

ENZIMATSKA AKTIVNOST ŠUMSKOG TLA U OŠTEĆENOM ŠUMSKOM EKOSUSTAVU OBIČNE JELE S REBRAČOM

ENZYMATIC ACTIVITY OF FOREST SOIL IN DAMAGED FOREST ECOSYSTEM OF SILVER FIR WITH HARD FERN

Damir UGARKOVIĆ^{1*}, Ivica TIKVIĆ¹, Ivana GRGURIĆ², Ivan PERKOVIĆ¹, Nataša HULAK³, Vibor ROJE¹,
Petar ŠUTALO⁴, Krešimir POPIĆ⁵

SAŽETAK

Odumiranjem stabala mijenjaju se stanišne prilike u šumskom ekosustavu, uslijed čega dolazi do promjene mikroklimi i mikrobiološke aktivnosti tla. Cilj ovoga istraživanja je utvrditi razlike u mikroklimi staništa te u enzimatskoj aktivnosti šumskog tla u trima šumskim progalama i trima šumskim sastojinama obične jele s rebračom (*Blechno-Abietetum* Ht. 1950). Od mikroklimatskih elemenata mjerene su temperatura zraka, temperatura tla, relativna vlažnost zraka i volumetrijska vlažnost tla. Za određivanje kemijskih svojstava tla te dehidrogenazne i proteolitičke aktivnosti tala prikupljeni su kompozitni uzorci tla s dubine od 0 do 10 cm. U šumskim progalama utvrđene su značajno više vrijednosti temperatura zraka i tla te značajno niže vrijednosti relativne vlažnosti zraka i volumetrijske vlažnosti tla nego u šumskoj sastojini. Provedenim istraživanjem nisu utvrđene značajne razlike u kemijskim svojstvima tala između šumskih progala i sastojina. Zbog nesignifikantnih promjena kemijskih karakteristika tla, nisu utvrđene značajne promjene u enzimatskoj aktivnosti tala u progalama u odnosu na šumske sastojine. Temperatura zraka i temperatura tla povezane su s dehidrogenaznom aktivnosti tala, dok su temperatura tla i volumetrijska vlažnost tla povezane s proteolitičkom aktivnosti tala u šumskim progalama. Kemijska svojstva tla također imale značajan utjecaj na enzimatsku aktivnost, jer se povećanjem udjela organske tvari, dušika, humusa i ugljika u tlu povećava i enzimatska aktivnost šumskih tala. Najveće korelacije enzimatske aktivnosti i kemijskih svojstava tla utvrđene su za proteolitičku aktivnost šumskih tala. Enzimatska aktivnost šumskih tala bila je najveća na početku vegetacijskog razdoblja u uvjetima optimalne temperature i vlažnosti tla.

KLJUČNE RIJEČI: šumska progala, enzimi tla, kemijska svojstva tla, obična jela

¹ Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zavod za ekologiju i uzgajanje šuma, Svetošimunska 25, HR-10002 Zagreb, Hrvatska, Izv. prof. dr. sc. Damir Ugarković, e-mail: dugarkovic@sumfak.unizg.hr, Prof. dr. sc. Ivica Tikvić, e-mail: ivica.tikvic@zg.htnet.hr, Doc.dr.sc. Ivan Perković, e-mail: iperkovic@sumfak.hr, Izv.prof.dr.sc. Vibor Roje, e-mail: vroje@sumfak.hr

² Popa Frana Biničkog 6, 53000 Lički Osik, Hrvatska, Ivana Grgurić, mag. ing. silv.

³ Agronomski fakultet, Zavod za mikrobiologiju, Odsjek za agroekologiju, Svetošimunska cesta 25, HR-10002 Zagreb, Hrvatska, Doc.dr.sc. Nataša Hulak, e-mail: nhulak@agr.hr

⁴ Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Kemijski odsjek, Zavod za organsku kemiju, Petar Šutalo, mag. ing. chem., e-mail: psutalo@chem.pmf.hr

⁵ 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: Krešimir Popić, kresimir.popic@hrsume.hr

UVOD INTRODUCTION

Iako mikroorganizmi tla čine manje od 0,5 % mase tla, imaju odlučujući utjecaj na svojstva tla i procese koji se u njemu odvijaju (Tate, 1995). Enzimi su tla povezani s mikroorganizmima u tlu (Burns, 1982). Tlo kao stanište sadrži velike skupine enzima koji imaju važnu ulogu u održavanju ekologije tla, fizikalnih i kemijskih svojstava te plodnosti i zdravlja tla. Enzimi tla imaju biokemijsku funkciju u cjelokupnom procesu razgradnje organske tvari u sustavu tla (Lee i dr. 2020). Enzimatska aktivnost u tlu ima veliku ulogu u procesu katalize, ciklusu kruženja hraniva kao i u stvaranju organske tvari (Sinsabaugh i dr. 1994). Enzimatske aktivnosti u tlu uglavnom su mikrobnog podrijetla i predstavljaju kombinacije aktivnosti asociiranih s različitim abiotičkim i biotičkim sastavnicama. Jedinstvena ravnoteža kemijskih, fizikalnih i bioloških (uključujući mikrobn, posebno enzimatske aktivnosti) sastavnica doprinosi očuvanju zdravlja tla (Ellert i dr. 1997). S obzirom na to da u Hrvatskoj nema mnogo istraživanja na temu enzimatske aktivnosti šumskih tala u oštećenim šumskim ekosustavima obične jele (Mrkonjić Fuka i dr. 2011), njihovu aktivnost potrebno je podrobnije istražiti. Dehidrogenazna je aktivnost općeniti pokazatelj mikrobne aktivnosti, dok je proteolitička aktivnost važan pokazatelj biološke aktivnosti i usko se povezuje s plodnošću tla.

Obična je jela najugroženija vrsta crnogorice u Republici Hrvatskoj (Prpić i dr. 2001, Tikvić i dr. 2008, Čavlović i dr. 2015, Ugarković i dr. 2021). Značajna osutost obične jele (osutost krošanja > 25 % u odnosu na krošnju referentnog stabla) u razdoblju od 2006. do 2016. kretala se u rasponu od 59,63 % do 72,48 % (Potočić i dr. 2017). Odumiranje stabala obične jele u cijelom hrvatskom arealu, a posebice u njezinu dinarskom dijelu, posljedica je djelovanja različitih abiotičkih i biotičkih čimbenika (Ugarković i dr. 2021a). Kao posljedica promjene prirodnih stanišnih čimbenika javlja se jaka osutost krošanja stabala (osutost krošanja > 60 % u odnosu na krošnju referentnog stabla) te dolazi do odumiranja stabala (Prpić i dr. 2001, Dobbertin i dr. 2005, Tikvić i dr. 2008).

