

Uporaba laserskega skeniranja za vrednotenje poškodovanosti dreves zaradi žledoloma

On the Use of Laser Scanning for Evaluating Tree Damages due to the Ice-Break

Aleš BENČINA¹, Milan KOBAL²

Izvleček:

Benčina, A., Kopal, M.: Uporaba laserskega skeniranja za vrednotenje poškodovanosti dreves zaradi žledoloma; Gozdarski vestnik, 77/2019, št. 4. V slovenščini z izvlečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit. 21. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic.

Na območju GGE Snežnik smo ocenili poškodovanost krošenj po žledolomu iz leta 2014. Območje smo posneli z laserskim skeniranjem novembra 2013 in aprila 2014. Lidarske podatke smo obdelali v programih ArcMap in CloudCompare. V raziskavo smo vključili 111 dreves, od tega 65 navadnih jelk (*Abies alba* Mill.) in 46 navadnih bukev (*Fagus sylvatica* L.). S programom CloudCompare smo izračunali razdalje med točkami, ki so si bile najbližje med oblakoma točk iz let 2013 in 2014. Tako smo ugotovili razdalje poškodovanosti, s katerimi smo ugotovili naslednje: bukke so bile statistično značilno bolj poškodovane kot jelke ($p < 0,05$). Preverili in statistično potrdili smo povezavo med višino drevesa in poškodbami krošnje ($p < 0,05$) ter dolžino krošnje in poškodbami krošnje ($p < 0,05$). Vpliva sestojnega sklepa na poškodovanost krošenj po žledu nismo uspeli statistično značilno potrditi ($p > 0,05$).

Ključne besede: lasersko skeniranje, žled, poškodovanost gozdov, geoinformatika, daljinsko zaznavanje.

Abstract:

Benčina, A., Kopal, M.: On the Use of Laser Scanning for Evaluating Tree Damages due to the Ice-Break; Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry), 77/2019, vol. 4. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 21. Proofreading of the English text Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

In the area of forest management unit Snežnik, we estimated crown damage after ice-break in 2014. The area was recorded with LIDAR technology in November 2013 and April 2014. Lidar data was processed in ArcMap and CloudCompare. The study included 111 trees, 65 of which were silver fir (*Abies alba* Mill.) and 46 common beech (*Fagus sylvatica* L.). Using CloudCompare, we calculated the distances between the points that were closest to 2013 and 2014 lidar data. This gave us the distances of damage that led to the following findings: the beech was statistically significantly more damaged than fir ($p < 0,05$). We discovered the connection between the height of the tree and the crown damage ($p < 0,05$), the length of the crown and the crown damage ($p < 0,05$). We were not able to statistically determine impact of the canopy transparency on the crown damage because of ice-break ($p > 0,05$).

Key words: laser scanning, ice break, forest damages, geoinformatics, remote sensing

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Vse pogosteje se v svetu in tudi v Sloveniji soočamo z različnimi naravnimi nesrečami in ujmami. Ker je Slovenija na stiku gorskega, primorskega in celinskega podnebja, se pojavlja velika vremenska spremenljivost na majhnih razdaljah. Zaradi sočasnega vpliva različnih vremenskih razmer in orografije nastajajo skrajne vremenske razmere

(Sinjur in sod., 2010). Takšen primer je žledolom, ki je leta 2014 v Sloveniji poškodoval del gozdov.

Močan žled se pojavlja na deset let in najpogosteje prizadene jugozahodno Slovenijo, vzdolž dinarske pregrade, predvsem pobočja in vzhodna Čičarije, Javornikov, Trnovskega gozda, Nanosa in Snežnika ter Brkine in območje okoli Senožec z Vremščico (Sinjur in sod., 2010). Ocenjevanje poškodovanosti gozdov, ki nastanejo zaradi žleda,

¹ A. B., Posavskega ulica 28, SI-1000 Ljubljana, ales.bencina17@gmail.com

² Doc. dr. M. K., Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Večna pot 83, SI-1000 Ljubljana, Slovenija. milan.kobal@bf.uni-j.si

je težavno zaradi različnih oblik poškodb. Najpogostejše poškodbe, ki nastanejo na gozdnem drevju, so lomljenje posameznih vej, upognjenost drevja, odlomi drevesnih vrhov, prelom debla in izruvanje celotnega drevesa (Marinšek in sod., 2015).

Zaradi tanjših in prožnejših vej ter stožčaste oblike krošnje so iglavci odpornejši od listavcev. Sestoji na grebenastih in prisojnih legah so bolj odporni, prav tako starejši sestoji. V mlajših sestojih zaradi konkurence drevesa hitro priraščajo (Kordiš, 1977) in imajo zato veliko dimenzijsko razmerje, kar za stabilnost in odpornost posameznega drevesa ni ugodno. Po navadi žled starejšim iglavcem odlomi le vrhove. Listavci pa so najbolj prizadeti na rastiščih s plitvimi tlemi ter na strmih pobočjih, kjer lahko pride do izruvanih dreves (Saje, 2014).

V gozdarstvu je zračno lasersko skeniranje površja uporabno na različnih prostorskih ravneh, kot je analiza celotne krajine, sestoj ali posameznega drevesa (Kobal in sod., 2014). Raziskav o uporabi laserskega skeniranja površja pri prepoznavanju oz. spremljanju naravnih nesreč v gozdovih je čedalje več. Vastaranta in sod. (2011) so iz podatkov laserskega skeniranja ocenjevali poškodbe gozdov, ki so nastale zaradi snegoloma. Iz razlik v strehi sestoja so izločili poškodovana drevesa. Nyström in sod. (2014) so razvili metodo za zaznavanje zaradi vetroloma podrtih dreves. Zaznavanje podrtega drevja s podatki laserskega skeniranja površja opisujejo v člankih tudi Blanchard in sod. (2011), Lindberg in sod. (2013) ter Mücke in sod. (2013). Podatke laserskega skeniranja so uporabili tudi za ocenjevanje poškodb gozdov po orkanih Katrina in Velma (Zhang in sod., 2008). Lindberg in sod. (2013) so razvili algoritem za prepoznavanje linijskih objektov nad tlemi, ki naj bi predstavljali podrti debla. V Sloveniji uporabo podatkov laserskega skeniranja za vrednotenje poškodovanosti gozdov zaradi žleda opisujeta Kobal (2015) in Baša (2016).

