

UPORABNOST NACIONALNIH PODATKOV LASERSKEGA SKENIRANJA IN CIKLIČNEGA AEROFOTOGRAFIRANJA PRI ZAZNAVANJU GOZDNIH VRZELI

USEFULNESS OF NATIONAL AIRBORNE LASER SCANNING AND AERIAL SURVEY DATA IN FOREST CANOPY GAP DETECTION

Anže Martin Pintar, Mitja Skudnik

UDK: 528.7

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 12. 2. 2024

Sprejeto: 29. 5. 2024

DOI:10.15292/geodetski-vestnik.2024.02.180-193

SCIENTIFIC ARTICLE

Received: 12. 2. 2024

Accepted: 29. 5. 2024

IZVLEČEK

Gozdna tla zastirajo drevesne krošnje in gozdna vrzeli je vsaka večja ali manjša površina tal, ki je ne prekrivajo krošnje zgornjega sloja dreves. Velikost vrzeli vpliva na to, katera drevesna vrsta se bo pomladila, pa tudi na vertikalno in horizontalno strukturo gozda. Na Pohorju (Pahernikova gozdna posest, za katero so značilni gozdovi, v katerih se na majhnih površinah pojavljajo drevesa različnih premerov in starosti) smo analizirali možnosti samodejnega zaznavanja vrzeli na podlagi podatkov Laserskega skeniranja Slovenije (LSS) in Cikličnega aerofotografiranja Slovenije (CAS). Uporabili smo digitalna modela krošenj (DMK), pridobljena iz obeh virov podatkov. Skupna natančnost zaznavanja tudi najmanjših vrzeli (manjših od 50 m²) na podlagi podatkov LSS je znašala 94,4 %, na podlagi podatkov CAS pa 83,1 %. Na podlagi podatkov LSS je mogoče zaznati večje število in površino vrzeli, prav tako so vrzeli, pridobljene na podlagi podatkov LSS, bolj razčlenjene in podolgovate. Zaznavanje vrzeli s podatki CAS in LSS je medsebojno bolj primerljivo pri najmanjših površinah vrzeli 100 m², natančnost zaznave takšnih vrzeli je 85,4 oziroma 94,4 %. Rezultati kažejo, da je ob odsotnosti podatkov LSS uporaba podatkov CAS za določanje vrzeli smiselna na velikopovršinski ravni in pri zaznavanju vrzeli, večjih od 100 m².

ABSTRACT

The forest floor is covered with tree canopy, and the forest canopy gap is a larger or smaller area of the floor that is not covered by the canopy of the dominant tree layer. The size of the gap affects tree species rejuvenation, as well as the vertical and horizontal structure of the forest. In the Pohorje area (Pahernik's forest estate), which is characterized by forests where trees of different diameters and ages occur in small areas, we analyzed the possibilities of automatic gap detection based on data from the Laser Scanning of Slovenia (LSS) and the Cyclic Aerial Survey of Slovenia (CAS). We used Canopy Height Models (CHM) derived from both data sources. The overall detection accuracy even for the smallest gaps (smaller than 50 m²) was 94.4% based on the LSS data and 83.1% based on the CAS data. A larger number and area of gaps can be detected based on the LSS data, and the gaps derived from the LSS data are more disaggregated and elongated. The detection of gaps with CAS data and LSS data is more comparable with a minimum gap area of 100 m²; the accuracy of detecting such gaps is 85.4 and 94.4% respectively. The results of the study show that in the absence of LSS data, the use of CAS data to detect forest canopy gaps on a large scale is useful when gaps with an area of more than 100 m² are detected.

KLJUČNE BESEDE

raznomerni in raznodobni gozdovi, digitalni model krošenj, gozdna vrzel, daljinsko zaznavanje, Lasersko skeniranje Slovenije, Ciklično aerofotografiranje Slovenije

KEY WORDS

uneven-aged forests, canopy height model, forest canopy gap, remote sensing, Laser Scanning of Slovenia, Cyclic Aerial Survey of Slovenia

1 UVOD

Gozdna tla zastirajo drevesne krošnje in gozdna vrzel je vsaka večja ali manjša površina tal, ki je ne prekrivajo krošnje zgornjega sloja dreves (Silva et al., 2019). Vrzeli lahko nastanejo kot rezultat naravnega procesa odmiranja drevja (biotske ali abiotske poškodbe) ali pa kot posledica gospodarjenja z gozdovi. Pri slednjem so običajno oblikovane tako, da posnemajo naravni režim motenj v gozdovih, z željo, da bi dosegli isti končni cilj: razmere za obnovo ali hitrejšo rast novih dreves. Glede na velikost so v literaturi vrzeli razdeljene na tiste, ki izpolnjujejo minimalno površino, ter na majhne in velike. Mejne vrednosti površin so zelo odvisne od vrste gozda in načina gospodarjenja. Tako se med majhne vrzeli uvrščajo tiste, ki so velike med 5 do 500 m² (Král et al., 2014; Nagel in Svoboda, 2008; Rugani et al., 2013; Schütz et al., 2016). Schütz et al. (2016) so predlagali, da bi pri posnemanju naravnih procesov pomlajevanja bukve za najmanjšo površino vrzeli privzeli 100 m², pri skupinskem pomlajevanju pa 500 m². Nagel in Svoboda (2008) sta v jelovo-bukovih gozdovih kot vrzel opredelila površine, večje kot 5 m², vrzeli, velike 100 m², pa sta uvrstila v kategorijo manjših. V bukovih gozdovih so Rugani et al. (2013) ugotovili, da so vrzeli, manjše od 500 m², zelo pomembne pri razvoju sestojev. Král et al. (2014) v evropskih zmernih negospodarjenih gozdovih ugotavljajo najmanjšo povprečno površino optimalnega in stabilnega stadija 250 m².

Pri majhnih vrzelih prodre do tal manj sončne svetlobe, kar omogoča rast klimaksnih vrst. Velika vrzel, napolnjena s sončno svetlobo, pa bo spodbujala rast svetloljubnih in pionirskih vrst. Pri obnovi gozdov je velikost vrzeli pomembna, saj določa, katere vrste se bodo naravno pomladile oziroma katere bodo bolj uspevale v primeru umetne obnove (sadnje ali setve). Vrzeli in njihova velikost imajo torej pomembno vlogo v dinamiki razvoja gozdov. Velikost vrzeli pa ne vpliva samo na drevesno sestavo, marveč tudi na vertikalno in horizontalno strukturo gozda. S heterogenostjo strukture gozdov se izognemo enakemu vzorcu pomlajevanja na velikih površinah in se osredotočamo zgolj na minimalno površino vrzeli. Z več manjšimi vrzelmi namreč nastaja gozd z bolj heterogeno vertikalno in horizontalno strukturo, ki je bolj odporen proti posledicam podnebnih sprememb (Albrich et al., 2020). Mešanje malih in velikih vrzeli v gozdnem prostoru je tudi dober pristop k izboljšanju pestrosti gozdnih habitatov (Schütz et al., 2016).