Prosječni intenzitet odumiranja stabala obične jele na području sjevernog Velebita iznosio je od 0,4 m³/ha do 9,1 m³/ha (Tikvić i dr. 2008), a na području Gorskog kotara iznosio je od 5,0 do 18,8 m³/ha (Ugarković i dr. 2011a). Uslijed odumiranja stabla ili grupe stabala dolazi do prekida sklopa i stvaranja manjih ili većih šumskih progala, a takve pojave sklopa krošanja uzrokuju promjenu mikroklimatskih (Ritter i dr. 2005, Albanesi i dr. 2008, Fidej i dr. 2016) i mikrobioloških obilježja (Muscolo i dr. 2007, Ugarković i dr. 2011b). Šumske progale imaju značajnu ulogu u ekologiji šuma, utječući na biološku dinamiku, ciklus kruženja hraniva i sukcesiju biljaka (Yang i dr. 2017).

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi razlike u mikroklimi i u enzimatskoj aktivnosti šumskog tla u šumskim progalama i šumskim sastojinama, kao i enzimatsku aktivnost šumskog tla tijekom vegetacijske sezone.

MATERIJALI I METODE RADA MATERIALS AND METHODS

Područje istraživanja, šumske progale i šumske sastojine – *Research area, forest gaps and forest stands*

Istraživanje je obavljeno u zapadnom dijelu Gorskog kotara na području Uprave šuma Podružnica Delnice, Šumarije Fužine u gospodarskoj jedinici „Brloško“ (45°20'06" N i 14°39'32" E) u zajednici obične jele s rebračom (*Blechno-Abietetum* Ht. 1950). Prema Koppenu, to je područje umjerenog tople kišne klime tipa Cfsbx² bez sušnog razdoblja, s maritimnim oborinskim režimom, tj. minimum oborina pada u najtoplije godišnje doba. Srednja godišnja temperatura zraka iznosi 7,3 °C, a količina oborina iznosi oko 2500 mm (Seletković, 2001). Šumska zajednica obične jele s rebračom (*Blechno-Abietetum* Ht. 1950) u Gorskom kotaru raste u području bukovo-jelovih šuma na nadmorskim visinama od 650 m do 950 m, na podzoliranim tlima povrh silikatnih matičnih supstrata. Glavna je vrsta u sloju drveća obična jela, uz nju se javljaju smreka, jarebika i obična bukva (Vukelić i Baričević 2001). Istraživanje je provedeno tijekom 2016. godine, od svibnja do rujna, u trima šumskim progalama te u trima sklopljenim šumskim sastojinama. Plohe su odabrane u istim stanišnim uvjetima i reljefnim obilježjima. Veličina šumskih progala izmjerena je GPS uređajem, a iznosile su 500, 650 m² i 700 m². Rub šumske progale definiran je rubom krošanja okolnih stabala. Središte šumske progale određeno je prema Runkelovoj metodi (1982). Šumske su progale bile stare četiri godine i nastale su sanitarnom sječom oštećenih (> 80 % osutost krošanja) i odumrlih (100 % osutost krošanja) stabala obične jele tijekom 2012. godine. Tri su kontrolne plohe postavljene u sklopljenim šumskim sastojinama u neposrednoj blizini šumskih progala, a njihove su dimenzije bile 50 × 50 m (2 500 m²). Pokusne su plohe (šumske progale i sklopljene šumske sastojine) postavljene na istovjetnim nadmorskim visinama, nagibima terena i ekspozicijama. Tlo je na području istraživanja distrični kambisol na silikatnoj geološkoj podlozi, a šumske su sastojine bile II. bonitetnog razreda.

Mikroklimatska mjerenja – *Microclimatic measurements*

U središtu šumskih progala postavljene su mikroklimatske stanice Rotronic HygroLog-D na visini 1,5 m od tla za mjerenje temperature zraka (°C) i relativne vlažnosti zraka (%) te mikroklimatske stanice Spectrum WatchDog model 2400

za mjerenje temperature tla (°C) i volumetrijske vlažnosti tla (%). Mjerenja su mikroklimatska obavljenjena na dubini od 10 cm na trima lokacijama u središtu šumskih progala.

U susjednoj sklopljenoj sastojini (kontrolna ploha) obavljeno je identično mikroklimatsko mjerenje temperature zraka (°C) i relativne vlažnosti zraka (%) na visini 1,5 m od tla. Mjerenje temperature tla (°C) i volumetrijske vlažnosti tla (%) obavljeno je na dubini od 10 cm. Mikroklimatska su mjerenja obavljena svakih sat vremena u razdoblju od 1. svibnja 2016. do 31. rujna 2016., a za analizu su izračunane srednje vrijednosti za razdoblja od sedam dana.

Mikrobiološke i pedološke analize – *Microbiological and pedological analyses*

Za kemijske analize šumskog tla prikupljeni su uzorci s dubine od 0 do 10 cm u četirima repetitivnim uzorcima (N = 12 uzoraka za šumske progale i N = 12 uzoraka za šumske sastojine). Na uzorcima tla obavljene su sljedeće kemijske analize: određivanje reakcije tla u H₂O i KCl (u skladu s ISO 10390, 1994), na uzorcima čija je pH-vrijednost u KCl bila veća od 5,5 određen je i udio karbonata u tlu metodom po Scheibleru (u skladu s ISO 10693, 1995). Ukupan dušik određen je na elementarnom analizatoru Leco CNS 2000 (u skladu s ISO 13878, 1998), a humus metodom po Tjurinu. U trima terminima tijekom 2016. godine (svibanj, srpanj i rujna) prikupljeni su uzorci šumskog tla s dubine od 0 do 10 cm za enzimatske analize. Uzorci su prikupljeni u četirima repetitivnim uzorcima (N = 36 uzoraka za šumske progale i N = 36 uzoraka za šumske sastojine). Dehidrogenazna je aktivnost određena metodom trifeniltetrazolijeva klorida (TTC) (Casida i dr. 1964). Proteolitička je aktivnost određena metodom razgradnje kazeina do aromatičnih aminokiselina (Ladd i Butler, 1972).

Statistička obrada podataka – *Statistical data processing*

Svi mikroklimatski podaci obrađeni su u programima HW3 i SpecWare 9.0. Studentovim T testom nezavisnih uzoraka ispitani su mikroklimatski, pedološki i enzimatski podaci za šumske progale i šumske sastojine. Ako je varijabilnost varijance bila značajna ($p < 0,05$), podatci su analizirani neparametarskim U testom. Mjesečna dinamika enzimatske aktivnosti šumskog tla analizirana je faktorskom analizom varijance ANOVA s čimbenicima pozicija (progala i sastojina) i mjeseci (svibanj, srpanj i rujna). Levenov test homogenosti varijance nije bio statistički značajan ($p < 0,05$). Neparametarskom Spearmanovom R korelacijom utvrđena je povezanost enzimatske aktivnosti šumskog tla s mikroklimatskim elementima i kemijskim svojstvima šumskog tla. Vrijednosti mikroklimatskih elemenata, kemijskih svojstava tla i enzimatske aktivnosti tla prikazane

su kao srednja vrijednost istraživanih šumskih progala i sastojina. Statistička obrada podataka provedena je u statističkom programu Statistica 13 (TIBCO Software Inc. 2018).

