

POVEZANOST MORTALITETA OBIČNE JELE (*ABIES ALBA* MILL.) NA PODRUČJU FUŽINA S KLIMATSKIM I STRUKTURNIM PARAMETRIMA

RELATIONSHIP OF SILVER FIR (*Abies alba* Mill.) MORTALITY IN THE AREA OF FUŽINE WITH CLIMATIC AND STRUCTURAL PARAMETERS

Damir UGARKOVIĆ¹, Ivan SELETKOVIĆ², Ivica TIKVIĆ¹, Mladen OGNJENOVIC^{2*}, Krešimir POPIĆ³, Marko OREŠKOVIĆ¹, Nenad POTOČIĆ²

SAŽETAK

Obična jela najoštećenija je i najugroženija vrsta crnogoričnog drveća u Republici Hrvatskoj. Odumiranje stabala obične jele pripisuje se različitim uzročnicima, stoga je cilj ovog istraživanja bio utvrditi mortalitet stabala obične jele po broju stabala i volumenu za različite skupine uzroka mortaliteta, među kojima su najvažniji bili klimatski i strukturni parametri. Prikupljeni su i analizirani podaci o mortalitetu stabala obične jele u čistim jelovim sastojinama na području Fužina (Gorski kotar, Hrvatska) u razdoblju od dvadeset godina. Prema iznosu mortaliteta stabala iskazanom u broju stabala najveći mortalitet uzrokovan je kompleksnim odumiranjem stabala (0,75 N/ha) u gornjem sloju sastojine, a najmanji mortalitet uzrokuje prirodno izlučivanje potisnutih stabala (0,17 N/ha). S obzirom na drveni volumen najveći mortalitet uzrokovan je kompleksnim odumiranjem stabala (2,35 m³/ha), a najmanji prirodnim izlučivanjem (0,02 m³/ha). Nisu utvrđene velike razlike u vremenu odumiranja stabala prema različitim skupinama uzroka odumiranja. Klimatski uvjeti (suša, temperatura zraka, PET), strukturni elementi sastojine (prsni promjer, socijalni položaj, promjer i osvjetljenost krošnje te fiziološka zrelost), kao i nagib terena znatno utječu na mortalitet stabala obične jele.

KLJUČNE RIJEČI: suša, temperatura, oborina, vjetar, struktura sastojine

UVOD INTRODUCTION

Šume, koje obuhvaćaju oko trećine površine Europe, cijene su zbog svoje prirodности kao i raznih blagodati koje pružaju. Međutim, u Europi raste zabrinutost glede potraj-

nosti šumskih ekosustava, jer su mnoge usluge i funkcije šuma (zaštita voda, bioraznolikost, skladištenje ugljika) potencijalno ugrožene klimatskim promjenama (Bredemeier 2011). Pretpostavlja se da klimatske promjene znatno utječu na šumske ekosustave Europe (Askeyev i dr. 2005, Kellomaki 2005, IPCC 2007, 2013, de Vries i dr. 2014), iako

¹ Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zavod za ekologiju i uzgajanje šuma, Svetošimunska 25, HR-10002 Zagreb, Croatia, Izv. prof. dr. sc. Damir Ugarković, e-mail: dugarkovic@sumfak.unizg.hr, Prof. dr. sc. Ivica Tikvić, e-mail: ivica.tikvic@zg.htnet.hr, Marko Orešković, mag. ing. silv., e-mail: moreskov@sumfak.hr

² Hrvatski šumarski institut, Jastrebarsko, Zavod za ekologiju šuma, Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko Croatia, Dr. sc. Nenad Potočić, e-mail: nenadp@sumins.hr, Dr. sc. Ivan Seletković, e-mail: ivans@sumins.hr, Mladen Ognjenović, mag. ing. silv., email: mladeno@sumins.hr

³ Hrvatske šume d. o. o. Zagreb, Uprava šuma Podružnica Vinkovci, Šumarija Lipovac, M. Gupca 5, HR-32246 Lipovac, Hrvatska, Krešimir Popić, mag. ing. silv., e-mail: kresimir.popic@hrsume.hr

* korespondencija: Mladen Ognjenović, mladeno@sumins.hr

postoje velike nesigurnosti u vezi s njihovom jačinom i obilježjem, osobito na regionalnoj razini (Branković i dr. 2012). Naročite štete u šumskim ekosustavima mogu uzrokovati ekstremne pojave kao što su suša i vjetar (Zierl 2004, Diaci i dr. 2017, Fidej i dr. 2018), a značaj i razmjeri tog utjecaja nisu do kraja poznati. Stoga su potrebna mnogo detaljnija istraživanja koja se zasnivaju na odzivu pojedinih vrsta na okolišne promjene.

Na području jugoistočne Europe očekuje se sve jači intenzitet i dulje trajanje suša i toplinskih valova. U toj su regiji već učestale sušne pojave; nakon 2000. velike suše i toplinski valovi zabilježeni su 2002., 2003., 2007., 2008., 2011. i 2012. godine (EEA 2012). Trend smanjenja oborine i povećanja temperature već je zamijećen i u Hrvatskoj tijekom 20. stoljeća. Povećanje srednje godišnje temperature, koje je u Hrvatskoj iznosilo od +0,02 °C do +0,07 °C svakih 10 godina (Zaninović i Gajić-Čapka 2000), nastavilo se, čak i pojačalo s početkom 21. stoljeća. Studija trendova u godišnjim i sezonskim količinama oborine i pokazateljima ekstremnih oborina u Hrvatskoj (Gajić-Čapka i Cindrić 2011) pokazuje silazni trend godišnjih količina oborine od početka 20. stoljeća u cijeloj Hrvatskoj, što je u suglasju sa sušnim trendom zamijećenim na cijelom Mediteranu (Lionello i dr. 2006, Lionello 2012). Od 2001. do 2010. zabilježene su čak četiri suše, a samo 13 između 1961. i 2010. godine (Spinoni i dr. 2013). Očekuje se da će u Hrvatskoj biti još suše i vruće, s velikim posljedicama za šumski ekosustav, koje uključuju smanjenje vlažnosti tla, veću razinu evapotranspiracije itd. Taj akutni ali i kronični stres može voditi pojačanom odumiranju stabala (Breshears i dr. 2013, Eamus i dr. 2013, Ruehr i dr. 2014).

Odumiranje stabala prirodni je demografski proces u šumi, a mrtva i umiruća stabla dio su zdravog šumskog ekosustava (Franklin i dr. 2002). Stojeća i ležeća mrtva stabla podržavaju bioraznolikost, pružajući stanište različitim vrstama (Lindenmayer i Noss 2006). Međutim, povećanje mortaliteta može uvelike izmijeniti strukturu i funkcioniranje ekosustava, mogućnost održivog gospodarenja i prirodne obnove (Ugarković i dr. 2018) te utjecati na sposobnost šuma za pružanje usluga čovječanstvu (Anderegg i dr. 2012, Anderegg i dr. 2013, Blennow i dr. 2014). Posljedice povećanog mortaliteta uključuju smanjenje opskrbe drvom, pad kvalitete pitke vode (Seidl 2008) i smanjenje vremena pohrane ugljika u biomasi (Korner 2017, Mayer i dr. 2017). Stoga je mortalitet stabala ključan indikator zdravstvenog stanja šuma (Trumbore i dr. 2015, Millar i Stephenson 2015, Senf 2018).

Odumiranje stabala složen je proces koji uključuje negativno djelovanje niza abiotičkih, biotičkih i antropogenih čimbenika (Manion 1991, Manion i Lachance 1992, Caillet i dr. 2014). Proces odumiranja stabla traje desetljećima (Villalba i Veblen 1998, Linares i Tiscar 2010), a praćen je

smanjenim rastom i sušenjem grana te promjenom boje i povećanjem osutosti krošanja (Bauch 1986, Larsen, 1986, Innes 1993, Androić i Cestar 1975, Gruber 1994). Rezultat je tog procesa mrtvo stablo, odnosno stablo čije su fiziološke funkcije prestale raditi (Eckmüllner i Sterba 2000).