V Sloveniji v strukturne enote, manjše od sestoja, uvrščamo gnezda (od 0,05 do 0,5 ha), skupine (do 0,05 ha) in šope (vsebujejo nekaj dreves) (Diaci, 2006). Za spremljanje dinamike pomlajevanja sencozdržnih oziroma klimaksnih drevesnih vrst s kartiranjem vrzeli in razvojnih faz so taka izhodišča zelo zahtevna in jih doslej v Sloveniji ni bilo mogoče učinkovito uporabiti v gospodarskih gozdovih pri terenskem delu z običajno tehnologijo, ki jo uporabljajo gozdarski inženirji (Hladnik in Pintar, 2017). Vrzeli lahko zaznamo, kartiramo in jim določimo velikost na podlagi terenskega opisa in meritev ter tudi na podlagi podatkov daljinskega zaznavanja. Ena izmed glavnih prednosti uporabe daljinsko pridobljenih podatkov za zaznavanje gozdnih vrzeli je možnost hitrejšega in bolj ekonomičnega pridobivanja natančnih podatkov za večja območja (Lim et al., 2003).

Predvsem uporaba lidarskih podatkov, zajetih iz zraka (ALS, angl: *airborne laser scanning*), zagotavlja sistematično in zanesljivo zaznavanje in kartiranje vrzeli na večjih območjih (White et al., 2018). Pri zaznavanju vrzeli pa so pomembne tudi spremembe skozi čas in v številnih državah so bila nacionalna lidarska snemanja opravljena enkratno ali pa v daljših časovnih presledkih, medtem ko so aerofotografiranja pogosteje urejena ciklično. Tako je uporaba fotogrametričnega oblaka točk, pridobljenega iz cikličnega

aerofotografiranje, alternativa lidarskim podatkom (White et al., 2018). Trenutno je ena izmed slabosti monitoringa gozdnih sestojev z lidarskimi podatki visoka cena njihovega zbiranja in obdelave (Stepper et al., 2014; Goodbody et al., 2019). Aerofotografiranje so ugodnejša in na mnogih območjih v Evropi so vzpostavili zaporedna ali ciklična aerofotografiranja (Stepper et al., 2014). S samodejnim procesiranjem aerofotografij in z napredkom v računalniški tehnologiji je mogoče iz aerofotografij (Haala, 2013) pridobiti podatke o višini objektov in s tem tudi višine krošenj. Fotogrametrični oblak točk, pridobljen iz aerofotografij s tehnologijo slikovnega ujemanja podatkov (angl. *image matching*), ponazarja zgornji del površja krošenj (Stepper et al., 2014). Višino dreves nad površjem dobimo z odštevanjem digitalnega modela reliefa, ki je bil v Sloveniji narejen iz podatkov laserskega skeniranja (Triglav Čekada in Bric, 2015).

V Sloveniji na nacionalni ravni vrzeli v enodobnih gozdovih, kjer imajo vsa drevesa približno isto starost oziroma so starostne razlike med njimi manjše kot dvajset let (Kotar, 2011), trenutno zaznavamo samo na podlagi sestojne karte Zavoda za gozdove Slovenije v okviru razvojne faze mladovje. V raznodobnih gozdovih pa vrzeli sploh ne zaznavamo, saj so v njih na zelo majhni površini vse razvojne faze in posledično mladovij tam posebej ne evidentiramo (Veselič, 2017). Prav tako sestojev, manjših od 0,5 ha, praviloma ne razmejujemo, kar lahko vodi v zmanjševanje deleža na primer pomladitvenih jeder, čeprav se mozaično pojavljajo v večjem številu (Skudnik, 2007). Ob primanjkovanju mladih gozdov in pomladitvenih površin v slovenskih gozdovih (Veselič, 2017) je poznavanje njihove lokacije zelo pomembno zaradi možnosti boljšega gospodarjenja.

V večini preteklih študij so za zaznavanje vrzeli na podlagi podatkov daljinskega zaznavanja uporabili digitalni model krošenj (DMK) iz lidarskih podatkov (Vehmas et al., 2011; Vepakomma et al., 2012; Bonnet et al., 2015). Zelo malo je študij (Zielewska-Büttner et al., 2016; White et al., 2018), v katerih bi analizirali uporabo DMK, pridobljen s tehnologijo slikovnega ujemanja oziroma njegovo primerjavo z DMK, pridobljenim iz lidarskega snemanja za kartiranje vrzeli, sploh pa v raznodobnih gozdovih zmerne pasu. Ti gozdovi so zaradi trajnostnega in sonaravnega načina gospodarjenja pogosti v Sloveniji in postajajo vse pogostejši tudi v preostalih delih sveta (Mason et al., 2021), saj so raznodobni gozdovi odpornejši proti posledicam podnebnih sprememb (Lafond et al., 2014) s svojo raznomerno strukturo (drevesa različnih premerov in višin na majhni površini), ki omogoča stalno pokrovnost pomladka (skupine mladih dreves, na območjih, kjer so bila odstranjena odrasla drevesa) v sestojih (O'hara et al., 2007). Študij, ki ocenjujejo hkratno uporabo prosto dostopnih nacionalnih lidarskih podatkov in podatkov cikličnih aerofotografiranj za oceno kartiranja vrzeli, nismo zaznali. Rezultati bodo pripomogli k boljšemu razumevanju pojavljanja manjših vrzeli, ki so bile doslej velikokrat prezrte.