REZULTATI ISTRAŽIVANJA RESEARCH RESULTS

Mikroklima šumskih progala i šumskih sastojina – *Microclimate of forest gaps and forest stands*

Srednja je temperatura zraka u šumskoj progali iznosila 17,07 °C i bila je značajno viša u odnosu na temperaturu u sklopljenoj sastojini (kontrola) koja je iznosila 16,51 °C ($Z = -4,81$, $p < 0,0001$, tablica 1.). Maksimalna temperatura zraka izmjerena u šumskim progalama iznosila je 29,19 °C, dok je u šumskim sastojinama bila 26,25 °C. Minimalna temperatura zraka u šumskim progalama bila je 7,94 °C, a u šumskim sastojinama 6,44 °C. Srednja vrijednost relativne vlažnosti zraka u šumskoj progali iznosila je 77,92 %, a u sklopljenoj sastojini 82,45 %. Te su razlike također bile statistički značajne ($Z = 11,66$, $p < 0,0001$). Maksimalne vrijednosti relativne vlažnosti zraka na svim su pokusnim plohamama iznosile 100 %. Minimalna vrijednost relativne vlažnosti zraka u šumskim progalama iznosila je 35,15 %, a u šumskim sastojinama bila je 36,06 %. Srednja vrijednost temperature tla u progali bila je 15,31 °C, a u sklopljenoj sastojini iznosila je 12,76 °C ($Z = 33,28$, $p < 0,0001$). Maksimalna temperatura tla bila je viša u šumskoj progali (22,80 °C) u odnosu na šumsku sastojinu (16,90 °C). Minimalne temperature tla bile su 7,60 °C u šumskim progalama i 7,00 °C u šumskim sastojinama. U istraživanom razdoblju srednja vrijednost volumetrijske vlažnosti tla u progali iznosila je 9,26 %, a u sklopljenoj sastojini 13,54 % ($Z = -51,50$, $p < 0,0001$). Minimalna vlažnost tla u šumskoj progali bila je 5,40 %, a u šumskoj sastojini 6,30 %. Maksimalne vrijed-

Tablica 1. Usporedba mikroklimatskih elemenata šumskih progala i kontrolnih šumskih sastojina

Table 1 Comparison of microclimatic elements of forest clearings and control forest stands

Mikroklimatski elementi <i>Microclimatic elements</i>	Šumska progala <i>Forest gap</i>	Šumska sastojina <i>Forest stand</i>
	srednja vrijednost ± standardna devijacija <i>Mean ± Standard deviation</i>	
Temperatura zraka (°C) <i>Air temperature (°C)</i>	17,07 ± 3,68 ^a	16,51 ± 4,50 ^b
Relativna vlažnost zraka (%) <i>Relative air humidity (%)</i>	77,92 ± 13,82 ^a	82,45 ± 16,91 ^b
Temperatura tla (°C) <i>Soil temperature (°C)</i>	15,31 ± 3,48 ^a	12,76 ± 2,84 ^b
Volumetrijska vlažnost tla (%) <i>Soil volumetric water content (%)</i>	9,26 ± 2,15 ^a	13,54 ± 3,38 ^b

^{a,b} vrijednosti označene različitim slovom značajno se razlikuju ($p < 0,05$)

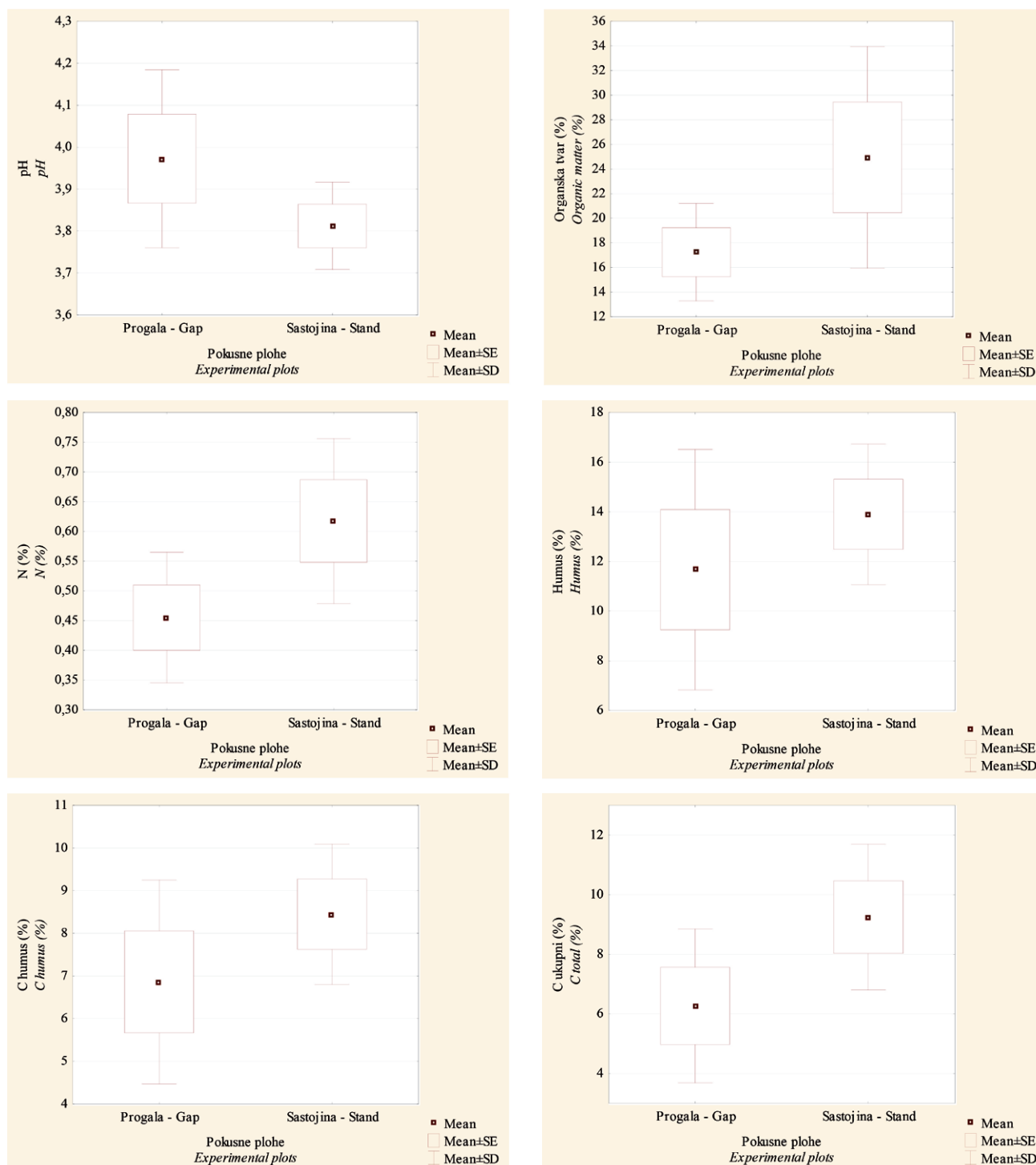
^{a,b} values marked with different letters differ significantly ($p < 0.05$)

nosti vlažnosti tla iznosile su 23,60 % u šumskoj progali, odnosno 26,20 % u kontrolnoj plohi, odnosno šumskoj sastojini.