Obična jela ekološki je, gospodarski i tradicionalno najvažnija hrvatska četinjača, s oko 35 % udjela u drvnj zalihi četinjača (Prpić i Seletković 2001). Riječ je o najoštećenijoj crnogoričnoj vrsti šumskog drveća u Republici Hrvatskoj (Potočić i dr. 2017), kao i jednoj od najugroženijih vrsta šumskog drveća u Europi (Elling i dr. 2009). Prvi zapisi o propadanju šuma u nas i Europi vezani su upravo za propadanje obične jele. Obična jela u Europi odumire periodički još od oko 1500. godine (Meyer 1957, Krehan 1989). Prvo intenzivno sušenje obične jele u Hrvatskoj zabilježeno je 1900. godine kraj Ogulina (Šafar 1965). Batić (1930) izvješćuje o jakim napadima potkornjaka na jeli u Lici 1923., 1924. i 1929. godine, koje smatra sekundarnim štetnicima koji napadaju pretežno već sušom oslabljena stabla. Šafar (1969) piše o počecima propadanja jele potkraj tridesetih godina 20. stoljeća, pa i prije, u okolici Fužina. Kao uzroke smanjenja fiziološke sposobnosti i posljedičnog propadanja jele navodi povećanje omjera jele u odnosu na bukvu te jake sječe prije i poslije Drugog svjetskog rata koje su izmijenile mikroklimu važnu za uspijevanje higrofilne, termofobne i skiofitne jele. Isti autor (1951) u vezi s uzrokom propadanja jele na Kupjačkom vrhu ističe nedostatak vlage u zraku i tlu, što je posljedica jugozapadne ekspozicije i velike inklinacije, progallenosti sastojine i kamenitosti terena. Propadanje jele u Macelju Šafar (1965) pripisuje povećanom omjeru smjese u korist jele, kao i visokom starosti jelovih stabala, koja su stoga manje otporna na negativne utjecaje ekoloških čimbenika. Vajda (1954), Spaić (1968) te Androić i Klepac (1969) smatraju da se jela suši zbog pojave jelova moljca (*Argyresthia fundella* F.R.). Dotadašnje, često kontradiktorne stavove u vezi s uzrokom propadanja jelovih šuma sistematizirao je Brinar (1964) koji smatra da primarni uzročnik propadanja jele nije nijedan dotad poznat štetnik ili bolest.

Uzimajući u obzir ekološku i ekonomsku važnost jelovih šuma na području Dinarida za hrvatsko šumarstvo i gospodarstvo (Čavlović i dr. 2015), nalaže nam se potreba boljeg razumijevanja odumiranja obične jele u tim ekosustavima. Ciljevi ovog istraživanja stoga su bili:

- i) utvrditi mortalitet po brojnosti i volumenu za različite skupine uzroka (kompleksno odumiranje, vjetar, prirodno izlučivanje) tijekom dvadesetogodišnjeg razdoblja praćenja
- ii) ispitati utjecaj klimatskih i strukturnih elemenata na mortalitet, posebno za svaku skupinu uzroka odumiranja stabala obične jele.

MATERIJALI I METODE RADA MATERIALS AND METHODS

Istraživanja su provedena u gorskoj Hrvatskoj, u Gorskom kotaru, na području Šumarije Fužine, gospodarska jedinica Brloško, u šumskom ekosustavu obične jele s rebračom (*Blechno-Abietetum* Ht. 1950). Prema Köppenovoj klasifikaciji područje istraživanja ubraja se u tip klime Cfsbx (umjereno topla kišna klima bez sušnog razdoblja). Prosječna godišnja temperatura zraka za područje istraživanja iznosi 7,2 °C, a prosječne su količine oborine oko 2000 mm (Seletković 2001). Matični supstrat čine pješčenjaci različite starosti, a od tala dominiraju distrična smeđa tla i podzoli. Za analizu uzroka mortaliteta stabala te odnosa mortaliteta stabala prema klimatskim i strukturnim čimbenicima koristili smo se podacima s trajnih pokusnih ploha (tablica 1). Površina svake ploha iznosila je 0,66 ha. Rezultati su poslije preračunati u vrijednosti po hektaru.

Monitoring odumrlih stabala obavljan je od 1988. do 2007. (dvadeset uzastopnih godina). Svake godine tijekom kolovoza dva promatrača evidentirala su odumrla stabla obične jele prsnog promjera (d) većeg od 10 cm, izmjerila prsni promjer stabla (cm) te zabilježila pretpostavljene uzroke mortaliteta stabala. Za analizu odnosa klimatskih čimbenika i mortaliteta stabala koristili smo se podacima o temperaturi zraka i količini oborine u vegetacijskom razdoblju za meteorološku postaju Vrelo Ličanke, koja se nalazi u neposrednoj blizini trajnih pokusnih ploha. Potencijalna evapotranspiracija (mm) i vodna bilanca (mm) izračunate su prema metodi Thornthwaite (Šimunić 2016). Vodna bilanca računala se kao razlika količine oborine (mm) i potencijalne evapotranspiracije (mm). Sušne godine i sušne mjesece ustanovili smo metodom temperaturnih i oborinskih percentila u odnosu na referentni niz (Pandžić i dr. 2019). Klimatski elementi analizirani su za svaku godinu monitoringa od travnja do rujna. Socijalni položaj stabala na trajnim plohama svrstali smo u četiri skupine: 1 – dominantna, 2 – kodominantna, 3 – središnja, 4 – potisnuta (Crow i Hicks 1990). Duljine krošanja svrstali smo u klase: > 50 % visine stabla, između 25 i 50 % visine stabla i < 25 % duljine krošnje. Oblik krošnje podijelili smo u tri kategorije: 1 – simetrična krošnja, 2 – manje asimetrična krošnja te 3 – jako asimetrična krošnja (Stier-

lin i dr. 1994). Ultrazvučnim visinomjerom Vertex IV izmjerili smo duljinu osvijetljena dijela krošnje i izrazili je u postotku (%) u odnosu na ukupnu duljinu krošnje. Oblik vrha krošnje (rodino gnijezdo) svrstali smo u klase (0 – nema, 1 – malo, 2 – srednje i 3 – puno rodino gnijezdo). Na pokusnim plohama izmjerili smo prsne promjere i visine stabala te konstruirali lokalnu tarifu. Godišnji debljinski prirast izračunat je jednadžbom (Valerio 1997): $dp = (dbh07 - dbh88) / T$, pri čemu je dbh07 prsni promjer u 2007. godini, dbh88 prsni promjer istog stabla u 1988 godini, a T je broj godina.