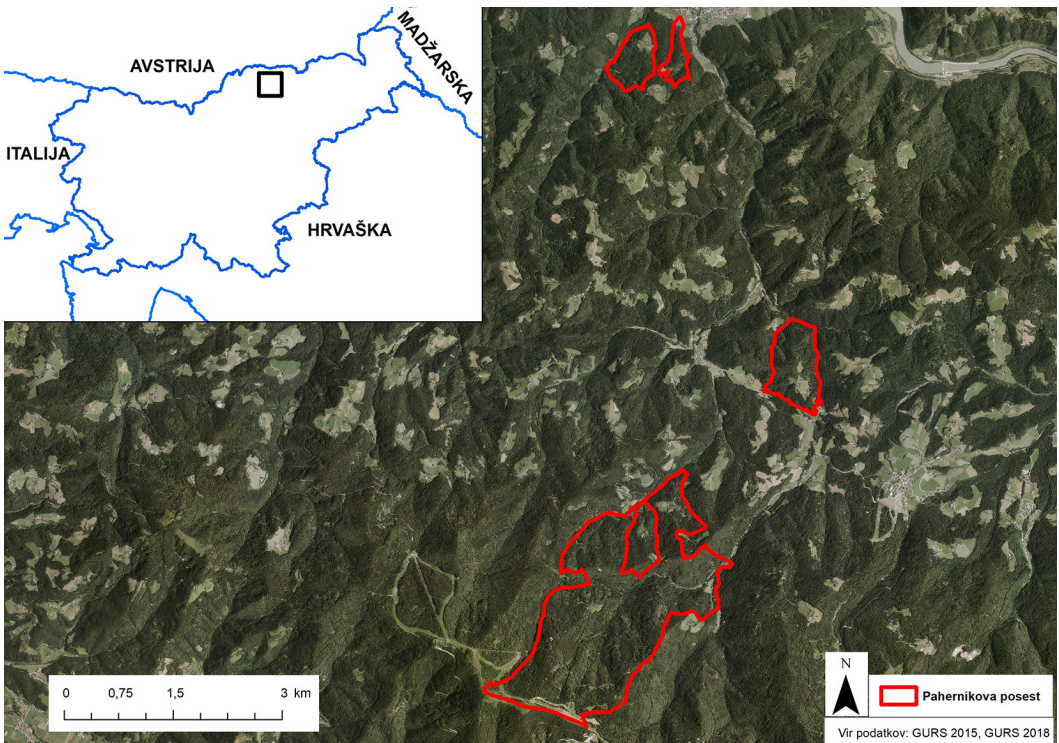
Za analiziranje možnosti zaznavanja in spremljanja pojavljanja manjših vrzeli oziroma površin pomladitvenih jeder, ki so rezultat malopovršinskega gospodarjenja z gozdovi (gozd se obnavlja v majhnih vrzelih), smo uporabili podatke, ki so na voljo za celotno državo – podatke iz projekta Lasersko skeniranje Slovenije (LSS) in podatke iz projekta Ciklično aerofotografiranje Slovenije (CAS). Namen dela je preveriti kakovost zaznavanja vrzeli z uporabo digitalnih modelov krošenj, pridobljenih iz podatkov obeh projektov (DMK_{LSS} in DMK_{CAS}), pri minimalni površini 5 m² in preveriti, katera minimalna površina vrzeli, narejenih z DMK_{CAS} , daje bolj primerljive zaznavanje vrzeli z uporabo DMK_{CAS} kot pri DMK_{LSS} na območju raznomernih gozdov.

2 METODE

2.1 Območje raziskave

Kartiranje vrzeli na podlagi DMK_{LSS} in DMK_{CAS} smo analizirali na območju Pahernikove gozdne posesti, ki se razteza v severovzhodnem delu Slovenije na Dravskem Pohorju, in sicer med reko Dravo na severu in grebenom Pohorja na jugu (slika 1). Območje raziskave smo izbrali zaradi tamkajšnje raznomerne in raznodobne strukture gozdov (Pintar in Hladnik, 2018; Sušek, 2005).

Na območju je prevladujoča drevesna vrsta smreka (*Picea abies*); (več kot 60 % lesne zaloge). Več kot 10 % lesne zaloge dosegata še jelka (*Abies alba*) in bukev (*Fagus sylvatica*) (Pintar in Hladnik, 2018). Površina gozdov na analiziranem območju znaša 570,1 ha. Gozdno masko smo povzeli po evidenci dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč (MKGP, 2015).



Slika 1: Pahernikova posest, ki je bila proučevano območje analize pojavljanja vrzeli.

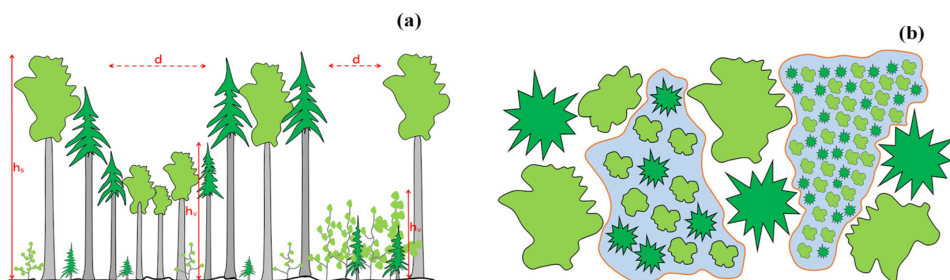
2.2 Izdelava digitalnega modela krošenj

Za analizo pojavljanja vrzeli na proučevanem območju smo uporabili DMK prostorske ločljivosti 1 m (Kobler, 2015), pridobljen iz lidarskih podatkov projekta Lasersko skeniranje Slovenije (GURS, 2015) (slika 3a), ki je bilo na proučevanem območju opravljeno konec septembra in začetek oktobra 2014 (Triglav Čekada in Bric, 2015). Ločeno smo DMK prostorske ločljivosti 1 m izračunali tudi iz podatkov projekta Cikličnega aerofotografiranja Slovenije iz leta 2019 (GURS, 2019) (slika 3b). Ciklično aerofotografiranje je bilo opravljeno med

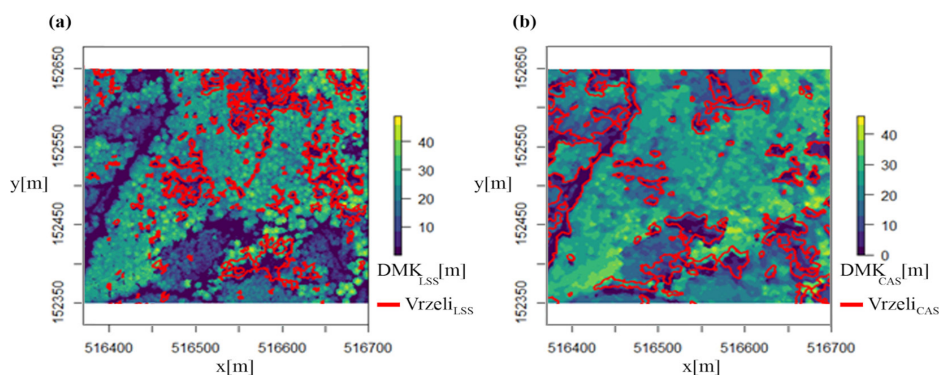
olistanostjo dreves v letu 2019. Od digitalnega modela površja, pridobljenega iz podatkov CAS, smo odšteli digitalni model reliefa iz lidarskih podatkov iz leta 2014 in tako pridobili digitalni model krošenj CAS 2019. Ker sta oba vira podatkov iz različnih obdobij, smo predhodno na podlagi vizualnega pregleda DOF 2019 in 2014 preverili in ugotovili, da na območju Pahernikove gozdne posesti ni bilo opravljenih velikopovršinskih posekov in ugotovljenih velikopovršinskih naravnih motenj med lidarskim snemanjem in cikličnim aerofotografiranjem v obdobju 2014–2019. Na območju posesti pa je redno potekala malopovršinska sečnja v skladu s Posestnim načrtom za gozdove Pahernikove ustanove 2014–2023 (ZGS, 2015), vpliv katere bomo pojasnili v nadaljevanju.