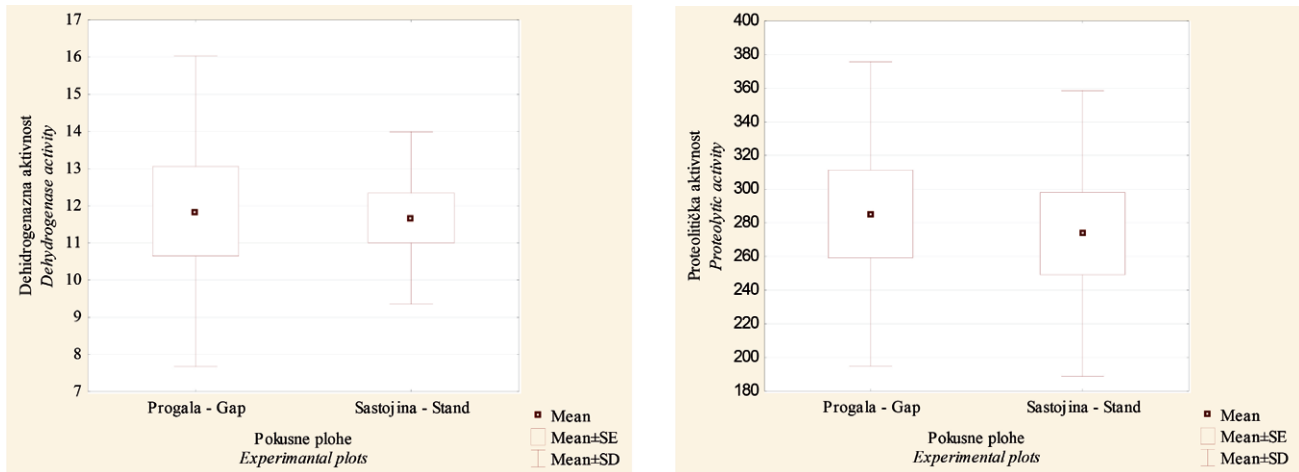
Mikrobiologija i pedologija tla – *Soil microbiology and pedology*

Na slici 1. prikazana je deskriptivna statistika kemijskih svojstava šumskog tla. Srednja pH-vrijednost tla u šum-

skim progalama iznosila je 3,97, a u šumskim sastojinama 3,81 te nisu utvrđene značajne razlike u pH-vrijednostima šumskog tla ($t = 1,35$, $p = 0,2240$). Srednji sadržaj organske tvari tla u šumskim progalama iznosio je 17,25 %, a u šumskim sastojinama 24,95 %. Prema rezultatima nisu utvrđene statistički značajne razlike u sadržaju organske tvari tla između šumskih progala i šumskih sastojina ($t = -1,56$, $p = 0,1684$).



Slika 1. Deskriptivna statistika pH-vrijednosti i kemijskih svojstava šumskog tla (%)
Figure 1 Descriptive statistics of pH-value and chemical properties of forest soil (%)



Slika 2. Deskriptivna statistika dehidrogenazne ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ dm } 16\text{h}^{-1}$) i proteolitičke aktivnosti ($\mu\text{g tyrosine g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) u šumskim progalama i šumskim sastojinama

Figure 2 Descriptive statistics of dehydrogenase ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ dm } 16\text{h}^{-1}$) and proteolytic ($\mu\text{g tyrosine g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) activity in forest clearings and forest stands

Srednji sadržaj dušika (N) u tlu na području šumskih progala iznosio je 0,45 %, a u šumskim sastojinama 0,61 %. Također nisu utvrđene statistički značajne razlike ($t = -1,83, p = 0,1162$) u udjelu sadržaja dušika. Srednja vrijednost sadržaja humusa u tlu šumskih progala iznosila je 11,67 %, a u šumskim sastojinama 13,90 %. Prema rezultatima nisu postojale statistički značajne razlike ($t = -0,79, p = 0,4566$) između istraživanih pokusnih ploha.

Srednja vrijednost sadržaja organskog ugljika u šumskim progalama iznosila je 6,86 %, a u šumskim sastojinama 8,44 %. Nisu utvrđene statistički značajne razlike u sadržaju organskog ugljika ($t = -1,09, p = 0,3160$). Srednja vrijednost sadržaja ukupnog ugljika u tlu na prostoru šumskih progala iznosila je 6,26 %, a u šumskim sastojinama 9,24 % (slika 1.). Na istraživanim pokusnim plohama nisu postojale statistički značajne razlike u sadržaju ukupnog ugljika ($t = -1,67, p = 0,1451$).

Enzimatska aktivnost – Enzymatic activity

Na slici 2. prikazane su srednje vrijednosti, standardne pogreške i standardne devijacije dehidrogenazne aktivnosti. Nisu utvrđene statistički značajne razlike ($t = 0,12, p = 0,8977$) u srednjim vrijednostima dehidrogenazne aktivnosti šumskog tla u šumskoj progali (11,85 μg) i kontrolnoj plohi (11,67 μg). Dehidrogenazna aktivnost šumskog tla u šumskoj progali bila je u rasponu od minimalnih 5,98 μg do maksimalnih 20,10 μg , a u kontrolnoj je šumskoj sastojini bila u rasponu od 9,00 μg do 16,80 μg .

Proteolitička se aktivnost šumskog tla u progali kretala u rasponu od 163,00 do 454,00 μg , a u kontroli od 183,00 do 471 μg . Srednja je vrijednost u šumskoj progali iznosila 285,33 μg , a u kontrolnoj plohi 273,67 μg . Prema rezultatima ($t = 0,32, p = 0,7477$) nisu utvrđene statistički značajne

razlike u proteolitičkoj aktivnosti šumskog tla u šumskim progalama i kontrolnim šumskim sastojinama (slika 2.).

U tablici 2. prikazani su rezultati korelacijske analize dehidrogenazne i proteolitičke aktivnosti šumskog tla s mikroklimatskim elementima. Utvrđena je značajna negativna korelacija između dehidrogenazne aktivnosti šumskog tla s temperaturom zraka ($r = -0,50^*, p = 0,012$) i temperaturom tla ($r = -0,60^*, p = 0,001$). Proteolitička aktivnosti u šumskim progalama negativno je korelirala s temperaturom tla ($r = -0,70^*, p < 0,001$), a pozitivno s volumetrijskom vlažnosti tla ($r = 0,44^*, p = 0,031$). Tlo u šumskim sastojinama imalo je značajnu negativnu korelaciju ($r = -0,69^*, p < 0,001$) između proteolitičke aktivnosti i temperature zraka te značajnu pozitivnu korelaciju s relativnom vlažnosti zraka ($r = 0,46^*, p = 0,020$) i volumetrijskom vlažnosti tla ($r = 0,46^*, p = 0,023$).