Mortalitet je prikazan kao broj stabala po hektaru (N/ha) i volumen stabala po hektaru (m³/ha) (Siwecki i dr. 1998, Rouvinen i dr. 2002, Čater 2015). U fokusu našeg interesa bio je utjecaj ekstremnih klimatskih pojava na mortalitet jele, stoga smo uzroke mortaliteta podijelili u tri skupine: 1) kompleksni uzroci (100 % osuta krošnja, 100 % promjena boje krošnje uzrokovana abiotskim i/ili biotskim čimbenicima, npr. suša), 2) djelovanje vjetra (vjetrolom, vjetrotroizvala) i 3) prirodno izlučivanje. Stabla u nadstojnom sloju (dominantna, kodominantna, središnja) čije su se krošnje osule 100 % i/ili 100 % promijenile boju evidentirana su kao kompleksno odumiranje, dok su mrtva dubeća potisnuta stabla (Crow i Hicks 1990) dovedena u vezu s prirodnim izlučivanjem. Mortalitet stabala uzrokovan negativnim djelovanjem vjetra uključivao je vjetrolome i vjetrotroizvale. Drveće se smatralo mrtvim ako se stanje (osutost, promjena boje) krošnje nije poboljšalo tijekom dvije uzastopne godine promatranja (Čater 2015). Neparametarskim testom Kruskal-Walis ANOVA usporedili smo vrijednosti mortaliteta (N/ha i m³/ha) prema uzrocima. Trend vrijednosti mortaliteta stabala i trend maksimalnih i srednjih brzina vjetra testirani su linearnom regresijom. Neparametarskim Spearmanovim koeficijentom korelacije utvrdili smo povezanost između iznosa mortaliteta (m³/ha) za različite skupine uzroka mortaliteta te klimatskih i strukturnih čimbenika. Vrijeme odumiranja stabala prema uzrocima u dvadesetogodišnjem razdoblju monitoringa analizirano je prema Kaplan-Meierovoj metodi, a razlike su testirane testom Log-Rank (Kaplan i Meier 1958). Granica signifikantnosti za sve analize bila je $p < 0,05$. Obrada podataka provedena je u programu Statistica 7.1. (StatSoft, Inc. 2003).

Tablica 1. Reljefne i strukturne karakteristike trajnih pokusnih ploha. J – jug, JZ – jugozapad

Table 1 Relief and structural properties of research plots. J – south, JZ – south-west

Pokusna ploha <i>Research plot</i>	Nadmorska visina (m) <i>Altitude (m a.s.l.)</i>	Nagib (%) <i>Inclination (%)</i>	Ekspozicija <i>Exposition</i>	N/ha jela <i>N/ha silver fir</i>	V/ha jela <i>V/ha silver fir</i>	Bonitet <i>Site index</i>	Omjer jela: bukva (%) <i>Ratio fir: beech (%)</i>
A	810	12	J	81	439,3	II	92/8
B	840	32	J	148	367,2	II	95/5
C	790	23	JZ	112	377,1	II	93/7

REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM RESEARCH RESULTS WITH DISCUSSION

Na području istraživanja suša je prosječno trajala pola mjeseca godišnje, a u najsušnijoj godini čak su dva mjeseca bila sušna. Srednje vrijednosti temperature zraka za vegetacij-

Tablica 2. Deskriptivna statistika klimatskih i strukturnih elemenata te nagiba terena na području istraživanja

Table 2 Descriptive statistics of climatic and structural parameters and inclination data in the research area

Klimatski elementi <i>Climate parameters</i>	Srednja vrijednost <i>Mean</i>	Minimum – Maksimum <i>Minimum – Maximum</i>
Oborine (mm) <i>Precipitation (mm)</i>	848,58	579,50 – 1224,40
Temperatura zraka (°C) <i>Temperature, °C</i>	13,30	11,80 – 15,30
Vodna bilanca (mm) <i>Water balance, mm</i>	345,25	57,30 – 717,70
Potencijalna evapotranspiracija – PET (mm) <i>Potential evapotranspiration – PET, mm</i>	503,33	470,10 – 558,80
Suša (mjeseci) <i>Drought, months</i>	0,50	0,00 – 2,0
Maksimalna brzina vjetra (m/s) <i>Maximum wind speed, m/s</i>	15,12	9,30 – 22,50
Srednja brzina vjetra (m/s) <i>Average wind speed, m/s</i>	1,96	1,20 – 2,40
Strukturni elementi <i>Structural parameters</i>		
d _{1,30} (cm) DBH, cm	42,22	10,45 – 103,25
Debljinski prirast (cm) <i>Radial increment, cm</i>	0,30	0,01 – 1,10
Promjer krošnje (m) <i>Crown diameter, m</i>	3,62	1,40 – 6,30
Visina krošnje (%) <i>Crown height ratio, %</i>	61,04	11,40 – 67,00
Osvjetljenost krošnje (%) <i>Shading, %</i>	22,09	0,00 – 80,00
Nagib terena <i>Inclination</i>		
Nagib terena (%) <i>Inclination, %</i>	23,04	0,00 – 55,00

Podaci za klimatske elemente odnose se na vegetacijsko razdoblje (1. travnja – 30. rujna).

Climate data refer to the vegetation period (01 April – 30 September)

Tablica 3. Maksimalni godišnji iznosi mortaliteta stabala obične jele

Table 3 Maximum annual mortality rates of fir trees

Uzroci mortaliteta stabala <i>Tree mortality causes</i>	Maksimalni iznos mortaliteta <i>Maximum value of mortality</i>	
	N/ha	m ³ /ha
Skupina 1 <i>Group 1</i>	5,50	28,86
Skupina 2 <i>Group 2</i>	2,00	4,90
Skupina 3 <i>Group 3</i>	1,00	0,16

sko razdoblje od travnja do rujna imaju znatno veće značenje za razvoj vegetacije, nego srednje godišnje temperature zraka koje u pojedinim godinama u znatnoj mjeri ovise o temperaturi zraka zimi (tablica 2).

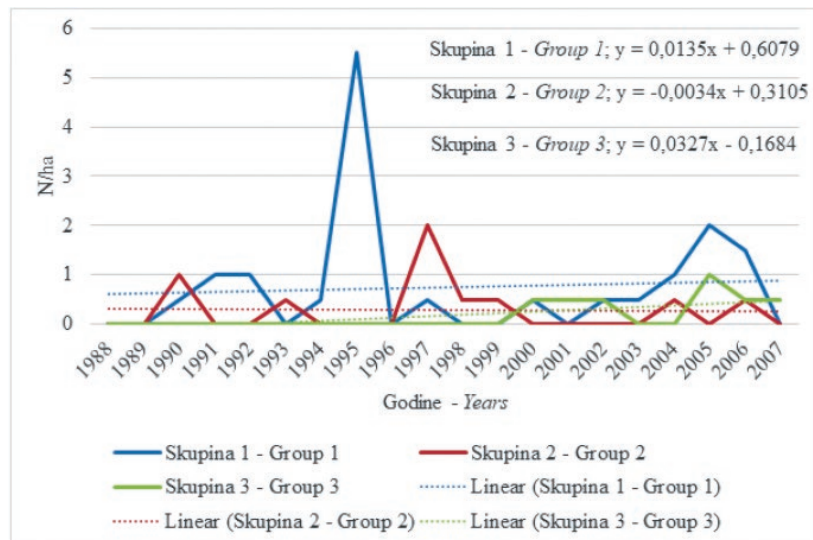
Maksimalni godišnji iznosi mortaliteta stabala obične jele prema različitim uzrocima mortaliteta u promatranom dvadesetogodišnjem razdoblju prikazani su u tablici 3.

Na slici 1 prikazana je dinamika mortaliteta stabala obične jele prema različitim skupinama uzročnika mortaliteta. Za skupinu 1 i 2 nije utvrđen signifikantan trend ($p = 0,788$), ali je ustanovljen trend povećanja broja mrtvih stabala za skupinu 3 uzroka mortaliteta ($b = 0,03$, $t = 3,71$, $p = 0,001$).