V tej raziskavi smo na primeru žledoloma želeli prikazati uporabo laserskega skeniranja za vrednotenje poškodovanosti gozdov na ravni posameznih dreves. Poškodovanost krošenj, ki smo jo izračunali iz podatkov laserskega skeniranja, smo primerjali med drevesnimi vrstami ter testirali korelacijo med poškodovanostjo krošenj in velikostjo drevesa ter sestojnim sklepom.

2 METODE

2 METHODS

2.1 Objekt raziskave

2.1 Study area

Raziskavo smo opravili na območju GGE Snežnik v odsekih 1a, 1b, 1c, 1d ter 2a, 2c in 2d. Nadmorska višina sega od 722 do 776 m, gozdovi so uvrščeni v naslednje tri rastiščno-gojitvene razrede:

- mešani gozdovi na rastišču *Omphalodofagetum typicum* (1a, 1b);
- smrekovi gozdovi na rastišču *Hacquetiofagetum* v. g. *Ruscus hypoglossum* (1c, 1d, 2c, 2d);
- mešani gozdovi na rastišču *Omphalodofagetum mercurialetosum* (2a).

Po žledolomu 2014 smo drevesa ($n = 111$, 65 jelk in 46 bukev) izbrali tako, da so se njihove krošnje jasno ločile od preostalih krošenj, saj smo tako zagotovili pravilno razmejevanje posameznih dreves v podatkih laserskega skeniranja. Na terenu smo izbranim drevesom izmerili prsni premer ter višino začetka krošnje, ki smo jo potrebovali v nadaljnji obdelavi podatkov laserskega skeniranja. Podatek o višini drevja smo pridobili iz podatkov laserskega skeniranja iz leta 2013, ko drevesa še niso bila poškodovana.

2.2 Lasersko skeniranje in priprava lidarskih podatkov

2.2 Laser Scanning and lidar data preparation

Območje raziskave (70 ha) smo v okviru Life+ projekta ManFor C.BD (Kutnar in sod., 2013) posneli iz helikopterja Eurocopter EC 120B z laserskim skenerjem Riegl LM5600 z relativno horizontalno natančnostjo 10 cm in relativno vertikalno natančnostjo 3 cm. Območje je bilo posneto z gostoto 300 točk/m², in sicer novembra 2011, novembra 2013, aprila 2014 ter oktobra 2014. Za namen te raziskave smo uporabili podatke iz novembra 2013 in aprila 2014 (Kobal, 2015).

V programu ArcMap 10.5 (ESRI, 2016) smo z orodjem *Buffer* izdelali krožne ploskve z radijem 10 m okoli vseh izbranih dreves in v nadaljevanju z orodjem *Extract LAS* iz celotnega oblaka točk izločili le tisti del lidarskih podatkov, ki so znotraj

krošnje ploskve okoli drevesa. Nadaljnjo obdelavo smo opravili v programu CloudCompare, kjer smo pred začetkom obdelave oblake točk poravnali na isto ravnino z orodjem *Cloud Registration*. Kot referenčni oblak točk smo izbrali oblak točk iz leta 2013, oblak točk iz leta 2014 pa smo premaknili. Za poravnavo oblakov točk smo uporabili algoritem ICP (angl. Iterative Closest Point), ki postopoma najde najboljšo mogočo poravnavo med dvema oblakoma točk tako, da s ponavljanjem popravlja oceno transformacije med dvema oblakoma (Tratnik, 2013). Dodatno smo omogočili zavračanje oddaljenih korespondenčnih parov točk, saj so se zaradi poškodovanosti krošenj oblaki točk med seboj razlikovali na mestu poškodovanosti.

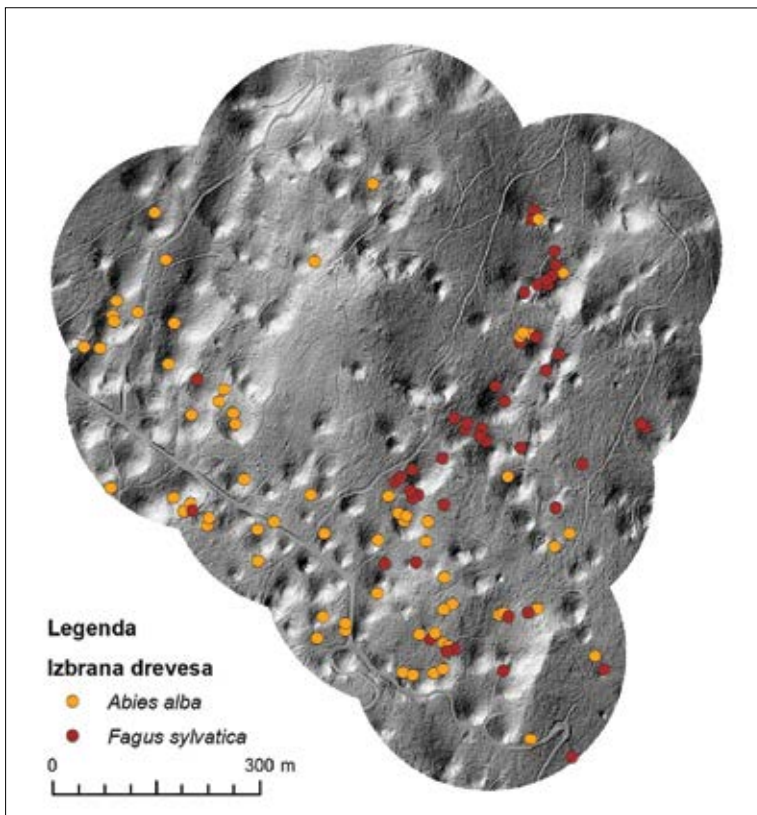
Z orodjem *Segment* smo nato odstranili tiste točke, ki predstavljajo okoliška debla dreves in njihove krošnje tako, da so ostale le točke, ki so se odbile od krošnje proučevanega drevesa iz obeh

let. Dolžine krošenj, ki smo jih na terenu izmerili za vsako drevo posebej, smo uporabili pri določitvi spodnjega dela krošnje, predvsem pri drevesih, ki so imela bujno podrast, ter tam, kjer so krošnje oz. posamezne veje nižjih sosednjih dreves vraščale k deblu izbranega drevesa.