Tablica 2. Korelacija enzimatske aktivnosti s mikroklimatskim elementima
Table 2 Correlation of enzymatic activity with microclimatic elements

Varijable Variables	Dehidrogenazna aktivnost (μg) Dehydrogenase activity (μg)		Proteolitička aktivnost (μg) Proteolytic activity (μg)	
	Progala Gap	Sastojina Stand	Progala Gap	Sastojina Stand
Temp. zraka ($^{\circ}\text{C}$) Air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	-0,50*	-0,33	-0,34	-0,69*
Vlažnost zraka (%) Air humidity (%)	0,23	0,17	0,30	0,46*
Temp. tla ($^{\circ}\text{C}$) Soil temp. ($^{\circ}\text{C}$)	-0,60*	-0,07	-0,70*	-0,23
VWC tla (%) Soil VWC (%)	0,07	0,37	0,44*	0,46*

* značajno, $p < 0,05$

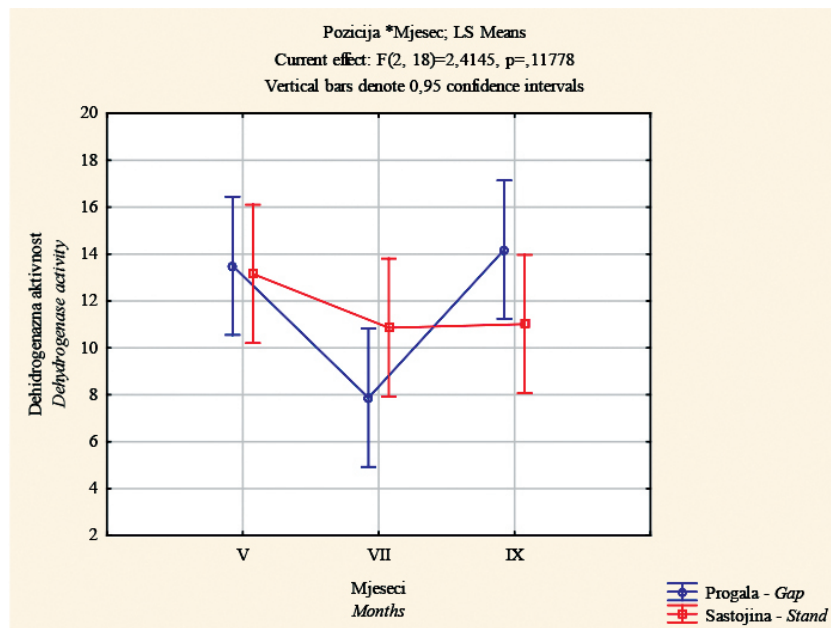
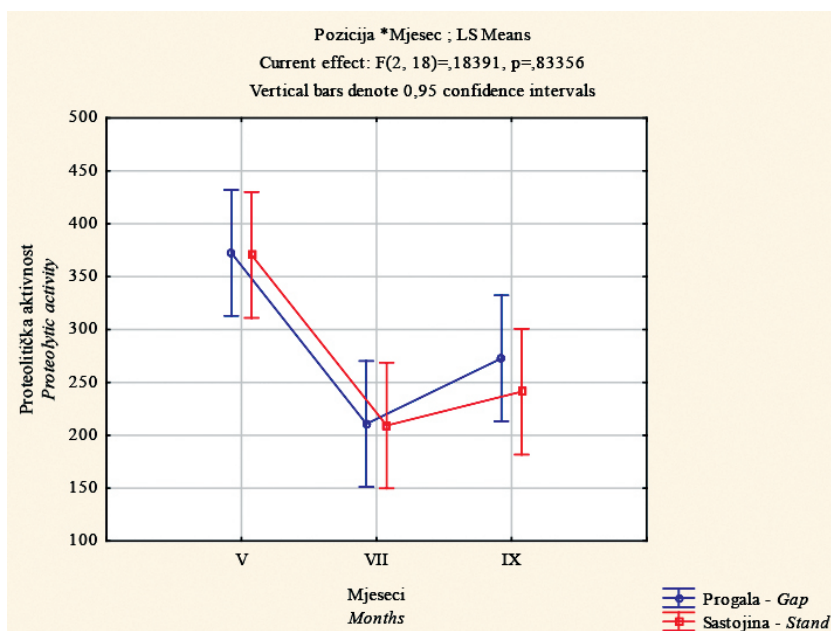
* significant at $p < 0.05$

VWC – volumetrijska vlažnost tla

VWC – soil volumetric water content

Tablica 3. Spearmanova korelacija enzimatske aktivnosti i kemijskih svojstava šumskog tla**Table 3** Spearman correlations of enzymatic activity and chemical characteristics of forest soil

Enzimatska aktivnost (μg) Enzymatic activity (μg)	Kemijske varijable Chemical variables					
	pH	Organska tvar (%)	Dušik (%)	Humus (%)	Organski ugljik (%)	Ukupni ugljik (%)
Dehidrogenazna Dehydrogenase	-0,32	0,50*	0,52*	0,10*	0,10*	0,52*
Proteolitička Proteolytic	-0,10	0,73*	0,80*	0,78*	0,78*	0,83*

* značajno, $p < 0,05$ * significant at $p < 0.05$ **Slika 3.** Sezonska dinamika dehidrogenazne aktivnosti ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ dm } 16\text{h}^{-1}$) šumskog tla**Figure 3** Seasonal dynamics of dehydrogenase activity ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ dm } 16\text{h}^{-1}$) of forest soil**Slika 4.** Sezonska dinamika proteolitičke aktivnosti ($\mu\text{g tyrosine g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) šumskog tla**Figure 4** Seasonal dynamics of proteolytics activity ($\mu\text{g tyrosine g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) of forest soil

U tablici 3. prikazane su korelacije enzimatske aktivnosti šumskog tla i kemijskih svojstava šumskog tla. Kod dehidrogenazne aktivnosti najveće su korelacije dobivene za dušik i ukupan ugljik ($r = 0,52^*$, $p = 0,001$). Najveća korelacija za proteolitičku aktivnost dobivena je za ukupan ugljik ($r = 0,83^*$, $p < 0,000$). Najmanja korelacija kod dehidrogenazne aktivnosti iznosila je $r = 0,10^*$, $p = 0,040$ za humus i organski ugljik, a kod proteolitičke aktivnosti $r = 0,73^*$, $p < 0,001$ za organsku tvar tla.

Prema rezultatima (slika 3.) nisu utvrđene statistički značajne razlike u sezonskoj dehidrogenaznoj aktivnosti šumskog tla po mjesecima između šumskih progala i šumskih sastojina ($p = 0,1177$). Sezonski gledajući, statistički najmanja dehidrogenazna aktivnost tla u šumskim progalama bila je u srpnju ($p = 0,005$). U šumskim sastojinama nisu utvrđene značajne razlike u dehidrogenaznoj aktivnosti između termina uzorkovanja, odnosno mjeseci ($p = 0,2625$).