2.3 Zaznavanje gozdnih vrzeli

Vrzeli smo kartirali v programskem okolju R z uporabo knjižnice ForestGapR (Silva et al., 2019) – primer kartiranja je prikazan na sliki 3. Maksimalno višino vrzeli smo določili na 10 m, minimalno površino 5 m² ter maksimalno 20.000 m². Mejne vrednosti površin smo povzeli po Nagel in Svoboda (2008) ter White et al. (2018). Maksimalno mejno vrednost višin vrzeli pa smo povzeli na podlagi predloga razvijalcev ForestGapR in na podlagi višine spodnjega pasu dreves v gozdovih zmernega pasu (Rugani et al., 2013). Za analizo primernosti uporabe DMK_{CAS} smo postopno povečevali minimalno površino vrzeli (korak 10 m²) in jo primerjali z DMK_{LSS}. Shematski prikaz vrzeli in njihovih značilnosti je prikazan na sliki 2.



Slika 2: Shematski prikaz vertikalne (a) in horizontalne strukture gozda (b), v katerem sta dve vrzeli z označenimi v članku obravnavanimi značilnostmi (h_s – zgornja višina sestoja, h_v – višina vrzeli, d – širina vrzeli). Indeks oblike se izračuna iz obsega in površine (modro) vrzeli (rdeča črta) (b).



Slika 3: Zaznavanje gozdnih vrzeli na podlagi DMK_{LSS} (a) in DMK_{CAS} (b) pri minimalni površini 5 m². Pri DMK_{LSS} (a) podolgovate vrzeli, večje od 2 ha, ki predstavljajo gozdne ceste, niso bile izločene zaradi upoštevanja maksimalne površine.

2.4 Značilnosti samodejno zaznanih vrzeli

Za vrzeli, pridobljene z DMK_{LSS} in DMK_{CAS} , smo predstavili parameter λ z zeta porazdelitvijo, ki ponazarja magnitudo motenj v gozdu in velikost vrzeli (Silva et al., 2019, Asner et al., 2013). Vrednosti, večje ali enake 2, ponazarjajo gozdove, v katerih prevladujejo manjše vrzeli z manj intenzivnimi motnjami, medtem ko manjše vrednosti ponazarjajo pojavljanje večjih vrzeli, povezanih z mortaliteto oziroma posekom večjih skupin dreves oziroma celotnega sestoja (White et al., 2008; Asner et al., 2013).

$$f(k) = \frac{k^{-\lambda}}{\zeta(\lambda)} \tag{1}$$

Za oceno kompleksnosti meja vrzeli oziroma oblike vrzeli smo izračunali indeks oblike. Izračunan je bil na podlagi normaliziranega razmerja med obsegom vrzeli in površino vrzeli. Indeks oblike popolnoma okrogle vrzeli znaša 1 (White et al., 2008; Asner et al., 2013).

$$indeks\ oblike = \frac{obseg}{2 * (\pi * površina)^{0,5}} \tag{2}$$

Na podlagi vrednosti pikselov v posamezni vrzeli smo izračunali Ginijev koeficient višine strehe vrzeli (Valbuena et al., 2017; Silva et al., 2019) za vrzeli, kartirane na podlagi DMK_{LSS} in DMK_{CAS} . Ginijev koeficient (Gini, 1921) je mera heterogenosti z vrednostmi med 0 in 1. Ponazarja odmik od popolne enakosti višine strehe vrzeli, ki bi imela vrednost 0, pri čemer je spremenljivka h_j vrednost piksla v rangju j , j je rang piksla v padajoči razvrstitvi od 1 in n je skupno število pikselov.

$$Ginijev\ koeficient = \frac{\sum_{j=1}^n (2j - n - 1)h_j}{\sum_{j=1}^n h_j(n - 1)} \tag{3}$$