2.3 Izračun sestojnega sklepa ter razdalj poškodovanosti

2.3 Canopy transparency calculations and tree damages estimation

Sestojni sklep smo izračunali na podlagi digitalnega modela krošenj (DMK) z velikostjo rastrske celice $0,5 \times 0,5$ m. DMK smo izdelali kot razliko med digitalnim modelom površja (DMP – najvišja nadmorska višina točk znotraj posamezne rastrske celice) in digitalnim modelom reliefa (DMR – povprečna nadmorska višina vseh talnih točk znotraj rastrske celice). Uporabili smo podatke laserskega skeniranja.



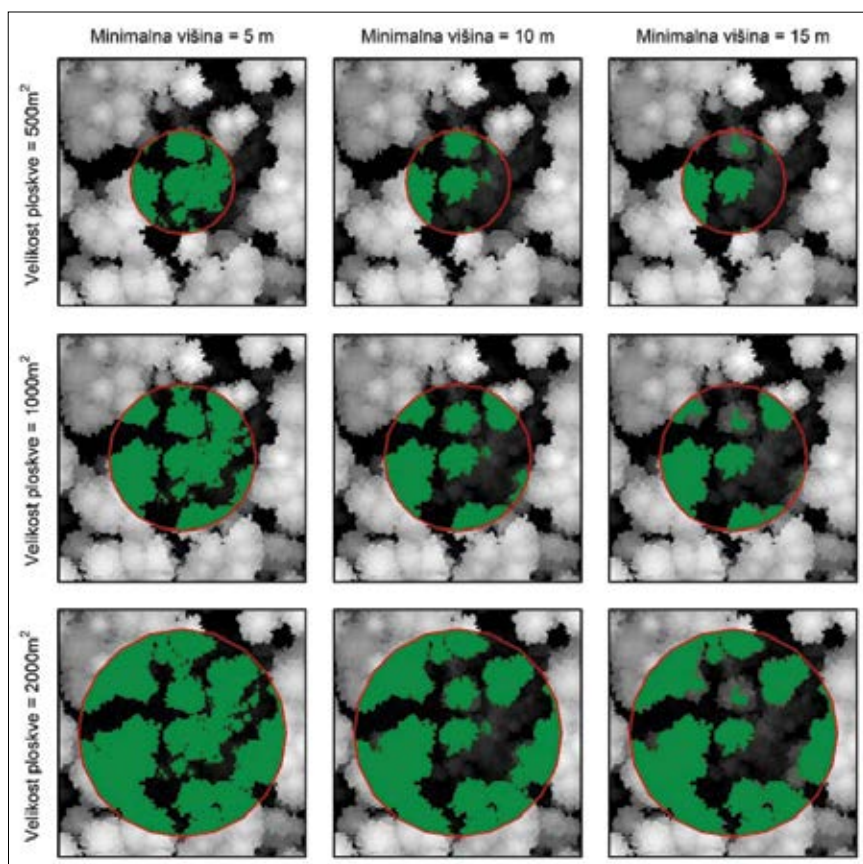
Slika 1: Senčen digitalni model reliefa objekta raziskave z označenimi drevesi v GGE Snežnik
Figure 1: Hillshaded digital elevation model of the analyzed area with marked selected trees in FMU Snežnik

nja iz leta 2013. Vsakemu drevesu smo določili tri različno velike krožne ploskve (500 m², 1000 m² in 2000 m²), kjer je bilo izbrano drevo središče ploskve (Slika 2). Nato smo izločili rastrske celice, nižje od izbrane minimalne višine (5 m, 10 m in 15 m), in tako za vsako ploskev ugotovili delež površine, ki ga pokriva vegetacija, višja od določene minimalne višine. To vrednost smo uporabili kot kazalnik sestojnega sklepa.

Za opredelitev poškodovanosti dreves smo uporabili podatke o poškodovanosti drevesnih krošenj, ki smo jih izračunali le iz točk drevesnih krošenj (preostali del oblaka točk smo izbrisali). V programu CloudCompare smo uporabili funkcijo *Compute cloud/cloud distance*, ki izračuna

razdaljo med dvema oblakoma točk (prvi oblak točk predstavlja leto 2013, drugi pa leto 2014), in sicer za točke, ki so si najbližje. Tako smo za vsako drevo dobili podatek o maksimalni in povprečni razdalji med korespondenčnimi pari točk, kar smo pozneje uporabili pri statistični analizi (Slika 3). Izračuna podatek smo poimenovali razdalja poškodovanosti.

Za testiranje razlik v poškodovanosti med drevesnimi vrstami smo uporabili Studentov t-test. Izračunali smo 95 % interval zaupanja. Povezanost velikosti drevesa in sestojega sklepa s poškodovanostjo drevesnih krošenj smo analizirali s Pearsonovim koeficientom korelacije.



Slika 2: Prikaz izračuna sestojnega sklepa za drevo z zaporedno številko 105, katerega vrh je označen z rdečo piko. Zelena barva predstavlja krošnje, upoštewane v izračunu sestojnega sklepa znotraj ploskve, ki je označena z rdečo črto.

Figure 2: Calculation display of the canopy closure for the tree with the serial number 105, whose peak is marked with a red dot. The green color represents the crowns taken into account in the calculation of the canopy closure within the surface marked with a red line.