Na slici 4. prikazani su rezultati sezonske proteolitičke aktivnosti šumskog tla. Nisu utvrđene značajne razlike u sezonskoj proteolitičkoj aktivnosti između progale i kontrole ($p = 0,8335$). U usporedbi sa svibnjem, najmanja proteolitička aktivnost tla šumskih sastojina bila je u srpnju ($p = 0,0007$) te u rujnu ($p = 0,0046$). Nije postojala značajna razlika u proteolitičkoj aktivnosti tla između srpnja i rujna ($p = 0,1390$).

RASPRAVA DISCUSSION

Šumske progale nastaju sanitarnim sječama većeg intenziteta, odnosno većeg broja stabala na određenoj jedinici površine. Posljedica su toga promjena strukture i mikroklimatskih uvjeta sastojina. Zbog nepotpunog sklopa krošanja, u sastojinu ulazi više sunčeva zračenja pa su u šumskim progalama više vrijednosti temperature zraka i tla, a niže vrijednosti relativne vlažnosti zraka i volumetrijske vlažnosti tla. Istovjetne rezultate istraživanja potvrdili su Muscolo i dr. (2017) koji su utvrdili i više vrijednosti fotosintetski aktivne radijacije u progalama površine 410 m². Mikroklimatski pak uvjeti utječu na procese u šumskom ekosustavu, na fotosintezu, transpiraciju, evaporaciju, respiraciju, razlaganje tvari i ostale procese. Organska tvar ima značajan utjecaj na biologiju tla (Brady i Weil, 1996). Prema Pernar i Bakšić (2001), jelove i bukovo-jelove šume u Hrvatskoj imaju relativno visok prinos organske tvari kojim se osiguravaju uravnoteženi proces transformacije i tijek tvari i energije, stoga u takvim uvjetima humizacija ima pozitivan trend. Muscolo i dr. (2007) u velikim su progalama pronašli manji sadržaj organske tvari u odnosu na male progale i sklopljenu sastojinu obične jele. Sanitarnom sječom većeg intenziteta uklanja se veći broj stabala iz šume, čime se posljedično smanjuje dotok organske tvari i celuloze u šumski ekosustav. Sukladno tomu istraživana su ke-

mijnska svojstva tla imala više vrijednosti u sklopljenim šumskim sastojinama u odnosu na šumske progale.

U našim istraživanim šumskim sastojinama utvrđene su veće vrijednosti organske tvari tla, ukupnog dušika, humusa, organskog i ukupnog ugljika. Međutim to povećanje nije bilo statistički značajno. Analogno nesignifikantnim promjenama kemijskih svojstava tla, utvrđene su i nesignifikantne enzimatske aktivnosti šumskog tla u istraživanim pokusnim ploham. Razlog je tomu i u činjenici da su šumske progale stare svega četiri godine i relativno dobro pomlađene listopadnim vrstama drveća (Ugarković i dr. 2018) pa su i nesignifikantne razlike u nekim kemijskim i enzimatskim svojstvima tla i bile očekivane. Ako je šumska progala dobro pomlađena, pa čak i ako je zakorovljena, postoji priliv svježije organske tvari i mikrobiološka aktivnost u šumskom tlu nije značajno smanjena. Međutim neka istraživanja Dhruva i dr. (1992) pokazuju da poremećena tla i degradirane šume imaju nepovoljan učinak na brojnost mikrobne populacije. U našem istraživanju, s obzirom na nesignifikantne razlike u enzimatskoj aktivnosti šumskog tla između progala i šumskih sastojina, šumsko tlo u progalama nije značajno degradirano iako su šumske progale, s obzirom na svoje dimenzije, velike progale. Prema rezultatima koje donose Muscolo i dr. (2007) u šumama obične jele u malim progalama površine 185 m² izmjerena je najveća enzimatska aktivnost ureaze, fosfataze i hidrolize. Rezultati istraživanja Yang i dr. (2017) upućuju na to da je organski ugljik čimbenik koji utječe na varijacije u mikrobnim zajednicama i enzimatskoj aktivnosti. Na aktivnost enzima tla utječe nekoliko abiotičkih okolišnih čimbenika. Temperatura može utjecati na enzimsku aktivnost izravnom modifikacijom kinetike enzima, a time i na rast mikroorganizama u tlu (Gomez i dr. 2020). U našem istraživanju utvrdili smo povezanost temperature zraka i temperatura tla s enzimatskom dehidrogenaznom i proteolitičkom aktivnosti. Proteolitička je aktivnost više povezana s vrijednostima mikroklimatskih elemenata u odnosu na dehidrogenaznu aktivnost. Naime, proteolitička aktivnost, osim temperature tla i volumetrijske vlažnosti tla u šumskoj progali, povezana je i s vrijednostima temperature zraka i relativne vlažnosti zraka u sklopljenoj sastojini.

Prema Mrkonjić Fuka i dr. (2011) sezonske promjene proteolitičke aktivnosti povezane su sa sezonskim fluktuacijama nekih čimbenika kao što su dostupnost hraniva, temperatura te količina dostupne vode. Prisutnost enzima u tlu usko je povezana s tipom tla. Količina organske tvari, aktivnost živih i neživih organizama određuje intenzitet bioloških procesa koji se u određenom tipu tla može odvijati (Kumar Das i Varma 2011). U usporedbi s dehidrogenaznom aktivnosti, proteolitička aktivnost šumskih tala više je povezana s kemijskim svojstvima tla. U slučaju degradacije tala, proteolitička će se aktivnost šumskih tala i vrijednosno najviše smanjiti (Blońska i dr. 2017). Međutim, ako

nije došlo da značajnog smanjenja organske tvari, enzimatska aktivnost šumskog tla neće biti poremećena. Sinsabaugh i dr. (1991) pokazali su kako enzimi mogu biti indikatori u proučavanju dekompozicije, odnosno razlaganja organskih ostataka na šumskom tlu. Temperatura, pH-vrijednost i ishrana tla mogu biti ograničavajući čimbenici enzimatske aktivnosti. Prema našim rezultatima korelacijske analize enzimatska aktivnost šumskog tla u progalama smanjuje se s vrijednostima temperatura zraka i tla, a povećava se povećanjem volumetrijske vlažnosti tla. S obzirom na vrijednosti temperaturnih i oborinskih percentila, svibanj je klimatski bio normalan. Srpanj je bio prema temperaturnim percentilima ekstremno topao, a s obzirom na oborinske percentile, vrlo sušan. Rujan je bio vrlo topao i prema oborinskim percentilima normalan (Pandžić i Likso 2017). Zbog toga je i enzimatska aktivnost šumskog tla bila najmanja tijekom srpnja.