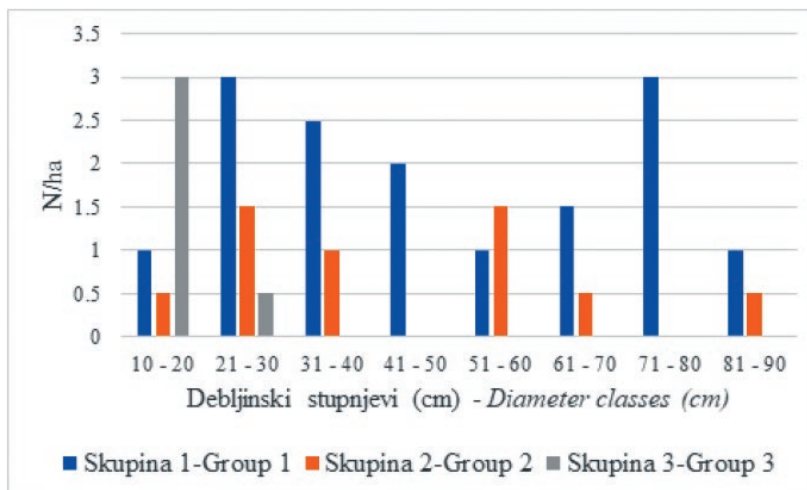
Prema analizi vremena odumiranja stabala i rezultatima testa Log-Rank nije utvrđena velika razlika u vremenu mortaliteta za stabla koja su odumrla zbog uzroka skupine 1 i stabla koja su stradala u vjetroolomima i vjetroizvalama, odnosno skupina 2 ($WW = -1,901$, $p = 0,435$). Također nije postojala statistički značajna razlika u vremenu odumiranja stabala za uzroke mortaliteta skupine 1 i skupine 3 (test Log-Rank $WW = -1,659$, $p = 0,410$). Rezultati analize vremena odumiranja za stabla stradala od uzroka skupine 2 i skupine 3 pokazuju da nema statistički značajne razlike u vremenu odumiranja (test Log-Rank $WW = 0,610$, $p = 0,733$).

U promatranom dvadesetogodišnjem razdoblju ukupan je mortalitet iznosio 24 N/ha stabala obične jele, odnosno 61,1 m³/ha, što je godišnje 1,2 N/ha stabala ili 3,05 m³/ha. Za skupinu uzroka 1 mortalitet stabala obične jele evidentiran je u svim debljinskim stupnjevima. Prema broju odumrlih stabala (N/ha) za skupinu uzroka 1 utvrđeno je najviše tri stabla po hektaru, i to u debljinskim stupnjevima 21 – 30 cm i 71 – 80 cm. Za skupinu uzroka 2 najveći iznos mortaliteta prema broju stabala zabilježen je u debljinskim stupnjevima 21 – 30 cm i 51 – 60 cm (1,5 N/ha). Za skupinu uzroka 3 najveći mortalitet prema broju stabala od 3 N/ha evidentiran je u debljinskom stupnju 10 – 20 cm (slika 2). S obzirom na volumen odumrlih stabala za skupinu uzroka 1 i 2 najveći iznosi utvrđeni su u većim debljinskim razredima, a za skupinu uzroka 3 mortalitet je zabilježen u samo prva dva debljinska stupnja (slika 3).

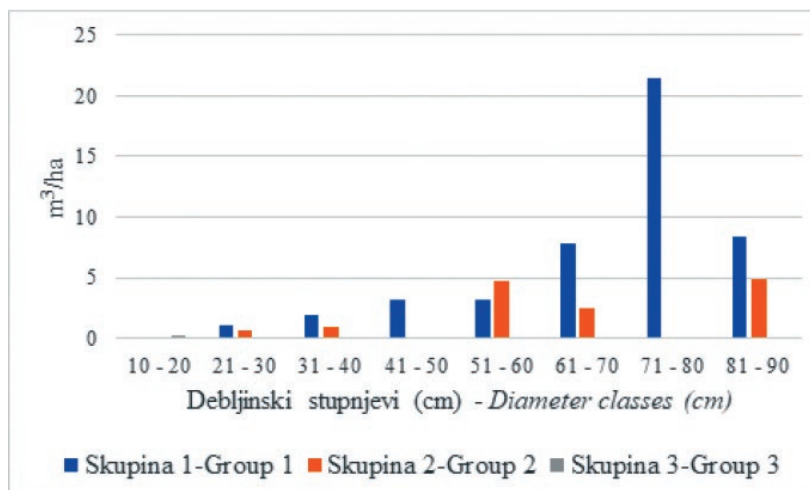
Prosječan iznos mortaliteta stabala za skupinu uzroka 1 prema broju stabala bio je 0,75 N/ha, za mortalitet uzrokovani skupinom uzroka 2 0,27 N/ha, a za skupinu uzroka 3 iznosio je 0,17 N/ha (slika 4). Nije utvrđena velika razlika između uzroka mortaliteta prema broju stabala po jedinici površine, iako je razlika bila na granici signifikantnosti ($p = 0,058$). Srednja vrijednost mortaliteta u skupini uzroka 1 iznosila je 2,35 m³/ha, za mortalitet u skupini uzroka 2 bila je 0,68 m³/ha (73% stabala vjetrolom, 27% vjetroizvala), a u skupini 3 samo 0,02 m³/ha. Utvrđena je velika razlika u volumnom iznosu mortaliteta ($p = 0,029$), i to između skupine uzroka 1 i 3, što je posljedica, kako manjeg broja mr-



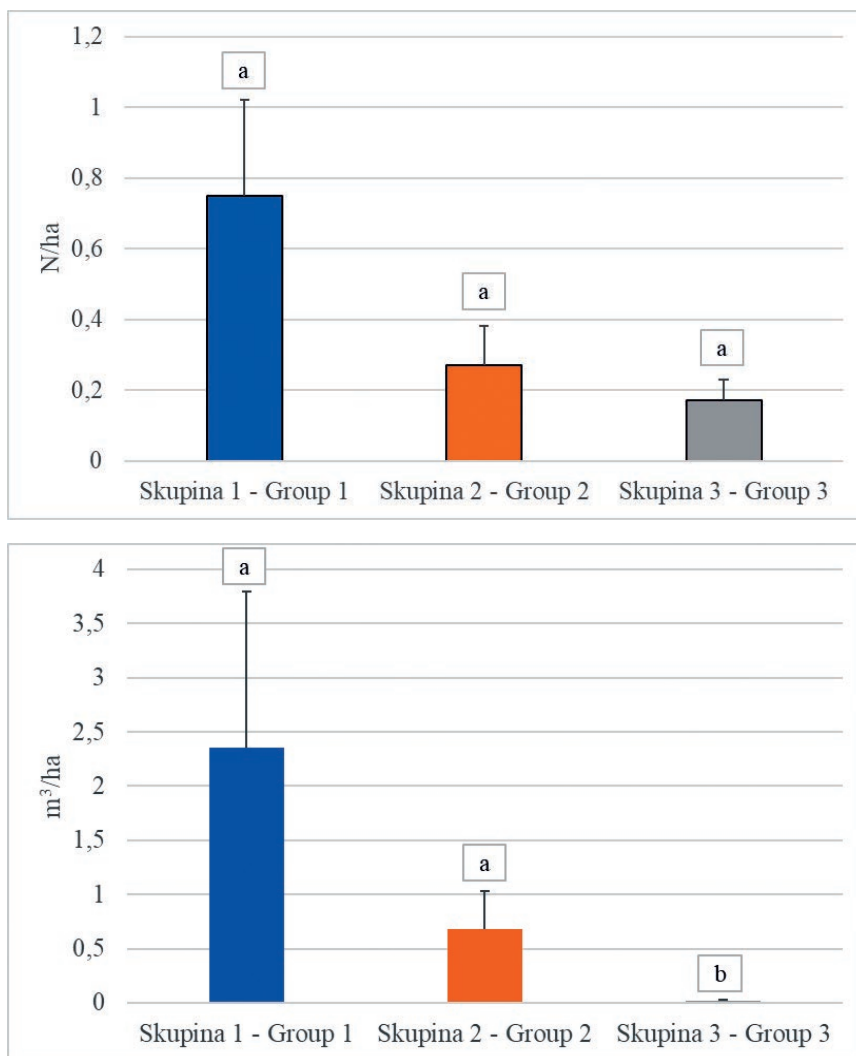
Slika 1. Dinamika odumiranja stabala obične jele (N/ha) prema različitim skupinama uzročnika odumiranja
Figure 1 Dynamics of silver fir dieback (N/ha) for various dieback causes groups



Slika 2. Mortalitet stabala obične jele (N/ha) prema skupinama uzroka po debljinskim stupnjevima
Figure 2 Mortality of silver fir trees (N/ha) for various dieback causes groups and DBH classes



Slika 3. Mortalitet stabala obične jele (m³/ha) prema skupinama uzroka po debljinskim stupnjevima
Figure 3 Mortality of silver fir trees, (m³/ha) for various dieback causes groups and DBH classes



Slika 4. Usporedba mortaliteta stabala obične jele (N/ha i m³/ha) prema uzrocima mortaliteta. Stupci predstavljaju srednju vrijednost ± standardna pogreška. Vrijednosti označene različitim slovima znatno se razlikuju, $p < 0,05$.