3 REZULTATI

3 RESULTS

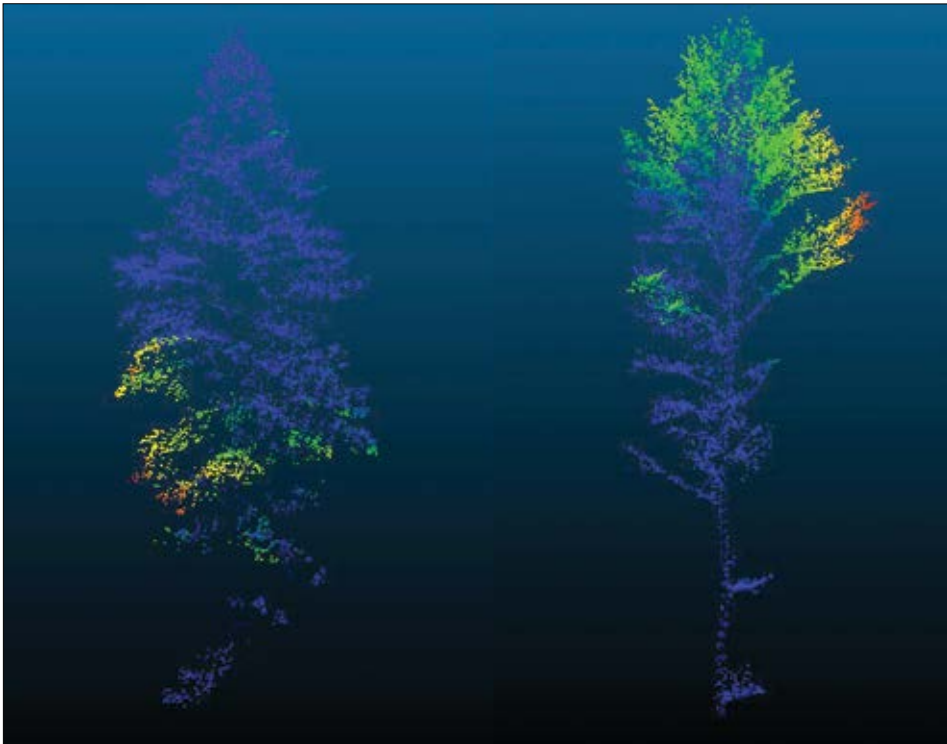
Leta 2017 je povprečni prsni premer za jelko znašal $54,7 \pm 3,0$ cm ter za bukev $49,1 \pm 2,7$ cm. Povprečna višina analiziranih jelk je leta 2013 znašala $29,6 \pm 1,1$ m ter povprečna višina bukev $31,6 \pm 1,2$ m.

Povprečni vrednosti za povprečno ($p < 0,001$) in maksimalno ($p < 0,001$) razdaljo poškodovanosti se med bukvijo in jelko statistično značilno razlikujeta. Povprečna povprečna razdalja poškodovanosti je pri jelki $0,10 \pm 0,01$ m ter pri bukvi $0,94 \pm 0,12$ m. Povprečna maksimalna razdalja poškodovanosti je pri jelki $1,34 \pm 0,15$ m in pri bukvi pa $4,16 \pm 0,35$ m. Maksimalna povprečna razdalja poškodovanosti za jelko znaša $0,25$ m ter za bukev $2,44$ m. Maksimalna maksimalna razdalja poškodovanosti za jelko je $3,46$ m ter za bukev $8,02$ m. Poškodovanost krošenj bukve je statistično značilno večja kot poškodovanost jelke (Slika 4).

3.1 Vpliv velikosti drevesa na poškodovanost krošnje

3.1 Visibility analyses of clearings of different width

Pri jelki odvisnost med povprečno razdaljo poškodovanosti in premerom drevesa ni statistično značilna ($r = -0,04$; $p = 0,766$), odvisnost med maksimalno razdaljo poškodovanosti in premerom drevesa pa je ($r = 0,34$; $p = 0,005$). Tudi pri bukvi odvisnost med povprečno razdaljo poškodovanosti in prsnim premerom drevesa ni statistično značilna ($r = 0,17$; $p = 0,251$), prav tako je neznačilna odvisnost med maksimalno razdaljo poškodovanosti in prsnim premerom ($r = 0,23$; $p = 0,116$). Tako lahko sklepamo, da prsni premer drevesa statistično značilno ne vpliva na poškodovanost krošenj po žledu. Vse statistično značilne povezave so prikazane na sliki 5.



Slika 3: Poškodbe krošnje, prikazane na jelki (levo) in bukvi (desno) z barvno skalo. Modra pomeni manjšo razdaljo točk od osnovnega oblaka in rdeča večjo.

Figure 3: Damage to the crown, shown on fir (left) and beech (right) with a color scale. Blue represents a smaller distance from the base cloud and red a larger one.

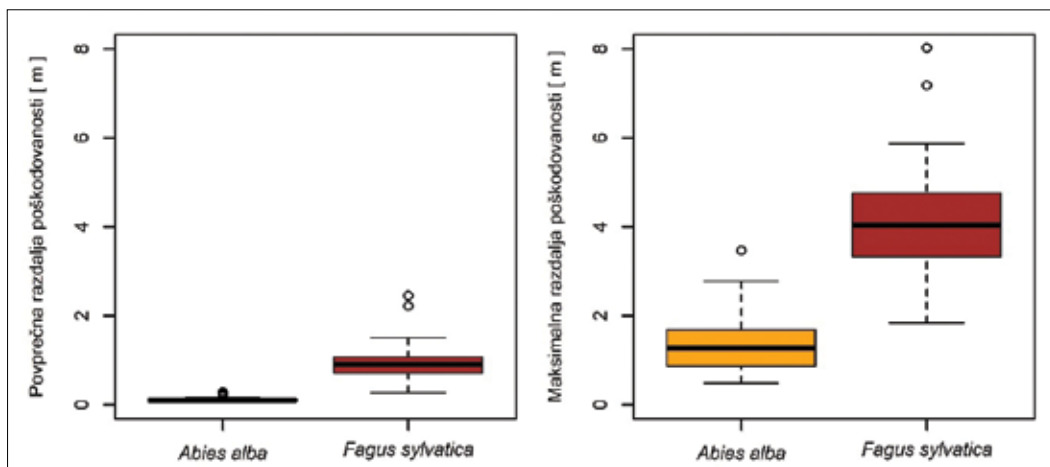
Pri jelki odvisnost med povprečno razdaljo poškodovanosti in višino drevesa ni statistično značilna ($r = -0,08$; $p = 0,575$), odvisnost med maksimalno razdaljo poškodovanosti in višino drevesa pa je ($r = 0,35$; $p = 0,004$). Pri bukvi je odvisnost med povprečno razdaljo poškodovanosti in višino drevesa statistično značilna ($r = 0,35$; $p = 0,016$), prav tako je značilna odvisnost med maksimalno razdaljo poškodovanosti in višino drevesa ($r = 0,34$; $p = 0,022$). Tako lahko sklepamo, da višina drevesa vpliva na poškodovanost krošenj po žledu. Vse statistično značilne povezave so prikazane na sliki 6.

vanost krošenj po žledu. Vse statistično značilne povezave so prikazane na sliki 6.