Najveća je enzimatska aktivnost bila u svibnju, na početku vegetacijskog razdoblja. Razlog je tomu smanjenje vrijednosti temperatura zraka i tla te optimalno stanje vlažnosti u šumskom tlu. Najmanja enzimatska aktivnost šumskih tala bila je u srpnju, što je vjerojatno rezultat većih temperatura zraka i tla te manje vlažnosti u tlu. Područje istraživanja ima maritimni oborinski režim, odnosno najmanje je oborina u srpnju ili kolovozu. Uz visoke temperature zraka za to doba godine, posljedično ja najmanja vlažnost u tlu. Ona je također neophodna za rast, razvoj i život mikroorganizama, ali mora biti u svojem optimumu. Prema Mrkonjić Fuka i dr. (2011) te rezultatima Sardans i Penuelas (2005), smanjenjem vlažnosti tla, smanjuje se i proteolitička aktivnost, što je u skladu s našim istraživanjem. Iz rezultata ovog istraživanja proizlazi da su procesi humifikacije i mineralizacije najintenzivniji na početku vegetacijskog razdoblja. Obična je jela gospodarski, ekološki i tradicijski najznačajnija hrvatska četinjača, s oko 35 % udjela u ukupnoj drvnj zalihi četinjača (Prpić i Seletković, 2001), stoga je nužno poznavanje ekoloških odnosa u svrhu moguće sanacije tih šumskih ekosustava. S obzirom na probleme oko odumiranja stabala obične jele na području Gorskog kotara, rezultati ovog istraživanja mogu poslužiti šumarskim stručnjacima za donošenje odluka treba li ići u sanaciju većih šumskih progala i kako provesti sanaciju.

ZAKLJUČCI CONCLUSIONS

U šumskim progalama veličine 500 do 700 m² nastalim sanitarnim sječama značajno je toplije i suše u odnosu na šumske sastojine. Temperature su zraka i tla u progalama značajno više, a relativna vlažnost zraka i volumetrijska vlažnost tla značajno je manja u odnosu na šumske sastojine. U šumskim su sastojinama pronađene veće vrijednosti organske tvari, dušika, humusa, organskog i ukupnog

ugljika, dok je u šumskoj progali pronađena veća pH-vrijednost šumskog tla. Međutim, provedenim istraživanjem nisu utvrđene značajne razlike u kemijskim svojstvima šumskog tla između progala i šumskih sastojina. Sukladno tomu, provedenim istraživanjem nije utvrđeno značajno smanjenje ili degradacija enzimatske aktivnosti šumskog tla u progalama. Smatramo da u takvim uvjetima i šumskom tlu treba mnogo više vremena da pokaže značajnije promjene nekih svojih kemijskih odrednica i enzimatske aktivnosti. Temperature zraka i tla, volumetrijska vlažnost tla te kemijska svojstva tla imale su značajan utjecaj na enzimatsku aktivnost. Smanjenjem temperatura zraka i tla te povećanjem volumetrijske vlažnosti tla, povećavala se i enzimatska aktivnost šumskog tla. Povećanjem organske tvari, dušika, humusa i ugljika u tlu povećava se i enzimatska aktivnost šumskih tala. Najveće korelacije između enzimatske aktivnosti i kemijskih svojstava šumskog tla utvrđene su za proteolitičku aktivnost šumskih tala. Enzimatska aktivnost šumskih tala bila je najveća na početku vegetacijskog razdoblja u uvjetima optimalne temperature i vlažnosti tla. Odumiranje stabala više je utjecalo na promjenu šumske klime, odnosno na mikroklimu nego na kemijska svojstva i enzimatsku aktivnost tla. Daljnje promjene šumske klime, kemijskih svojstava i enzimatske aktivnosti tla u oštećenom šumskom ekosustavu obične jele ovisit će o pomlađenosti ili zakorovljenosti šumskih progala.

LITERATURA REFERENCES

- Albanesi, E., O.I. Gugliotta, I. Mercurio, R. Mercurio, 2008: Effects of gap size and within-gap position on seedlings establishment in silver fir stands, *iForest*, vol. (1): 55–59.
- Błońska, E., J. Lasota, P. Gruba, 2017: Enzymatic activity and stabilization of organic matter in soil with different detritus inputs, *Soil Sci Plant Nutr* 63 (3): 242–247.
- Brady, N. C., R. R. Weil, 1996: The nature and properties of soils, Prentice Hall, New Jersey, 11 ed., 740 str.
- Burns, R. G., 1982: Enzyme activity in soil: location and possible role in microbial ecology, *Soil Biol Biochem*, vol. (14): 423–427.
- Casida L. E. Jr., D. A. Klein, R. Santoro, 1964: Soil dehydrogenase activity, *Soil Sci*, vol. (98): 371–378.
- Čavlović, J., A. Bončina, M. Božić, E. Goršić, T. Simončić, K. Teslak, 2015: Depression and growth recovery of silver fir in uneven-aged Dinaric forests in Croatia from 1901 to 2001, *Forestry*, vol. (88): 586–598.
- Dhruva, K. J., G. D. Sharma, R. R. Mishra, 1992: Soil microbial population numbers and enzyme activities in relation to altitude and forest degradation, *Soil Biol Biochem*, vol. (24): 761–767.
- Dobberty, M. 2005: Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review, *Eur J Forest Res*, vol. (124): 319–333.
- Ellert B.H., M. J. Clapperton, D. W. Anderson, 1997: An ecosystem perspective of soil quality. *Soil quality for crop production*