Figure 4 The comparison of silver fir trees mortality (N/ha and m³/ha) according to dieback causes group. Columns represent mean values ± standard error. Values denoted by different letters are significantly different.

tvih stabala u skupini 3 u odnosu na skupinu 1, tako i njihovog manjeg prosječnog volumena. Vjetar nije bio dominantan uzrok mortaliteta ni prema broju stabala ni prema volumenu (slika 4). Neka istraživanja upućuju na to da su raznodobne mješovite šume otpornije na nepogode (O'Hara i Ramage 2013). U našem istraživanju kompleksno odumiranje stabala obične jele (skupina 1) pokazao se kao dominantan uzrok odumiranja stabala, što ne iznenađuje s obzirom na broj štetnih čimbenika svrstanih u tu skupinu.

Na prostorno-vremensku dinamiku obične jele, među ostalim čimbenicima, utječu i srednja vrijednost oborina te srednja godišnja temperatura zraka (Ficko i dr. 2011). Promjenom jednog ili obaju klimatskih elemenata mijenjaju se i ekološki uvjeti za rast i uspijevanje obične jele. Prema dosadašnjim istraživanjima više se mijenja temperatura zraka nego oborine (Weber i dr. 1997, Ugarković i Tikvić 2011) i to je jedan od razloga što je u našem istraživanju tempera-

tura zraka znatnije utjecala na volumni iznos mortaliteta stabala (m³/ha).

Brojni autori u svojim istraživanjima zaključuju da je obična jela vrsta vrlo osjetljiva na klimatske stresove i da klima uvelike utječe na vitalnost jelovih šuma (Becker i dr. 1989, Macias i dr. 2006, Anić i dr. 2009, Elling i dr. 2009, Cailleret i dr. 2014, Čavlović i dr. 2015). Prema našim rezultatima na mortalitet stabala skupine uzroka 1 od klimatskih uvjeta najviše su utjecali povećanje temperature zraka i potencijalne evapotranspiracije u vegetacijskom razdoblju (tablica 4).

Nismo utvrdili velik utjecaj suše na mortalitet stabala u skupinama 1 i 3, no analizom tih dviju skupina zajedno ustanovili smo da suša znatno utječe ($r = 0,37^*$) na mortalitet obične jele na području Fužina. Veći iznos potencijalne evapotranspiracije pojačava vodni deficit, odnosno fiziološku sušu stabala, ali i ekološku sušu, tj. sušu u staništu. Stabla

Tablica 4. Spearmanova korelacija iznosa mortaliteta stabala obične jele te klimatskih elemenata i potencijalne evapotranspiracije

Table 4 Spearman correlation of silver fir mortality values with climatic parameters and PET

Sk 1 – kompleksno odumiranje / *dieback due to complex (multiple) causes*; Sk 2 – vjetar / *wind*; Sk 3 – prirodno izlučivanje / *dieback of suppressed trees*; O – oborina / *precipitation*; T – temperatura / *temperature*; PET – potencijalna evapotranspiracija / *potential evapotranspiration*; VB – vodna bilanca / *water balance*; maks. BV – maksimalna brzina vjetra / *maximum wind speed*; sred. BV – srednja brzina vjetra / *average wind speed*

* signifikantno na razini $p < 0,05$ / significant at $p < 0,05$

Iznos mortaliteta Amount of mortality	Klimatski elementi i PET – Climate elements and PET						
	O (mm)	T (°C)	PET (mm)	Suša (mjeseci) Drought (months)	VB (mm)	Maks. BV (m/s) Max. BV (m/s)	Sred. BV (m/s) Average BV (m/s)
Sk 1 (m ³ /ha)	0,28	0,50*	0,40*	0,42	-0,31	-0,28	-0,34
Sk 2 (m ³ /ha)	-0,65*	0,51	0,58	0,60	-0,33	0,65*	0,48
Sk 3 (m ³ /ha)	-0,41	0,86*	0,77*	0,22	-0,33	-0,40	-0,67

obične jele stradavala su ponajprije od fiziološke suše, pri čemu su najviše utjecale temperatura zraka i potencijalna evapotranspiracija (tablica 4). Poznato je da je obična jela vrlo osjetljiva na deficit vode (Pinto i Gegout 2005) i sušu (Becker i dr. 1989., Webster i dr. 1996), posebice u kombinaciji s visokim temperaturama zraka koje povećavaju evapotranspiraciju (Aussenac 2002).

Povećanjem srednjih godišnjih i vegetacijskih temperatura zraka te smanjenjem godišnjih i vegetacijskih količina oborina, statistički značajno povećava se količina odumrlog drvnog volumena stabala obične jele (Markalas, 1992., Thomas i dr. 2002., Tikvić i dr. 2008). U našem istraživanju nismo utvrdili da količina oborina uvelike utječe na mortalitet stabala uzrokovan skupinom uzroka 1, ali smo ustanovili znatan utjecaj količine oborina na mortalitet stabala uzrokovan skupinom uzroka 2. Naime, na statiku stabala, osim vjetra, od klimatskih elemenata djeluju i temperatura te količina oborina. Vlažnost tla utječe na učvršćivanje korijena. Vjetroizvale se pojavljuju kada uz olujni vjetar u visokim sastojinama dođe do zasićenja tla s vodom (Kamimura i dr. 2012). U predmetnom istraživanju iznos mortaliteta stabala (m³/ha) zbog nepovoljnog djelovanja vjetra pokazao je veliku korelaciju s količinama oborine. Oborine su važne jer uzrokuju nestabilnost strukture korijena, zbog čega je drveće osjetljivije na izvaljivanje korijena. Oborine u kombinaciji s olujom uzrokuju popuštanje tla i veći rizik od vjetroizvala drveća (Xi i dr. 2008, Csilléry i dr. 2017). U nedostatku oborina korijenje drveća uglavnom podnosi silu vjetra, a s povećanom brzinom vjetra stabla će puknuti duž debla (Peterson 2007). Međutim, oborine na području Gorskoga kotara vrlo su varijabilne i ne pokazuju značajan trend (Ugarković i Tikvić 2011). Ipak, u odnosu na oborinu, za mortalitet stabala u skupini 2 (utjecaj vjetra) najvažniji čimbenik bio je maksimalna brzina vjetra ($r = 0,65^*$). Smatra se kako će u Europi olujni vjetrovi biti najvažniji prirodni poremećaj s obzirom na gubitak drvnog volumena. Olujni vjetrovi uzrokovali su najmanje 53 % šumskih šteta u 19. i 20. stoljeću (Schelhaas i dr. 2003). Treba ipak napomenuti da su se maksimalne brzine vjetra ($b = 0,22$, $t = 2,45$, $p = 0,019$) i srednje brzine vjetra ($b =$

$0,04$, $t = 7,02$, $p = 0,000$) povećavale s godinama monitoringa, dok trend iznosa mortaliteta stabala zbog negativnog djelovanja vjetra nije bio statistički značajan ($b = 0,18$, $t = 1,00$, $p = 0,340$). Na području istraživanja trend brzine vjetra u skladu je s predviđanjima za područje središnje Europe (Fink i dr. 2009, Mölter i dr. 2016).