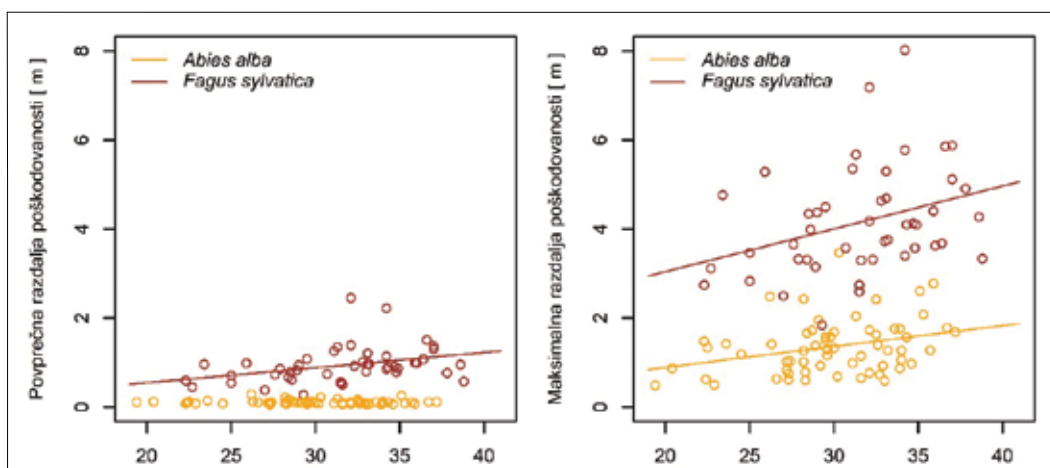
3.2 Vpliv dolžine krošnje na poškodovanost krošnje

3.2 The impact of the crown size on the damage of the crown

Odvisnost med povprečno razdaljo poškodovanosti in dolžino krošnje pri jelki ni statistično značilna ($r = -0,07$; $p = 0,318$), odvisnost med maksimalno razdaljo poškodovanosti in dolžino



Slika 4: Primerjava poškodovanosti krošenj med jelko ($n = 65$) in bukvijo ($n = 46$)
Figure 4: Comparison of crown damage between fir ($n = 65$) and beech ($n = 46$).



Slika 5: Odvisnost med povprečno in maksimalno razdaljo poškodovanosti ter premerom drevesa v prsni višini za jelko in bukev
Figure 5: Dependence between average and maximum distances of damage and diameter of the tree at the breast height for fir and beech.

krošnje jelke pa je ($r = 0,31$; $p = 0,010$). Pri bukvi je odvisnost med povprečno razdaljo poškodovanosti in dolžino krošnje drevesa statistično značilna ($r = 0,30$; $p = 0,040$). Odvisnost med maksimalno razdaljo poškodovanosti in dolžino krošnje pri bukvi ni statistično značilna ($r = 0,25$; $p = 0,082$).

3.3 Vpliv sestojnega sklepa na poškodovanost krošnje

3.3 Impact of the canopy transparency on damage to the crown

Preverili smo tudi odvisnost med sestojnim sklepom in poškodbami krošnje. Odvisnost je bila statistično značilna le v dveh primerih, in sicer pri jelki na ploskvi z velikostjo 500 m², ko je bila upoštevana vegetacija, višja od 10 m in 15 m. Pri bukvi nismo ugotovili statistično značilne povezave med sestojnim sklepom in poškodbami krošnje ($p > 0,05$). Odvisnosti so prikazane v preglednici 1.

4 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

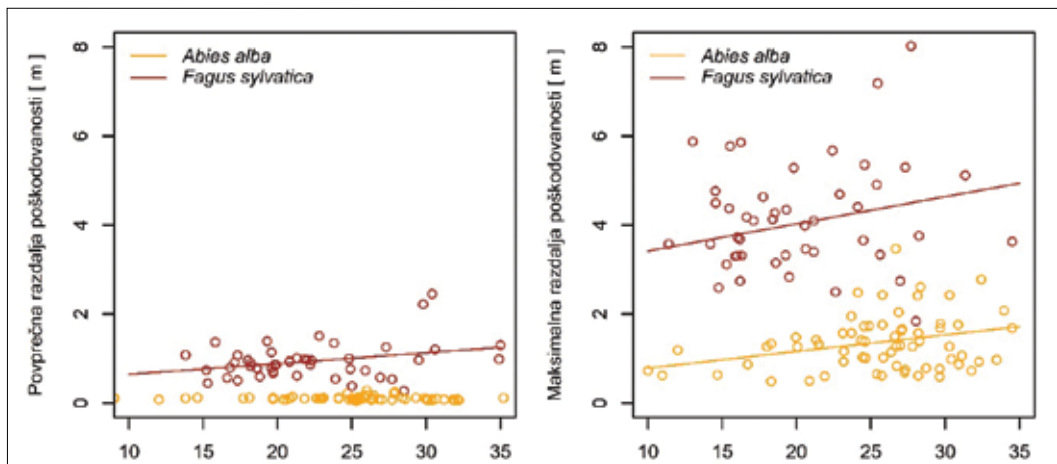
4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Najodmevnejši žledolom v zadnjih 100 letih je bil žledolom leta 2014, ki je po ocenah Zavoda za gozdove Slovenije poškodoval 9,3 mio m³ lesa (Saje, 2014). Kot ugotavljajo pri Evropskem gozdarskem inštitutu EFI, so takšne naravne nesreče poleg težavne organizacije sanitarnega dela izziv

tudi za raziskovalce, ki potrebujejo mehanizme, s katerimi bodo omogočali lahko dostopne, ažurne in natančne informacije o obsegu naravnih nesreč v gozdovih in njihovih posledicah (Marinšek in sod., 2015). Za vzpostavitev takšnega mehanizma je logična in smiselna uporaba podatkov daljinskega zaznavanja.

V tej raziskavi smo za vrednotenje poškodovanosti gozdov zaradi žleda uporabili podatke laserskega skeniranja. Zlasti če imamo na voljo ažurne podatke laserskega skeniranja pred dogodkom, je to dobro izhodišče ne le za oceno, temveč za merjenje poškodovanosti gozdov na ravni posameznega drevesa oz. celo dela drevesne krošnje. Tako uporaba podatkov laserskega skeniranja kaže veliko možnosti pri vse bolj natančnem ocenjevanju poškodb sestojev ter neposredno merljivih sestojnih parametrov, kot je npr. višina drevja in iz nje izpeljani sestojna temeljnica in lesna zaloga (Kobal in sod., 2015). V Sloveniji so jeseni 2014 in spomladi 2015 opravili lasersko skeniranje celotne države (Izvedba laserskega ..., 2015), kar daje dobro izhodišče za proučevanje sprememb v okolju. Pri tem je pomembno poudariti nujo o rednem izvajanju laserskega skeniranja v prihodnje.