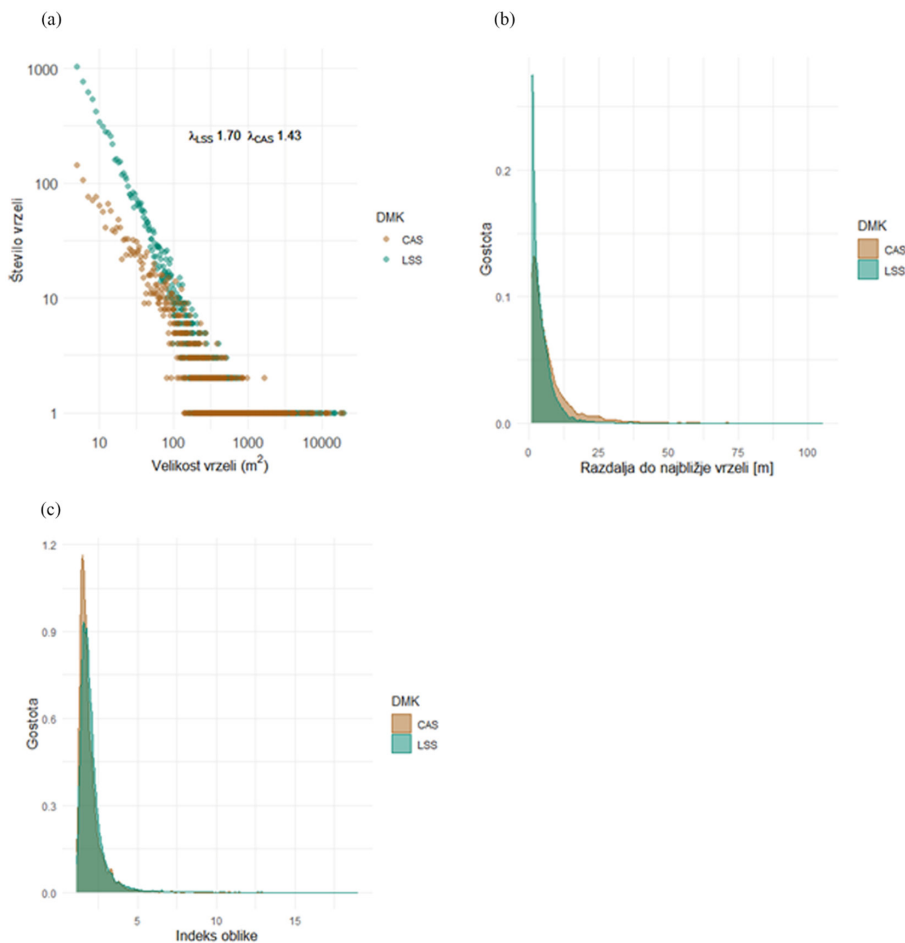
2.5 Validacija kartiranih vrzeli

Vrzeli, pridobljene iz DMK_{LSS} in DMK_{CAS} , smo validirali na podlagi vizualne slikovne interpretacije na območju sistematične mreže 90 stalnih vzorčnih ploskev (250 × 250 m), ki so predstavljale vzorčne točke, in jo je vzpostavil Zavod za gozdove Slovenije (ZGS, 2015). Validacija je bila na vsaki vzorčni točki najprej opravljena posebej za vrzeli, pridobljene iz DMK_{LSS} , in nato za vrzeli, pridobljene z DMK_{CAS} . Validacija je potekala na podlagi DMK_{LSS} in 25 cm ortofoto posnetkov iz 2014 in 2019, ki so jih za validacijo kartiranih vrzeli na podlagi obeh DMK uporabili tudi White et al. (2018). Za vsako vzorčno točko smo na podlagi slikovne interpretacije določili, ali leži v vrzeli ali na območju sklenjenega sestoja, in jo v nadaljevanju primerjali z rezultati kartiranih vrzeli po DMK_{LSS} in DMK_{CAS} . Napaka opustitve (angl. *omission error*) in napaka določitve (angl. *commission error*) za vrzeli in območja brez vrzeli (sklenjen gozdni sestoj) in skupna natančnost so bile izračunane na podlagi matrike napak (Morgan in Savitsky, 1998). Napaka opustitve je enaka deležu vzorčnih točk, ki jih je samodejno zaznavanje uvrstilo med sklenjen sestoj, izmed vseh vzorčnih točk, ki smo jih na podlagi slikovne interpretacije uvrstili med vrzeli. Napaka napačne določitve je enaka deležu vzorčnih točk, ki smo jih na podlagi slikovne interpretacije uvrstili med sklenjen sestoj, izmed vseh vzorčnih točk, ki jih je samodejno zaznavanje uvrstilo med vrzeli.

3 REZULTATI

3.1 Zaznavanje in značilnosti gozdnih vrzeli pri minimalni velikosti vrzeli 5 m²

Na podlagi DMK_{LSS} smo pri uporabi minimalne površine 5 m² za študijsko območje dobili 9855 vrzeli, medtem ko jih je bilo pri DMK_{CAS} 3127 (slika 4a, preglednica 1). Povprečna razdalja do najbližje vrzeli je za 3 m nižja pri vrzelih, kartiranih na podlagi LSS, kot pri CAS. Površina vrzeli, kartiranih po DMK_{LSS} , znaša 98,5 ha, površina vrzeli, kartiranih po DMK_{CAS} , pa 73,9 ha. Skupna površina vrzeli, ki so bile kartirane tako pri DMK_{LSS} kot pri DMK_{CAS} hkrati, znaša 38,0 ha, kar pomeni 6,7 % površine celotne gozdne posesti. Vrzeli, pridobljene na podlagi DMK_{LSS} , pokrivajo 17,3 % površine celotne posesti, vrzeli, kartirane na podlagi DMK_{CAS} , pa 13,0 % površine (preglednica 1). Vrzeli, kartirane na podlagi DMK_{LSS} , so bolj razčlenjene in podolgovate kot vrzeli, kartirane na podlagi DMK_{CAS} (slika 6), kar se posledično pokaže kot višji indeks oblike pri vrzelih DMK_{LSS} (2,10) kot pri vrzelih DMK_{CAS} (1,91).

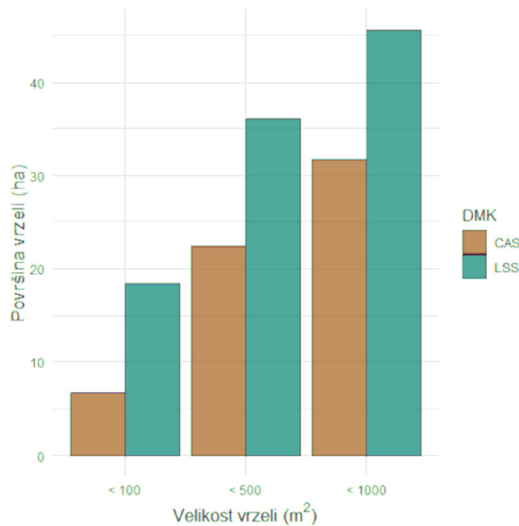


Slika 4: Porazdelitev števila vrzeli po razredih površine, kartiranih po DMK_{LSS} in DMK_{CAS} (a), razdalja do najbližje vrzeli (b) in indeks oblike vrzeli (c), pridobljenih z DMK_{LSS} in DMK_{CAS} , pri minimalni površini zaznavanja 5 m².

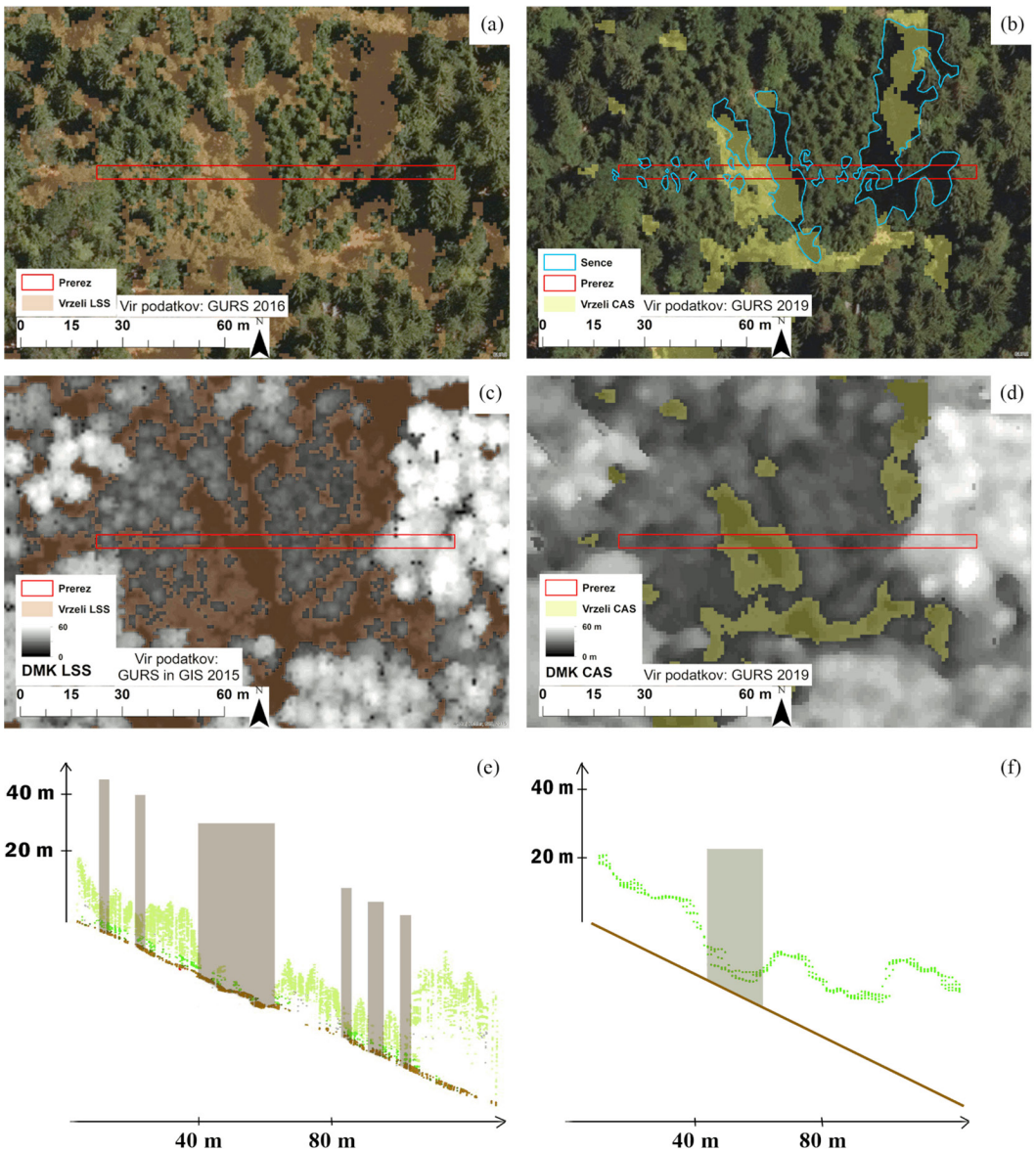
Preglednica 1: Statistike vrzeli na območju Pahernikove gozdne posesti za DMK_{LSS} 2014 in DMK_{CAS} 2019 pri minimalni površini zaznavanja 5 m²