Što se tiče korelacija volumena mrtvih stabala (prema skupinama uzroka mortaliteta) sa strukturnim čimbenicima (tablica 5), korelacije za socijalni položaj stabla u sastojini, osvjetljenost krošnje te izgled rodina gnijezda / fiziološku zrelost za skupinu uzroka 3 nije bilo moguće izračunati zbog strukture podataka (sva stabla u skupini 3 su bila potisnuta stabla, imala su nultu vrijednost za osvjetljenost krošnje i rodino gnijezdo).

Tablica 5. Spearmanova korelacija iznosa mortaliteta stabala obične jele (m³/ha) te strukturnih čimbenika i nagiba terena. *signifikantno na razini $p < 0,05$ Table 5 Spearman correlation of silver fir mortality values with stand structural parameters and inclination. *significant at $p < 0,05$

Strukturni čimbenici / nagib terena Stand structural parameters	Iznos mortaliteta Mortality value		
	Skupina 1 Group 1 (m ³ /ha)	Skupina 2 Group 2 (m ³ /ha)	Skupina 3 Group 3 (m ³ /ha)
Prsni promjer, $d_{1,30}$ (cm) DBH, cm	0,99*	0,97*	0,95*
Debljinski prirast (cm) Radial increment, cm	0,35	0,33	0,19
Promjer krošnje (m) Crown diameter, m	0,72*	0,65*	0,56
Visina krošnje (%) Crown height ratio, %	-0,60*	-0,30	-0,64
Oblik krošnje Crown morphology	-0,20	-0,25	0,37
Socijalni položaj stabla Tree social position	-0,79*	-0,76*	---
Osvjetljenost krošnje (%) Crown shading, %	0,86*	0,78*	---
Rodino gnijezdo Stork's nest	0,84*	0,04	---
Nagib terena (%) Inclination, %	-0,51*	-0,63*	0,38

Volumni mortalitet stabala pozitivno je korelirao s prsnim promjerom u svim skupinama uzroka mortaliteta. Mortalitet za skupinu uzroka 1 pozitivno je korelirao i s rodnim gnijezdom ($r=0,84^*$), što uvjetno možemo nazvati i utjecajem starosti stabala. Na mortalitet stabala (m^3/ha) uzrokovan skupinom uzroka 2 također su uvelike utjecali promjer krošnje i osvjetljenost krošnje. Stabla većeg prsnog promjera sa širom krošnjom i većom osvjetljenošću krošnje ujedno su nadstojna stabla u sastojini koja su izložena negativnom djelovanju vjetra, nego stabla u donjim slojevima sastojine. Za skupinu uzroka 1 i 2 smanjenjem nagiba terena znatno se povećavao iznos mortaliteta stabala. Ti su rezultati u skladu s istraživanjima Markalas (1992), Tikvić i dr. (2008) te Ugarković i dr. (2011).

Obična jela skiofilna je vrsta drveća, ali ima ograničenja u podnošenju zasjenjenih uvjeta u sastojini. Stoga stabla u zasjenjenim uvjetima, odnosno potisnuta stabla (skupina uzroka 3) u sastojinama bez šumsko uzgojnih postupaka, mogu izdržati zasjenjene uvjete do nekoliko desetaka godina, odnosno do određene dimenzije prsnog promjera (Prpić i Seletković 2001).

ZAKLJUČCI CONCLUSIONS

Na mortalitet stabala, koji je rezultat sinergijskog djelovanja različitih nepovoljnih čimbenika, znatno su utjecali strukturni i klimatski elementi.

Od strukturnih elemenata sastojine na mortalitet su najviše djelovali prsni promjer stabala, socijalni položaj u sastojini, osvjetljenost krošnje, promjer krošnje te fiziološka zrelost stabala.

S obzirom na klimatske elemente u području istraživanja najveće su korelacije dobivene za temperaturu zraka, obovinu, potencijalnu evapotranspiraciju, trajanje suše i brzinu vjetra. Na mortalitet od vjetra u nadstojnom sloju znatno su utjecali samo oborina i brzina vjetra. Ostali uzroci mortaliteta u nadstojnom sloju sastojine, kao i mortalitet zbog prirodnog izlučenja potisnutih stabala pripisuju se zajedničkim klimatskim parametrima: temperaturom zraka, potencijalnom evapotranspiracijom, kao i trajanjem suše. Pritom je važno što, suprotno očekivanju, klimatski uvjeti više utječu na potisnuta nego na nadstojna stabla. To nam pokazuje da u procesu prirodnog izlučenja stabala klimatske promjene mogu imati važnu ulogu.

ZAHVALA ACKNOWLEDGEMENT

Zahvaljujemo rukovoditelju i djelatniku odjela za ekologiju Uprave šuma podružnica Delnice mr. sc. Željku Kauzlariću na ustupljenim podacima o odumrlim stablima obične jele.

LITERATURA REFERENCES

- Anderegg, W. R. L., L. D. L. Anderegg, C. Sherman, D. S. Karp, 2012: Effects of Widespread Drought-Induced Aspen Mortality on Understory Plants, *Conserv. Biol.*, (26/6): 1082.–1090.
- Anderegg, W. R. L., J. M. Kane, L. D. L. Anderegg, 2013: Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress, *Nat. Clim. Chang.*, (3): 30.–36.
- Androić, A., D. Klepac, 1969: Problem sušenja jele u Gorskom kotaru, Lici i Sloveniji, *Sumar. List*, (1-2): 1.–12.
- Androić, M., D. Cestar, 1975: Problematika istraživanja, Istraživanje uzroka i posljedica sušenja prirodnih jelovih šuma u SR Hrvatskoj, *Radovi* 23, 11.–16.
- Anić, I., J. Vukelić, S. Mikac, D. Bakšić, D. Ugarković, 2009: Utjecaj globalnih klimatskih promjena na ekološku nišu obične jele (*Abies alba* Mill.) u Hrvatskoj, *Sumar. List*, (3-4) 135.–144.
- Askeyev, O. V., D. Tischin, T. H. Sparks, I. V. Askeyev, 2005: The effect of climate on the phenology, acorn crop and radial increment of pedunculate oak (*Quercus robur*) in the middle Volga region, Tatarstan, Russia, *Int. J. of Biometeorol.*, (49) 262.–266.
- Aussenac, G., 2002: Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change, *Ann. For. Sci.*, (59) 823.–832.
- Batić, J., 1930: Sušenje jelovih i smrekovih šuma u Lici, *Sumar. List*, LIV. 345.–347.
- Bauch, J., 1986: Verfärbungen von Rund-und Schmittholz und Möglichkeiten für vorbeugende Schutzmaßnahmen, *Holz-Zbl.*, (112) 2217.–2218.
- Becker, M., G. Landman, G. Levy, 1989: Silver fir decline in the Vosges mountains (France): role of climate and silviculture, *Water Air Soil Pollut.*, (48) 77.–86.
- Blennow, K., J. Persson, A. Wallin, N. Vareman, E. Persson, 2014: Understanding risk in forest ecosystem services: Implications for effective risk management, communication and planning, *Forestry*, (87) 219.–228.
- Branković, Č., M. Patarčić, I. Güttler, L. Srnc, 2012: Near-future climate change over Europe and Croatia in an ensemble of regional climate model simulations, *Clim. Res.*, (52/1) 227.–251.
- Bredemeier, M., 2011: Forest Management and the Water Cycle: An Ecosystem-Based Approach, *Ecological studies* (3-4) Ur. Bredemeier, M., S. Cohen, D. L. Godbold, E. Lode, V. Pichler, P. Schleppei, Springer Netherlands. Dordrecht.
- Breshears, D. D., H. D. Adams, D. Eamus, N. G. McDowell, D. J. Law, R. E. Will, A. P. Williams, C. B. Zou, 2013: The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off, *Front. Plant Sci.*, (4) 266.
- Brinar, M., 1964: Življenska kriza jelke na slovenskom ozemlju v svezi s klimatičnim fluktuacijama, *Gozdarski vestnik*. 97.–111.
- Cailleret, M., M. Nourtier, A. Amm, M. Durand-Gillmann, H. Davi, 2014: Drought-induced decline and mortality of silver fir differ among three sites in Southern France, *Ann. For. Sci.*, (71) 643.–657.
- Crow, G. R., R. R. Hicks, 1990: Predicting mortality in mixed oak stands following spring insect defoliation, *For. Sci.*, (36) 831.–841.
- Csilléry, K., G. Kunstler, B. Courbaud, D. Allard, P. Lassègues, K. Haslinger, B. Gardiner, 2017: Coupled effects of wind-storms