V raziskavi smo primerjali poškodovanost krošenj po žledu po drevesnih vrstah, preverili vpliv sestojnega sklepa in analizirali vpliv velikosti drevesa (premer v prsni višini, višino drevesa



Slika 6: Odvisnost med povprečno in maksimalno razdaljo poškodovanosti ter dolžino krošnje za jelko in bukev
Figure 6: Dependence between average and maximum distances of damage and crown length for fir and beech.

Preglednica 1: Odvisnost med sestojnim sklepom in poškodbami krošnje glede na različno minimalno višino strehe sestoja ter različno velikost ploskve opazovanja za jelko in bukev

Table 1: Correlation between canopy transparency and the tree crown damages according to the different minimum height of the vegetation and the different size of the observation surface area for fir and beech.

Minimalna upoštevana višina drevja	Velikost ploskve – jelka		
	500 m ²	1000 m ²	2000 m ²
5 m	ni značilno	ni značilno	ni značilno
10 m	r = 0,24; p = 0,049	ni značilno	ni značilno
15 m	r = 0,27; p = 0,028	ni značilno	ni značilno
Minimalna upoštevana višina drevja	Velikost ploskve – bukev		
	500 m ²	1000 m ²	2000 m ²
5 m	ni značilno	ni značilno	ni značilno
10 m	ni značilno	ni značilno	ni značilno
15 m	ni značilno	ni značilno	ni značilno

ter dolžino krošnje) na poškodovanost krošenj. Marinšek in sod. (2015) navajajo, da masa žleda, ki se povečuje, ni edini dejavnik, ki vpliva na poškodovanost dreves. Posredno ali neposredno na poškodovanost krošnje, poleg že prej omenjenih dejavnikov, vplivajo tudi druge značilnosti drevja, kot so razmerje med višino in prsnim premerom, stopnja in asimetričnost krošnje, vrstni kot vej, bolezni in predhodne poškodbe dreves. Na poškodovanost vplivajo tudi drugi dejavniki. Lastnosti terena (tip tal, vlažnost, geološka podlaga, nagib, globina tal, lega, skalovitost in kamnitost), vremenske razmere (temperatura zraka, količina padavin, dolžina obdobja ugodnih vremenskih razmer za razvoj žleda ter smer in jakost vetra) ter lastnosti sestoja (starost sestoja, gostota sestoja in vertikalna sestojna struktura) (Marinšek in sod., 2015). Poleg poškodb krošnje, predvsem odlomljenih vej, ki smo jih proučevali v tej raziskavi, Nagel in sod. (2016) navajajo, da so pri večjih količinah žleda pogosto izravana drevesa, predvsem na strmih terenih.

Nagel in sod. (2016) navajajo, da so bili po žledu najmanj poškodovani iglavci (*Abies alba* in *Picea abies*), srednje poškodovani so bili rdeči bor (*Pinus sylvestris*), gorski javor (*Acer pseudoplatanus*), gorski brest (*Ulmus glabra*) in navadni beli gaber (*Carpinus betulus*). Največje poškodbe so ocenili pri bukvi (*Fagus sylvatica*), gradnu (*Quercus petraea*) in črnem gabru (*Ostrya carpinifolia*). Podobne rezultate smo ugotovili tudi

v tej raziskavi. Rezultati statistično značilno prikazujejo, da je povprečna razdalja poškodovanosti (tako povprečna kot maksimalna) bukve večja kot povprečna razdalja poškodovanosti (povprečna in maksimalna) jelke. Tako so bile krošnje bukev bolj poškodovane kot krošnje jelk, kar se ujema tudi z drugimi navedbami iz literature, kjer trdijo, da so na splošno iglavci – zaradi tanjših in prožnejših vej ter stožčaste oblike krošnje – odpornejši proti poškodovanosti zaradi žleda (Saje, 2014). Da so iglavci (jelka) odpornejši proti žledu kot listvci (bukve) je v magistrskem delu ugotovil tudi Baša (2016).

Preverili smo tudi odvisnost med velikostjo drevesa in poškodbami krošenj. Najprej smo analizirali vpliv prsnega premera na poškodovanost krošenj, kjer smo ugotovili, da je odvisnost statistično značilna le pri jelki pri povprečni razdalji poškodovanosti. Drugačni so rezultati pri analizi vpliva višine drevesa na poškodovanost drevesnih krošenj. Statistično značilne so bile naslednje odvisnosti: odvisnost med maksimalno razdaljo poškodovanosti in višino drevesa pri jelki. Pri bukvi je odvisnost med povprečno razdaljo poškodovanosti in višino drevesa statistično značilna, prav tako je značilna odvisnost med maksimalno razdaljo poškodovanosti in višino drevesa. Primerjali smo tudi dolžino krošnje in njeno poškodovanost, kjer smo ugotovili enake rezultate kot pri primerjavi z višino drevesa. Povezava med maksimalno razdaljo poškodovanosti

in dolžino krošnje drevesa pri jelki je statistično značilna. Pri bukvi sta statistično značilni obe razdalji poškodovanosti krošnje z njeno dolžino krošnje (povprečna razdalja poškodovanosti in maksimalna razdalja poškodovanosti). Iz pridobljenih rezultatov lahko sklepamo, da velikost drevesa vpliva na njegovo poškodovanost, v povezavi z njegovo višino in dolžino krošnje. Povezava s prsnim primerom ne kaže vpliva na poškodovanost.

Poleg drevesnih vrst in določenih značilnosti drevesa, kot je višina, lahko na poškodovanost posredno ali neposredno vpliva tudi položaj drevesa v sestoji. Posredno vpliva tako, da drevo oblikuje npr. asimetrično krošnjo zaradi razmer, v katerih raste. Tako so najbolj poškodovana drevesa, ki rastejo na gozdnih robovih in imajo asimetrične krošnje, ter drevesa na pobočnih legah. Manj poškodb imajo drevesa, ki rastejo v skupinah, šopih in manjših ali večjih gnezdih. Prav tako so poškodbe prisotne v vseh razvojnih fazah, vendar so najbolj poškodovani sestoji drogovnjaka, še posebno tisti, ki so enomerni in enovrstni (Načrt sanacije gozdov, 2014). V tej raziskavi smo preverili vpliv sestojnega sklepa na poškodbe drevesnih krošenj, kjer smo sklep izrazili z deležem površine, ki ga pokriva vegetacija, ki je višja od 5 m, 10 m ali 15 m. Statistično značilna je bila le povezava v dveh primerih, in sicer pri jelki na ploskvi z velikostjo 500 m², ko je bila upoštevana vegetacija višja od 10 m in 15 m. Gostejši kot je bil sklep, manj so bile poškodovane krošnje dreves.

