- 1990: *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences* (E. R. Cook, and L. A. Kairiukstis, eds). Springer Netherlands, pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>.

SUMMARY

Concerns for the possible consequences of climate change and their impact on the Mediterranean underline the need for a better understanding of climate variability throughout history, especially beyond the period covered with instrumental measurements. In order to improve the spatial and temporal coverage of the Croatian Mediterranean with climate data and to better understand the impact of climate change on tree growth, this first dendrochronological research was conducted in the area of Northern Velebit. Results of the 274-year-old black pine chronology studied here indicate the main limiting factor in the growth of black pine trees is lack of moisture in the summer period. The correlations between the chronology of tree growth and the amount of summer precipitation from 1954 to 2015 are significant and positive ($R = 0.60$, $p = 0.0099$) and stable over time, with the possibility of climate reconstruction relatively far into the past for the area of the northwestern Dinarides open.

KEY WORDS: black pine, northern Velebit, dendroclimatology, dendrochronology, climate change,