	Število vrzeli [št.]	Površina (povprečje ± SD) [m ²]	Absolutna površina [ha]	Ginijev koeficient (povprečje ± SD)	Indeks oblike (povprečje ± SD)	Razdalja do najbližje vrzeli (povprečje ± SD) [m]
DMK _{LSS} 2014	9855	100,0 ± 589,9	98,5	0,37 ± 0,21	2,10 ± 1,06	4,1 ± 4,3
DMK _{CAS} 2019	3127	236,2 ± 868,8	73,9	0,20 ± 0,16	1,91 ± 0,75	7,1 ± 8,3

Pri DMK_{LSS} znaša površina vrzeli, manjših od 100 m², 18,4 ha, manjših od 500 m² 36,0 ha, manjših od 1000 m² pa 45,6 ha, pri DMK_{CAS} pa 6,7 ha, 22,4 ha in 31,7 ha (slika 5). Višjo vrednost λ in indeksa oblike imajo vrzeli, pridobljene na podlagi DMK_{LSS} (slika 4a, preglednica 1). Povprečna površina vrzeli je pri DMK_{LSS} 2,4-krat manjša kot pri DMK_{CAS}.



Slika 5: Skupna površina kartiranih vrzeli po DMK_{LSS} in DMK_{CAS} glede na maksimalno velikost vrzeli (100, 500 in 1000 m²).



Slika 6: Prikaz vrzeli za isti del analiziranega območja, kartiranih na podlagi DMK_{LSS} (a, c) in DMK_{CAS} (b, d) zgoraj), pri minimalni površini zaznavanja 5 m². Prikazane so tudi sence (modri poligoni), ki so vsaj deloma znotraj prečnega prereza (b) in so vplivale na izdelavo DMK_{CAS} , in prečni prerez oblakov točk lidarskih podatkov (e) in podatkov CAS (f) s prikazanimi zaznanimi vrzelmi (rumenorjavi večkotniki).

3.2 Vpliv povečanja minimalne površine vrzeli na njihovo zaznavanje

Vpliv izbire minimalne površine vrzeli na njihovo zaznavanje iz DMK_{CAS} in DMK_{LSS} v raznomernih gozdovih kaže, da se z večanjem minimalne površine zmanjšujejo razlike v številu zaznanih vrzeli. Če je minimalna površina zaznavanja vrzeli 50 m², jih iz DMK_{CAS} zaznamo za 29 % manj kot pa iz DMK_{LSS} .

Če minimalno površino povečamo na 150 m², jih glede na število zaznamo iz DMK_{CAS} v primerjavi z DMK_{LSS} samo še 8 % manj (preglednica 2). Pri povečanju minimalne površine vrzeli na 50 m² je bilo na podlagi DMK_{LSS} in DMK_{CAS} kartirano skupno 35,6 ha vrzeli, pri povečanju na 100 m² 33,1 ha vrzeli, pri povečanju na 150 m² pa 30,9 ha vrzeli. Pri povečanju minimalne površine zaznavanja se indeks oblike vrzeli povečuje, in sicer bolj intenzivno za vrzeli, zaznane na podlagi DMK_{LSS}, medtem ko se razlika v številu zaznanih vrzeli zmanjšuje (preglednica 2).

Najmanjša razlika med povprečno površino vrzeli med DMK_{LSS} in DMK_{CAS} je pri minimalni površini zaznavanja 100 m². Ginijev koeficient je višji pri DMK_{LSS} in je pri povečanju minimalne površine zaznavanja vrzeli razmeroma stabilen. Najmanjša razlika med številom in površino zaznanih vrzeli med DMK_{LSS} in DMK_{CAS} je pri minimalni površini zaznavanja 150 m² (preglednica 2).

Preglednica 2: Statistike vrzeli na območju Pahernikove gozdne posesti za DMK_{LSS} 2014 in DMK_{CAS} 2019 pri minimalnih površinah zaznavanja 50, 100 in 150 m²

Min. upoštevana površina vrzeli	DMK	Število vrzeli [št.]	Povprečna površina [m ²]	Absolutna površina [ha]	Ginijev koeficient	Indeks oblike
50 m ²	LSS	2115	410,40 ± 1224,20	86,8	0,47 ± 0,17	3,25 ± 1,75
	CAS	1506 (-29 %)	469,77 ± 1209,34	70,7	0,27 ± 0,14	2,27 ± 0,90
100 m ²	LSS	1162	689,71 ± 1598,56	80,1	0,49 ± 0,15	3,94 ± 2,08
	CAS	995 (-14 %)	674,61 ± 1445,84	67,1	0,30 ± 0,13	2,52 ± 1,00
150 m ²	LSS	803	943,52 ± 1868,26	75,8	0,50 ± 0,14	4,46 ± 2,29
	CAS	743 (-8 %)	871,24 ± 1639,25	63,9	0,31 ± 0,13	2,73 ± 1,07

3.3 Validacija kartiranih vrzeli

Skupna natančnost kartiranja vrzeli pri minimalni površini 5 m² je višja pri DMK_{LSS} in znaša 94,4 %, kar je za 11,3 % višje kot pri DMK_{CAS} (preglednica 3). Skupna natančnost se z večanjem minimalne površine zaznavanja povečuje pri vrzelih, zaznanih na podlagi DMK_{CAS}, medtem ko pri DMK_{LSS} ostaja z večanjem minimalne površine na isti ravni. Pri zaznavanju vrzeli je tako pri DMK_{LSS} kot pri DMK_{CAS} višja napaka opustitve. Slednja je zelo visoka pri DMK_{CAS} in znaša od 47,6 do 56,0 %. Pri zaznavanju območij brez vrzeli je bila napaka opustitve nizka, višja pa je bila napaka določitve, pri DMK_{CAS} je znašala od 14,1 do 18,2 % in je bila za od 8,5 do 12,3 % višja kot pri DMK_{LSS}.