Pri izračunu razdalj poškodovanosti med dvema oblakoma točk smo izračunali tudi grafične prikaze. Dodatno bi lahko analizirali tudi mesto poškodovanosti krošnje, saj je iz vizualizacije oblaka točk vidno mesto poškodovanosti (v zgornjem, srednjem ali spodnjem delu krošnje). Prav tako je bilo razvidno, ali je poškodovana le posamezna veja ali je bil odlomljen celoten vrh drevesa. Kotar (2005) navaja, da so kritične točke, kjer drevo prenese najmanjšo obremenitev, pri bukvi na dnu krošnje, pri jelki pa pri vrhu. Tako naj bi sneg in žled odlomila vrh pri jelkah. Na terenu in iz grafičnih prikazov nismo opazili odlomljenih vrhov pri jelkah, za razliko od bukev,

kjer je bilo več dreves z odlomljenim vrhom. Prav tako bi lahko raziskavo preprosto nadgradili z analizo simetričnosti krošnje.

5 POVZETEK

Na območju GGE Snežnik, kjer so raziskovalci Gozdarskega inštituta Slovenije leta 2011 začeli aktivnosti v okviru Life+ Projekta ManFor C.BD (Kutnar in sod., 2013), smo na podlagi podatkov laserskega skeniranja vrednotili poškodbe drevesnih krošenj, ki jih je leta 2014 povzročil žled. Na raziskovalnem območju smo po žledolomu izbrali 111 dreves, od tega 65 jelk in 46 bukev. Na terenu smo izmerili prsni premer in višino začetka krošnje drevesa, ki smo jo kasneje odšteli od višine drevesa, ki smo jo izmerili v podatkih laserskega skeniranja. Območje raziskave (70 ha) smo posneli iz helikopterja Eurocopter EC 120B z laserskim skenerjem Riegl LM5600 z relativno horizontalno natančnostjo 10 cm in relativno vertikalno natančnostjo 3 cm. Območje je bilo posneto z gostoto 300 točk/m², in sicer novembra 2011, novembra 2013, aprila 2014 ter oktobra 2014. Za namen te raziskave smo uporabili le podatke iz novembra 2013 in aprila 2014.

V programu ArcMap smo z orodjem Buffer izdelali krošnje ploskve z radijem 10 m okoli vseh izbranih dreves. Z orodjem Extract LAS smo iz celotnega oblaka točk izločili le tisti del podatkov, ki so bili znotraj krošnje ploskve okoli drevesa. Izbranim drevesom smo določili sestojni sklep z digitalnim modelom krošenj (DMK) z velikostjo rastrske celice 0,5 × 0,5 m. Vsakemu drevesu smo določili tri različno velike krošnje ploskve (500 m², 1000 m² in 2000 m²). Nato smo izločili rastrske celice, nižje od izbrane minimalne višine (5 m, 10 m in 15 m). Za vsako ploskev smo dobili delež površine, ki ga pokriva vegetacija, višja od določene minimalne višine. Pred začetkom nadaljnje obdelave smo oblake točk poravnali na isto ravnino z orodjem Cloud Registration v programu CloudCompare. Kot referenčni smo izbrali oblak točk iz leta 2013, oblak točk iz leta 2014 pa smo premaknili. Uporabili smo algoritem ICP (angl. Iterative Closest Point), kjer smo omogočili zavračanje oddaljenih korespondenčnih parov točk. Z orodjem Segment smo obrezali točke,

ki predstavljajo okoliška debela dreves in njihove krošnje tako, da je ostala le krošnja proučevanega drevesa iz obeh let. Med oblaki točk posameznih krošenj smo izračunali razdalje poškodovanosti s funkcijo Compute cloud/cloud distance, ki omogoča izračun razdalj med točkami, ki so si najbližje. Ugotovili smo maksimalne in povprečne razdalje poškodovanosti za posamezno drevo. Za testiranje razlik v poškodovanosti med drevesnimi vrstami smo uporabili Studentov t-test. Izračunali smo 95 % interval zaupanja. Povezanost velikosti drevesa in sestojega sklepa s poškodovanostjo drevesnih krošenj smo analizirali s Pearsonovim koeficientom korelacije.

Preverili smo razlike v poškodovanosti med drevesnima vrstama, odvisnosti med velikostjo drevesa (prsni premer, višina in dolžina krošnje) in poškodbami krošnje ter odvisnost med sklepom in poškodbami krošnje. Bukve so bile statistično značilno bolj poškodovane kot jelke. Statistično značilna je odvisnost med velikostjo drevesa in poškodbami (dolžina krošnje in višina drevesa). Prsni premer drevesa ni vplival na obseg poškodb. Prav tako smo preverili vpliv sklepa krošenj in ocenili, da je vpliv sestojnega sklepa na poškodovanost drevesnih krošenj minimalen, kar pomeni, da je bil statistično značilen le pri jelki na ploskvi, velikosti 500 m².

5 SUMMARY

In the FMU Snežnik area, where the Slovenian Forestry Institute's researchers began the activities in the framework of the Life+ Project ManFor C.BD (Kutnar et al., 2013) in 2011, we evaluated the damage to tree crowns, caused by the ice break in 2014, on the basis of laser scanning data. After the ice break, we selected 111 trees, 65 of which were firs and 46 beeches, in the research area. In the field, we had measured the diameter at breast height and the height of the crown beginning we later counted down from the tree height, measured in the laser scanning data. The research area (70 ha) was recorded from the Eurocopter EC 120B helicopter using Riegl LM5600 laser scanner with relative horizontal accuracy of 10 cm and relative vertical accuracy of 3 cm. The area was recorded with density of 300 points/m² in November 2011,

November 2013, April 2014 and October 2014. We applied only the data of November 2013 and April 2014 for the purpose of this study.