- and drought on tree mortality across 115 forest stands from the Western Alps and the Jura mountains, *Glob. Chang. Biol.*, (23) 5092.–5107.
- Čater, M., 2015: A 20-year overview of *Quercus robur* L. mortality and crown conditions in Slovenia, *Forests*, (6) 581.–593.
 - Čavlović, J., A. Bončina, M. Božić, E. Goršić, T. Simončič, K. Teslak, 2015: Depression and growth recovery of silver fir in uneven-aged Dinaric forests in Croatia from 1901 to 2001, *Forestry*, (88) 586.–598.
 - de Vries, W., M. H. Dobbertin, S. Solberg, H. F. van Dobben, M. Schaub, 2014: Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystems in Europe: an overview, *Plant Soil* (380) 1.–45.
 - Diaci, J., D. Rozenberger, G. Fidej, T. A. Nagel, 2017: Challenges for uneven-aged silviculture in restoration of post-disturbance forests in Central Europe: a synthesis, *Forests*, (8) 378.–398.
 - Eamus, D., N. Boulain, J. Cleverly, D. D. Breshears, 2013: Global change-type drought-induced tree mortality: vapor pressure deficit is more important than temperature per se in causing decline in tree health, *Ecol. Evol.*, (3) 2711.–2729.
 - Eckmüllner, O., H. Sterba, 2000: Crown condition, needle mass and sapwood area relationships of Norway spruce (*Picea abies* Karst.), *Can. J. For. Res.*, (30) 1646.–1654.
 - EEA. 2012: Water scarcity and drought events in Europe during the last decade.
 - Elling, W., C. Dittmar, K. Pfaffelmoser, T. Rötzer, 2009: Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany, *For. Ecol. Manag.*, (257) 1175.–1187.
 - Ficko, A., A. Poljanec, A. Bončina, 2011: Do changes in spatial distribution, structure and abundance of silver fir (*Abies alba* Mill) indicate its decline?, *For. Ecol. Manag.*, (261) 844.–854.
 - Fidej, G., A. Rozman, J. Diaci, 2018: Drivers of regeneration dynamics following salvage logging and different silvicultural treatments in windthrow areas in Slovenia, *For. Ecol. Manag.*, (409) 378.–389.
 - Fink, A. H., T. Brücher, V. Ermert, A. Krüger, J. G. Pinto, 2009: The European storm Kyrill in January 2007: Synoptic evolution, meteorological impacts and some considerations with respect to climate change, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, (9) 405.–423.
 - FOREST EUROPE, U. a. F. 2011: *State of Europe's Forests 2011. Status and Trends in Sustainable Forest Management in Europe*.
 - Franklin, J. F., A. T. Spies, R. Van Pelt, B. A. Carey, D. A. Thornburgh, D. R. Berg, D. B. Lindenmayer, M. E. Harmon, W. S. Keeton, D. C. Shaw, K. Bible, J. Chen, 2002: Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example, *For. Ecol. Manag.*, (155) 399.–423.
 - Gajić-Čapka, M., K. Cindrić, 2011: Secular trends in indices of precipitation extremes in Croatia, 1901–2008., *Geofizika*, (28) 293.–312.
 - Gruber, F., 1994: Morphology of coniferous trees: possible effects of soil acidification on the morphology of Norway spruce and silver fir, *Effects of Acid Rain on Forest Processes*, 265.–324.
 - Innes, J., 1993: *Forest health. Its assessment and status*. CAB International., 677 str.
 - IPCC. 2007: *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change*. Cambridge, UK.
 - IPCC. 2013: Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Ur. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, Y. Nauels, V. B. Xia, P. M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge i New York.
 - Kamimura, K., K. Kitagawa, S. Saito, H. Mizunaga, 2012: Root anchorage of hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc. Endl.)) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analyses based on tee-pulling experiments, *Eur. J. For. Res.*, (131) 219.–227.
 - Kaplan, E. L., P. Meier, 1958: Nonparametric estimation from incomplete observations, *J. Am. Stat. Assoc.*, (53) 457.–481.
 - Korner, C., 2017: A matter of tree longevity, *Science*, (355) 130.–131.
 - Krehan, H., 1989: Das Tannensterben in Europa. Eine Literaturstudie mit kritischer Stellungnahme. FBVA Berichte. 39.
 - Larsen, J. B., 1986: Das Tannensterben: Eine neue Hypothese zur Klärung des Hintergrundes dieser rätselhaften Komplexkrankheit der Weisstanne (*Abies alba* Mill.). *Forstwiss. Cbl.*, (105/5) 381.–396.
 - Linares, J. C., P. A. Tiscar, 2010: Climate change impacts and vulnerability of the southern populations of *Pinus nigra* subsp. *Salzmannii*, *Tree Physiol.*, (30) 795.–806.
 - Lindenmayer, D. B., R. F. Noss, 2006: Salvage logging, ecosystem processes, and biodiversity conservation, *Conserv. Biol.*, (20) 949.–958.
 - Lionello, P., P. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo, P. Alpert, V. Artale, L. Li, J. Luterbacher, R. May, R. Trigo, M. Tsimplis, U. Ulbrich, E. Xoplaki, 2006: The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues, *Environ. Earth Sci.*, 1.–26.
 - Macías, M., L. Andreu, O. Bosch, J. J. Camarero, E. Guitiérrez, 2006: Increasing aridity is enhancing fir (*Abies alba* Mill.) water stress in its south-western distribution limit, *Clim. Change*, (76) 289.–313.
 - Manion, P. D. 1991. *Tree Disease Concepts*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.
 - Manion, P. D., D. Lachance, 1992: *Forest decline concepts*, APS Press, St. Paul.
 - Markalas, S., 1992: Site and stand factors related to mortality rate in a fir forest after a combined incidence of drought and insect attack, *For. Ecol. Manag.*, (47/1-4) 367.–374.
 - Mayer, M. i dr., 2017: Increase in heterotrophic soil respiration by temperature drives decline in soil organic carbon stocks after forest windthrow in a mountainous ecosystem, *Funct. Ecol.*, (31) 1163.–1172.
 - Millar, C. I., N. L. Stephenson, 2015: Temperate forest health in an era of emerging mega disturbances, *Science*, (349) 823.–826.
 - Mölter, T., D. Schindler, A. T. Albrecht, U. Kohnle, 2016: Review on the projections of future storminess over the North Atlantic European region, *Atmosphere* (7) 60.
 - O'Hara, K. L., B. S. Ramage, 2013: Silviculture in an uncertain world: utilizing multi-aged management systems to integrate disturbance, *Forestry*, (86) 401.–410.
 - Pandžić, K., T. Lisko, T. Lesar, 2019: Climate monitoring and assessment for 2018., *Reviews* (30) 63. str.