Preglednica 3: Rezultati validacije zaznavanja vrzeli pri različnih minimalnih površinah

	Skupna natančnost (%)	Vrzel		Ni vrzeli	
		Napaka opustitve (angl. <i>omission error</i>) (%)	Napaka določitve (angl. <i>commission error</i>) (%)	Napaka opustitve (angl. <i>omission error</i>) (%)	Napaka določitve (angl. <i>commission error</i>) (%)
DMK _{LSS} 5m ²	94,4	16,7	4,8	1,5	5,9
DMK _{CAS} 5 m ²	83,1	56,0	8,3	1,6	18,2
DMK _{LSS} 50/100 m ²	94,4	18,2	5,3	1,5	5,7
DMK _{CAS} 50/100 m ²	85,4	54,5	8,3	1,5	15,6
DMK _{LSS} 150 m ²	94,4	20,0	5,9	1,4	5,6
DMK _{CAS} 150 m ²	86,5	47,6	9,1	1,5	14,1

4 RAZPRAVA

V delu smo za strukturno pestre gozdove primerjali možnosti samodejnega zaznavanja vrzeli s podatki digitalnega modela krošenj, pridobljenega iz laserskega skeniranja in cikličnega aerofotografiranja Slovenije. Uporaba DMK_{LSS} nam omogoča natančnejšo zaznavo vrzeli, manjših od 100 m^2 . Zaznavanje vrzeli s podatki DMK_{CAS} postane primerljivo zaznavanju z DMK_{LSS} pri minimalni površini zaznavanja 100 m^2 , saj je skupna površina zaznanih vrzeli z DMK_{LSS} in DMK_{CAS} pri minimalni površini 100 m^2 še vedno visoka in znaša $33,1 \text{ ha}$. Prav tako sta si povprečni površini vrzeli najmanj različni med DMK_{LSS} in DMK_{CAS} pri minimalni površini zaznavanja vrzeli 100 m^2 in tudi skupno število zaznanih vrzeli je v istem velikostnem razredu (preglednica 2). Zaznavanje vrzeli, manjših od 500 m^2 , je smiselno, saj so vrzeli, manjše od 500 m^2 , pomembne pri razvoju sestojev (Rugani et al., 2013; Schütz et al., 2016), sploh na območjih raznodobnih in raznomernih gozdov, ki so značilna za Pahernikovo gozdno posest (Pintar in Hladnik, 2018). Minimalna površina vrzeli, ki jo zaznamo s CAS, hkrati pomeni nadaljnje možnosti uporabe podatkov DMK_{CAS} za zaznavanje poseka v prihodnje, tako da bomo posek v primeru, da bo opravljen v obdobju med dvema cikličnima aerofotografiranjema na površini, večji kot 100 m^2 , lahko zaznali tudi samo z analizo DMK_{CAS} . Minimalno površino zaznavanja vrzeli 100 m^2 podpira tudi dejstvo, da je površina vrzeli, manjših kot 100 m^2 , veliko večja pri zaznavi z DMK_{LSS} ($18,4 \text{ ha}$) kot pri DMK_{CAS} ($6,7 \text{ ha}$), kar nakazuje na izpustitev številnih kartiranih vrzeli, manjših kot 100 m^2 pri zaznavi z DMK_{CAS} . Pri zaznavanju vrzeli z DMK_{CAS} se moramo zavedati tudi vpliva senc (slika 6b) in zastiranja odraslih dreves na izdelavo DMK_{CAS} , ki so ga zaznali tudi na primer White et al. (2018), tako da so vrzeli, zaznane z DMK_{CAS} , manjše in nekoliko ožje kot realno. Podrobnejše zaznavanje vrzeli z DMK , pridobljenim iz lidarskega snemanja, kot tistim, pridobljenim iz stereofotogrametrije, so ugotovili tudi Vastaranta et al. (2013). Sam vpliv senc in zastiranja odraslih dreves smo zaznali tudi pri naši analizi, saj imajo vrzeli, pridobljene iz DMK_{CAS} , nižji indeks oblike kot vrzeli DMK_{LSS} , kar pomeni, da so vrzeli, pridobljene iz DMK_{LSS} , lahko tudi ožje in daljše kot vrzeli, kartirane iz DMK_{LSS} (preglednica 1, slika 6). To pojasnjuje tudi večja povprečna površina vrzeli pri minimalni površini zaznavanja 5 m^2 , ki pri DMK_{CAS} znaša $236,2 \text{ ha}$, pri DMK_{LSS} pa $100,0 \text{ ha}$. Tako ugotavljamo, da ima na zaznavanje vrzeli z DMK_{CAS} poleg minimalne površine vpliv tudi širina vrzeli.

Nizke vrednosti Ginijevega koeficienta pri obeh načinih kartiranja vrzeli nakazujejo, da so v posamezni vrzeli razlike v višini vegetacije razmeroma majhne. Nižje vrednosti parametra λ , kot bi jih lahko pričakovali za gozdove, kjer se gospodari malopovršinsko, lahko pripišemo veliki odprtosti gozdov z gozdnimi cestami in gozdnimi vlakami, ki so tudi del gozdnega prostora in so bile prav tako zajete v kartiranje vrzeli. Nižjo vrednost parametra λ pri vrzelih, kartiranih z DMK_{CAS} , pojasnjuje tudi manjše število kartiranih manjših vrzeli zaradi vpliva senc in zastiranja odraslih dreves. Višji indeks oblike, predvsem pri vrzelih, kartiranih z DMK_{LSS} , nakazuje na razčlenjene in podolgovate vrzeli na analiziranem območju.

Višja natančnost določitve vrzeli je bila ocenjena pri DMK_{LSS} , in sicer $94,4 \%$, pri DMK_{CAS} pa je bila natančnost od $83,1 \%$ do $86,5 \%$ pri višanju minimalne površine zaznavanja vrzeli. Višjo natančnost določitve pri lidarskih podatkih so ugotovili tudi White et al. (2018). Njihova ($96,5 \%$) in naša natančnost kartiranja vrzeli iz lidarskih podatkov sta primerljivi, medtem ko je bila natančnost določitve pri uporabi DMK iz aerofotografij nižja – $59,5 \%$ (White et al., 2018). Pri tipu napake po velikosti vzbuja pozornost napaka opustitve pri določitvi vrzeli na podlagi DMK_{CAS} od $47,6$ do $56,0 \%$. Veliko napako opustitve pri določanju vrzeli z DMK , pridobljenim iz aerofotografij, so zaznali tudi White et al. (2018) in Zielewska

-Büttner et al. (2016).