In the ArcMap program we made circular surfaces with 10 m radius around all selected trees using the Buffer tool. With Extract LAS tool we eliminated only the part of the data inside the circular surface around the tree. We determined canopy closure for the selected trees using digital crown model (DCM) with the raster cell size of 0.5 x 0.5 m. We specified three circular surfaces of diverse sizes (500 m², 1,000 m² and 2,000 m²) for every tree. We then eliminated raster cells lower than the selected minimal height (5 m, 10 m and 15 m). We established the share of the surface covered by vegetation, higher of the defined minimal height. Before starting the further processing, we had straightened up the point clouds to the same level using Cloud Registration tool in CloudCompare program. As a reference we selected point cloud of 2013 and moved point cloud of 2014. We applied ICP (Iterative Closest Point) algorithm, where we enabled rejecting the remote correspondence pairs of points.

Using the Segment tool, we cut the points representing surrounding tree trunks and their crowns, so that only the crown of the studied tree from both years was left. Between the point clouds of individual crowns we calculated the damage distances using the Compute cloud/cloud distance function enabling the calculation of the distances between the closest points. We thus established the maximal and mean damage distances for an individual tree. We applied the Student's t-test for testing the differences of damages in diverse tree species. We calculated the 95% confidence interval. We analyzed the connection of tree size and canopy closure with the tree crown damage using Pearson's correlation coefficient.

We tested the differences in damage between the two tree species, the dependencies between the tree size (diameter at breast height, height and length of the crown) and crown damage as well as the dependency between the canopy closure and crown damage. The beech was statistically significantly more damaged than the fir. The dependence between the tree size and the damage

(crown length and tree height) was statistically significant. Diameter and breast height did not affect the damage range. We also tested the impact of crown density and estimated the impact of the canopy closure on the tree crown damage was minimal, which means that it was statistically significant only in fir on a surface size of 500 m².

6 VIRI

6 REFERENCES

- Baša M. 2016. Razvojna dinamika dveh gozdnih rezervatov na območju žledoloma: magistrsko delo. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana, samozal.: 70 str.
- Blanchard S.D., Jakubowski M.K., Kelly M. 2011. Object-based image analysis of downed logs in disturbed forested landscapes using lidar. *Remote sensing*, 3, 2420–2439.
- CloudCompare 2017. <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20%20User%20manual.pdf> (15. 8. 2017)
- Izvedba laserskega skeniranja Slovenije: blok 35 - tehnično poročilo o izdelavi izdelkov. 2015. Ljubljana, Geodetski inštitut Slovenije: 35 str.
- Kopal M. 2015. Vrednotenje obsega žledoloma iz lidarskih podatkov. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, oddelek za gozdarstvo (osebni vir, 23. feb. 2017)
- Kopal M. 2017. Podatki lidarskega snemanja iz leta 2013 in 2014. *Gozdarski inštitut Slovenije*. (osebni vir, februar 2017)
- Kopal M., Triplat M., Krajnc N. 2014. Pregled uporabe zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu. *Gozdarski vestnik*, 74, 5–6: 236–248.
- Kordiš F. 1977. Vitalnost in konkurenca v mešanem gozdu bukve in plemenitih listavcev na rastišču Abieti-Fagetum dinaricum. (Strokovna in znanstvena dela, 56). Ljubljana: Inštitut za gozdno in lesno gospodarstvo pri Biotehniški fakulteti: 125 str.
- Kotar M. 2005. Zgradba, rast in donos gozda na ekoloških in fizioloških osnovah. Ljubljana. Zveza gozdarskih društev Slovenije. Zavod za gozdove Slovenije: 500 str.
- Kutnar L., Simončič P., Kopal M., Ferlan M., De groot M., Kobler A., Čater M., Skudnik M., Sinjur I. 2013. Projekt LIFE+ ManFor C.BD. V: Večnamensko gospodarjenje z gozdom: ogljik, biotska raznovrstnost in socioekonomska blaginja. Vilhar U. (ur.). Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 89–103.
- Lindberg E., Hollaus M., Mücke W., Fransson J.E.S., Pfeifer N. 2013. Detection of lying tree stems from airborne laser scanning data using a line template matching algorithm. *ISPRS annals of the photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences*, II-5/W2: 169–174.
- Marinšek A., Celarc B., Grah A., Kokalj Ž., Nagel T.A., Ogris N., Oštir K., Planinšek Š., Rozenberger D., Veljanovski T., Vochl S., Železnik P., Kobler A. 2015. Žledolom in njegove posledice na razvoj gozdov – pregled dosedanjih znanj. *Gozdarski vestnik*, 73, 9: 392–405.
- Mücke W., Deak B., Schroiff A., Hollaus M., Pfeifer N. 2013. Detection of fallen trees in forested areas using small footprint airborne laser scanning data. *Canadian journal of remote sensing*, 39, 1: 32–40.
- Načrt sanacije gozdov poškodovanih v žledolomu 30. 1.-10. 2. 2014. Zavod za gozdove Slovenije. http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/CE/varstvo/2014Ujma/Nacrt_sanacije_zled_2014.pdf (25. 8. 2017)
- Nagel T.A., Firm D., Rozenberger D., Kopal M. 2016. Patterns and drivers of ice storm damage in temperate forests of Central Europe. *European journal of forest research*, 135: 519–530.
- Nyström M., Holmgren J., Fransson J.E.S., Olsson H. 2014. Detection of windthrown trees using airborne laser scanning. Department of forest resource management, Swedish university of agricultural sciences, *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 30: 21–29.
- Saje R. 2014. Žledolomi v slovenskih gozdovih. *Gozdarski vestnik*, 724: 204–210.
- Sinjur I., Kolšek M., Race M., Vertačnik G. 2010. Žled januarja 2010. *Gozdarski vestnik*, 68, 2: 123–130.
- Tratnik D. 2013. Gradnja tridimenzionalnih modelov predmetov z mobilno platformo in barvno-globinsko kamero: diplomsko delo. (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko). Ljubljana, samozal.: 78 str.
- Vastaranta M., Korpela I., Uotila A., Hovi A., Holopainen M. 2011. Mapping of snow-damaged trees based on bitemporal airborne LiDAR data. *European journal of forest research*, 131: 1217–1228.
- Zhang K., Simard M., Ross M., Rivera-Monroy V.H., Houle P., Ruiz P., Twilley R.R., Whelan K.R.T. 2008. Airborne laser scanning quantification of disturbances from hurricanes and lightning strikes to mangrove forests in everglades national park. *USA Sensors*, 8, 4: 2262–2292.