- Peterson, C. J., 2007: Consistent influence of tree diameter and species on damage in nine eastern North America tornado blowdowns, *For. Ecol. Manag.*, (250) 96.–108.
- Pinto, P. E., J. C. Gegout, 2005: Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains, *Ann. For. Sci.*, (62) 761.–770.
- Potočić, N., I. Seletković, T. Jakovljević, H. Marjanović, K. Indir, J. Medak, M. Ognjenović, N. Zorić, M. Anić, A. Kaliger, 2017: Oštećenost šumskih ekosustava Republike Hrvatske, Izvješće za 2017. godinu. Hrvatski šumarski institut, ICP Forests., 88 str.
- Prpić, B., Z. Seletković, 2001: Ekološka konstitucija obične jele, Obična jela u Hrvatskoj, Ur. Prpić, B., 255.–276. Akademija šumarskih znanosti i Hrvatske šume, p.o., Zagreb. Zagreb.
- Rouvinen, S., T. Kuuluvainen, R. Siitonen, 2002: Tree mortality in a *Pinus sylvestris* dominated boreal forest landscape in Vienansalo Wilderness, Eastern Fennoscandia, *Silva Fenn.*, (36/1) 127.–145.
- Ruehr, N. K., B. E. Law, D. Quandt, M. Williams, 2014: Effects of heat and drought on carbon and water dynamics in a regenerating semi-arid pine forest: a combined experimental and modeling approach, *Biogeosciences*, (11) 4139.–4156.
- Schelhaas, M. J., G. J. Nabuurs, A. Schuck, 2003: Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries, *Glob. Change Biol.* (9) 1620.–1633.
- Seidl, R., W. Rammer, D. Jager, M. J. Lexer, 2008: Impact of bark beetle (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different management strategies under climate change, *For. Ecol. Manag.*, (256) 209.–220.
- Seletković, Z., 2001: Klima i hidrološke prilike u dinarskim jelovim šumama u Hrvatskoj. Obična jela (*Abies alba* Mill.) u Hrvatskoj, Ur. Prpić, B., 133.–144. Akademija šumarskih znanosti i Hrvatske šume, p.o., Zagreb. Zagreb.
- Senf, C. i dr. 2018: Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades, *Nat. Commun.* (9) 4978. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07539-6>
- Siwecki, R., K. Ufnalski, 1998: Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland, *Eur. J. For. Pathol.*, (28) 99.–112.
- Spaić, I., 1968. Neka ekološka opažanja i rezultati suzbijanja moljca jelinih iglica (*Argyresthia fundella* F. R.), *Sumar. List*, (92/5-6) 165.–188.
- Spinoni, J., T. Antofie, P. Barbosa, Z. Bihari, M. Lakatos, S. Szalai, T. Szentimrey, J. Vogt, 2013: An overview of drought events in the Carpathian Region in 1961–2010., *Adv. Sci. Res.*, (10) 21.–32.
- StatSoft, Inc. 2003: STATISTICA for Windows. Tulsa: StatSoft, Inc.
- Stierlin, H. R., U. B. Brändli, A. Herold, J. Zinggeler, 1994: Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 1993-1995. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.
- Šafar, J., 1965: Problem sušenja jele i način gospodarenja na Macelj gori, *Sumar. List*, (89/1-2) 1.–16.
- Šafar, J., 1969: Prilozi rješavanju problema o održavanju i podmlađivanju jele na području Gorskog kotara, *Sumar. List* (1-2) 26.–36.
- Šimunić, I., 2016: Regulation and Protection of Water. Croatian University Press – University of Zagreb Faculty of Agriculture. 165 str. Zagreb.
- Thomas, L. A., C. J. Gegout, G. Landmann, E. Dambrine, D. King, 2002: Relation between ecological conditions and fir decline in a sandstone region of the Vosges mountains (northeastern France), *Ann. For. Sci.*, (59) 265.–273.
- Tikvić, I., Z. Seletković, D. Ugarković, S. Posavec, Ž. Španjol, 2008: Dieback of Silver Fir (*Abies alba* Mill.) on Northern Velebit (Croatia), *Period. Biol.*, (110/2) 137.–143.
- Trumbore, S., P. Brando, H. Hartmann, 2015: Forest health and global change, *Science*, (349) 814.–818.
- Ugarković, D., I. Tikvić, 2011: Variation of climate in the region of Gorski kotar, *Glas. Šum. Pokuse*, (44) 55.–64.
- Ugarković, D., I. Tikvić, Z. Seletković, 2011: Odnos stanišnih i strukturnih čimbenika prema odumiranju i ishrani stabala obične jele (*Abies alba* Mill.) u Gorskom kotaru, *Croat. J. For. Eng.*, (32/1) 57.–71.
- Ugarković, D., I. Tikvić, K. Popić, J. Malnar, I. Stankić, 2018: Microclimate and natural regeneration of forest gaps as a consequence of silver fir (*Abies alba* Mill.) dieback, *Sumar. List*, (5-6) 235.–245.
- Vajda, Z., 1954: Moljac jelovih iglica u sastojinama Gorskog kotara, *Sumar. List* (9-10) 527.–528.
- Valerio, J., 1997: Informe de Consultoria crecimiento y rendimiento, Document técnico 51. Proyecto BOLFOR. Santa Cruz.
- Villalba, R., T. T. Veblen, 1998: Influences of large-scale climatic variability on episodic tree mortality in northern Patagonia, *Ecology*, (79) 2624.–2640.
- Zaninović, K., M. Gajić-Čapka, 2000: Changes in Components of the Water Balance in the Croatian Lowlands, *Theor. Appl. Climatol.*, (65) 111.–117.
- Zierl, B., 2004: A simulation study to analyse the relations between crown condition and drought in Switzerland, *For. Ecol. Manag.*, (188/1) 25.–38.
- Weber, R. O., P. Talkner, I. Auer, R. Bohm, M. Gajić-Čapka, K. Zaninović, R. Brazdil, P. Faško, 1997: 20th century changes of temperature in the mountain regions of Central Europe, *Climate Change*, (36) 327.–344.
- Webster, R., A. Rigling, L. Walthert, 1996: An analysis of crown condition of *Picea*, *Fagus* and *Abies* in relation to environment in Switzerland, *Forestry*, (69) 348.–355.
- Xi, W., R. K., Peet, J. K. Decoster, D. L. Urban, 2008: Tree damage risk factors associated with large, infrequent wind disturbances of Carolina forests, *Forestry*, (81/3) 317.–334.

SUMMARY

Tree dieback is a complex process involving negative impact of various abiotic, biotic and anthropogenic factors. Climate change, comprising all those effects, is generally considered as the largest threat to forest ecosystems in Europe. Although the scale of climate change impacts on forests is not yet fully understood, especially on the regional or species level, significant damage seems to be caused by weather extremes, such as drought and strong winds. With the expected increase in the number, length, and/or intensity of extreme weather events in Croatia, research into the causes of tree mortality is both important and timely.

Silver fir is the most damaged and endangered conifer tree species in Croatia. The dieback of silver fir can be attributed to various factors, therefore the goals of this research were to determine the mortality of silver fir trees (by number and volume) for various causes of mortality, among which the climatic and structural parameters were of most interest. The twenty-year data for tree mortality in pure silver fir stands in the area of Fužine (Gorski kotar, Croatia) were collected and analysed. The largest number and volume of dead trees was caused by complex (multiple causes) dieback in the overstorey (0,75 N/ha, 2,35 m³/ha), and the smallest (0,17 N/ha, 0,02 m³/ha) by dieback of suppressed trees. No significant differences were determined regarding the timing of tree death for different causes of mortality. Climatic parameters (drought, air temperature, PET) and structural parameters of the stands (tree DBH, social position, crown diameter, shading, physiological maturity) as well as plot inclination were found to be the factors of a significant influence on the mortality of silver fir trees.

KEY WORDS: temperature, precipitation, drought, wind, stand structure