- and ecosystem health, *Dev Soil Sci*, vol. (25):115–141, Amsterdam.
- Fidej G., A. Rozman, A. N. Thomas, I. Dakskobler, J. Diaci, 2016: Influence of salvage logging on forest recovery following intermediate severity canopy disturbances in mixed beech dominated forests of Slovenia, *iForest*, vol. (9): 430-436
 - Gomez E. J., J. A. Delgado, J. M. Gonzalez, 2020: Environmental factors affect the response of microbial extracellular enzyme activity in soils when determined as a function of water availability and temperature, *Ecol Evol*, vol. (10): 10105– 10115.
 - ISO 10390, 1994: Soil quality – Determination of pH. ISO, Genève.
 - ISO 10693, 1995: Soil quality – Determination of carbonate content – Volumetric method, ISO, Genève.
 - ISO 13878, 1998: Soil quality – Determination of total nitrogen content by dry combustion (elemental analysis). ISO, Genève.
 - Kumar Das S., A. Varma 2011: Role of Enzymes in Maintaining Soil Health, U: G. Shukla i A. Varma (ur.), *Soil Enzymology, Soil Biology 22*, Springer-Verlag, 25-42, Berlin Heidelberg
 - Ladd, J. N., J. H. A. Butler, 1972: Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates, *Soil Biol Biochem*, vol. (4): 19-30.
 - Lee, S. H., M. S. Kim, J. G. Kim, S. O. Kim, 2020: Use of Soil Enzymes as Indicators for Contaminated Soil Monitoring and Sustainable Management, *Sustainability*, vol. (12):8209
 - Mrkonjić Fuka, M., D. Ugarković, M. Blažinkov, M. Dumbović, S. Redžepović, 2011: Sezonska dinamika proteolitičke aktivnosti u degradiranim šumskim tlama, *Zbornik radova 46. hrvatski i 6. međunarodni simpozij agronoma/Pospišil, Milan (ur.)*.-Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet Zagreb, str. 135-138, Zagreb.
 - Muscolo, A., M. Sidari, R. Mercurio, 2007: Variations in soil chemical properties and microbial biomass in artificial gaps in silver fir stands, *Eur J For Res*, vol. (126): 59-65.
 - Pandžić, K., T. Likso, 2017: Praćenje i ocjena klime u 2016. godini, *Državni hidrometeorološki zavod, Prikazi br. 28*, str. 48, Zagreb.
 - Pernar, N., D. Bakšić, 2001: Značajke humusa tla jelovih i bukovo-jelovih šuma u Hrvatskoj. U: S. Matić (ur.), *Znanstvena knjiga Znanost u potrajnom gospodarenju hrvatskim šumama*, Šumarski fakultet Sveučilište u Zagrebu, Šumarski institut Jastrebarsko, Zagreb, 117-122.
 - Potočić, N., I. Seletković, T. Jakovljević, H. Marjanović, K. Indir, J. Medak, N. Lacković, M. Ognjenović, A. Laslo, 2017: Oštećenost šumskih ekosustava Republike Hrvatske, izvješće za 2016. godinu. Hrvatski šumarski institut, Jastrebarsko. str. 82.
 - Prpić, B., Z. Seletković, 2001: Ekološka konstitucija obične jele, U: B. Prpić (ur.), *Obična jela (Abies alba Mill.) u Hrvatskoj, Akademija šumarskih znanosti i Hrvatske šume, p.o. Zagreb*, 255–276, Zagreb
 - Prpić, B., Z. Seletković, P. Jurjević, 2001: Sušenje jele i promjena “kemijske klime”, U: B. Prpić (ur.), *Obična jela (Abies alba Mill.) u Hrvatskoj, Akademija šumarskih znanosti i Hrvatske šume, p.o. Zagreb*, 299–312, Zagreb.
 - Ritter, E., L. Dalsgaard, K. S. Einhorn, 2005: Light, temperature and soil moisture regims following gap formation in a semi-natural beech-dominated forest in Denmark, *Forest Ecol Manag*, vol. (206): 15–33.
 - Runkle, J. R., 1982: Patterns of disturbance in some old-growth mesic forest of eastern North America, *Ecology*, vol. (63): 1533-1546.
 - Sardans, J., J. Penuelas, 2005: Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest, *Soil Biol Biochem*, vol. (37): 1455-1461.
 - Seletković, Z., 2001: Klima i hidrološke prilike u dinarskim jelovim šumama u Hrvatskoj, U: B. Prpić (ur.), *Obična jela (Abies alba Mill.) u Hrvatskoj, Akademija šumarskih znanosti i Hrvatske šume, p.o. Zagreb*, 133–144, Zagreb.
 - Shonkor K. D., A. Varma, 1970: Role of Enzymes in Maintaining Soil Health, *Soil Enzymology*, Springer, str. 25-42, Berlin.
 - Sinsabaugh, R. L., D. L. Moorhead, A. E. Linkins, 1994: The enzymatic basis of plant litter decomposition: emergence of an ecological process, *Appl Soil Ecol*, vol. (1): 97-111.
 - Sinsabaugh, R. L., R. K. Antibus, A. E. Linkins, 1991: An enzymic approach to the analysis of microbial activity during plant litter decomposition, *Agr Ecosyst Environ*, vol. (34): 43-54.
 - Tate, R. L., 1995: *Soil Microbiology*, First edition, John Wiley and Sons, New York.
 - TIBCO Software Inc. 2018: *Statistica (data analysis software system)*, version 13. <http://tibco.com>.
 - Tikvić, I., Z. Seletković, D. Ugarković, S. Posavec, Ž. Španjol, 2008: Dieback of Silver Fir (*Abies alba* Mill.) on Northern Veljebit (Croatia), *Period Biol*, vol. (110): 137-143.
 - Ugarković, D., I. Seletković, I. Tikvić, M. Ognjenović, K. Popić, M. Orešković, N. Potočić, 2021: Povezanost mortaliteta obične jele (*Abies alba* Mill.) na području Fužina s klimatskim i strukturnim parametrima, *Sumar List*, vol. (7-8); 311-321
 - Ugarković, D., A. Jazbec, I. Seletković, I. Tikvić, V. Paulić, M. Ognjenović, M. Marušić, N. Potočić, 2021a: Silver Fir Decline in Pure and Mixed Stands at Western Edge of Spread in Croatian Dinarides Depends on Some Stand Structure and Climate Factors, *Sustainability* 13, 6060, doi:10.3390/su13116060.
 - 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*, vol. (5-6): 235.–245.
 - Ugarković, D., I. Tikvić, Z. Seletković, 2011a: Odnos stanišnih i strukturnih čimbenika prema odumiranju i ishrani stabala obične jele (*Abies alba* Mill.) u Gorskom kotaru, *Croat J For Eng*, vol. 32: 57-71.
 - Ugarković, D., I. Tikvić, Z. Seletković, M. Oršanić, I. Seletković, M. Blažinkov, M. Mrkonjić Fuka, S. Redžepović, 2011b: Neke mikrobiološke značajke tala i prirodno pomlađivanje šumskih otvora oštećenih šumskih ekosustava obične jele (*Abies alba* Mill.) u Gorskom kotaru, *Sumar List*, vol. (3-4): 99-111.
 - Vukelić, J., D. Baričević, 2001: Šumske zajednice obične jele u Hrvatskoj. U: B. Prpić (ur.), *Obična jela (Abies alba Mill.) u Hrvatskoj, Akademija šumarskih znanosti i Hrvatske šume, p.o. Zagreb*, Zagreb, 162-196.
 - Yang, Y., Y. Geng, H. Zhou, G. Zhao, L. Wang, 2017: Effects of gaps in the forest canopy on soil microbial communities and enzyme activity in a Chinese pine forest, *Pedobiologia*, vol. (61): 51-60

ABSTRACT

With the decline of trees, habitat conditions change, resulting in changes in the microclimate and microbiological activity of the soil. The aim of the research is to determine the differences in the microclimate of habitats and in the enzymatic activity of forest soil in three forest gaps and three forest stands of silver fir with hard fern (*Blechno-Abietetum* Ht. 1950). Of the microclimatic elements, air temperature, soil temperature, relative air humidity and volumetric soil moisture were measured. Composite soil samples from a depth of 0 to 10 cm were collected to determine the chemical properties of the soil and the dehydrogenase and proteolytic activity of the soil. Significantly higher values of air and soil temperatures and significantly lower values of relative air humidity and volumetric soil moisture were found in forest gaps. The research did not reveal any differences in the chemical properties of the soil between forest gaps and stands. Due to insignificant changes in soil chemical characteristics, no significant changes in soil enzymatic activity were found in the gaps in relation to forest stands. Air temperature and soil temperature are related to soil dehydrogenase activity, while volumetric soil moisture is associated with proteolytic soil activity in forest gaps. Soil chemical characteristics also had a significant effect on enzymatic activity. By increasing the share of organic matter, nitrogen, humus and carbon in the soil, the enzymatic activity of forest soils also increases. The highest correlations between enzymatic activity and soil chemical characteristics were found for proteolytic activity of forest soils. The enzymatic activity of forest soils was highest at the beginning of the vegetation period under conditions of optimal soil temperature and soil moisture.

KEY WORDS: forest gap, soil enzymes, soil chemical properties, silver fir