Med lidarskim snemanjem in cikličnim aerofotografiranjem preučevanega območja je preteklo pet let, saj je bilo prvo opravljeno v letu 2014, drugo pa v letu 2019. Ker sta vira podatkov iz različnih obdobj, smo predhodno na podlagi vizualnega pregleda DOF 2019 in 2014 ugotovili, da v tem obdobju na območju Pahernikove gozdne posesti ni bilo opravljenih velikopovršinskih posekov in ugotovljenih velikopovršinskih naravnih motenj. Rast dreves v vrzelih ni bistveno vplivala na zaznavanje vrzeli med letoma 2014 in 2019, saj višinska rast na primer smreke v enem vegetacijskem obdobju na 840 m nadmorske višine znaša med 28 in 40 cm (Kotar, 2011), za zgornjo mejo vrzeli pa smo določili višino 10 m. Na preučevanem območju se je redno izvajala malopovršinska sečnja v skladu s Posestnim načrtom za gozdove Pahernikove ustanove 2014–2023 (ZGS, 2015), rezultati katere bi se morali predvidoma izraziti v večjem številu majhnih vrzeli, zaznanih z DMK_{CAS} 2019, česar nismo zaznali. To tudi potrjuje večjo primernost lidarskih podatkov za zaznavanje manjših vrzeli in da sečnja ni bistveno vplivala na rezultate primerjave DMK_{LSS} in DMK_{CAS} , cilj katere je bil prikaz primernosti uporabe obeh virov nacionalnih prosto dostopnih podatkov za kartiranje vrzeli vseh velikosti.

Lidarsko snemanje na območju Pahernikove gozdne posesti je bilo opravljeno jeseni 2014, ko so bila na večini obravnavanega območja drevesa olistana. Na južnem delu območja se je na višjih nadmorskih višinah že lahko začel proces odpadanja listja, kar bi lahko vplivalo na več zaznanih vrzeli na podlagi DMK_{LSS} na teh območjih. Predvidevamo, da je vpliv odpadanja listov na zaznavanje vrzeli na podlagi DMK_{LSS} na višjih nadmorskih višinah posesti majhen. To pojasnjujemo z dejstvom, da se na primerljivi nadmorskih višinah začne proces rumenenja listov konec septembra in v začetku oktobra (Čufar et al., 2012; Vilhar et al., 2013) in da je bila med snemanjem večina listja še prisotna na drevesih ter da na višjih nadmorskih višinah posesti prevladujejo iglavci (Pintar in Hladnik, 2019).

Ciklično aerofotografiranje je bilo opravljeno v obdobju popolne olistanosti dreves. Prihodnja nacionalna lidarska snemanja bodo praviloma potekala, ko bodo drevesa neolistana, medtem ko bodo ciklična aerofotografiranja praviloma opravljena med olistanostjo dreves (GURS, 2024). Snemanje zunaj časa olistanosti dreves je z vidika zaznavanja vrzeli manj ugodno, saj je zaznavanje pokrovnosti gozdne vegetacije podrobnejše in natančnejše med olistanostjo dreves (White et al., 2015). Tako bo uporaba DMK_{CAS} smiselna tudi v prihodnje, če ne bo na voljo ažurnih lidarskih podatkov. Predvidevamo lahko, da bodo lidarska snemanja potekala tudi v daljšem časovnem obdobju kot ciklična aerofotografiranja, ki imajo cikel snemanja tri leta.

Navkljub omejitvam uporabe DMK_{CAS} za določanje vrzeli je njegova uporaba smiselna na velikopovršinski ravni, ko lidarskih snemanj ni, in ko ni potreb po zaznavanju malih vrzeli, manjših od 100 m². Z ekološkega vidika zaznavanja vrzeli je to nekoliko slabše oziroma manj primerno, vendar bi z vidika gozdnogospodarskega načrtovanja za večja področja kartiranje z DMK_{CAS} popolnoma zadostovalo.

Zahvala

Delo je nastalo v okviru študija prvega avtorja na doktorskem študijskem programu Bioznanosti, ki sta ga financirala Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije in Pahernikova ustanova, ter v okviru raziskovalnega programa P4-0107 Gozdna biologija, ekologija in tehnologija, razvojnega stebra stabilnega financiranja Gozdarskega inštituta Slovenije ter raziskovalnega projekta J2-3055 ROVI

– Združevanje in obdelava radarskih in optičnih časovnih vrst satelitskih posnetkov za spremljanje naravnega okolja, financiranih s strani Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije.

Zahvaljujemo se Andreju Grah in Juretu Žlogarju za pomoč pri pripravi slik. Prav tako se zahvaljujemo anonimnima recenzentoma, ki sta ključno pripomogla k izboljšavi članka.

Viri:

- Albrich, K., Rammer, W., Turner, M. G., Ratajczak, Z., Brazionas, K. H., Hansen, W. D., Seidl, R. (2020). Simulating forest resilience: A review. *Global Ecology and Biogeography*, 29 (12), 2082–2096. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.13197>
- Asner, G. P., Kellner, J. R., Kennedy-Bowdoin, T., Knapp, D. E., Anderson, C., Martin, R. E. (2013). Forest Canopy Gap Distributions in the Southern Peruvian Amazon. *PLOS ONE*, 8 (4), e60875. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060875>
- Bonnet, S., Gaulton, R., Lehaire, F., Lejeune, P. (2015). Canopy Gap Mapping from Airborne Laser Scanning: An Assessment of the Positional and Geometrical Accuracy. *Remote Sensing*, 7 (9), 11267–11294. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70911267>
- Čufar, K., De Luis, M., Sz, M. A., Črepinšek, Z., Kajfež-Bogataj, L. (2012). Temporal shifts in leaf phenology of beech (*Fagus sylvatica*) depend on elevation. *Trees*, 26 (4), 1091–1100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0686-7>
- Diaci, J. (2006). Gojenje gozdov: pragozdovi, sestoji, vrstni, načrtovanje, izbrana poglavja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 348 str.
- Gini, C. (1921). Measurement of Inequality of Incomes. *The Economic Journal*, 31 (121), 124–126. DOI: <https://doi.org/10.2307/2223319>
- Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., White, J. C. (2019). Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports*, 5 (2), 55–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>
- GURS (2015). Podatki Laserskega skeniranja Slovenije. Geodetska uprava Republike Slovenije.
- GURS (2024). Daljinsko zaznavanje. Geodetska uprava Republike Slovenije. <https://www.e-prostor.gov.si/podrocja/drzavni-topografski-sistem/daljinsko-zaznavanje/>, pridobljeno 29. 5. 2024
- GURS (2019). Podatki Cikličnega aerosnemanja Slovenije. Geodetska uprava Republike Slovenije.
- Haala, N. (2013). The landscape image matching algorithms. V: *Proceedings of the 54th Photogrammetric Week*, Stuttgart, Germany, Wichmann Verlag, 271–284.
- Hladnik, D., Pintar, A. M. (2017). Ocena sestojne zgradbe na območju Krakovskega pragozdnega rezervata s segmentacijo podatkov laserskega skeniranja. *Gozdarski vestnik*, 75 (7-8), 313–327.
- Kobler, A. (2015). Digitalni model krošenj iz podatkov Laserskega skeniranja Slovenije. Gozdarski inštitut Slovenije.
- Kotar, M. (2011). Zgradba, rast in donos gozda na ekoloških in fizioloških osnovah. Ljubljana, Zveza gozdarskih društev Slovenije in Zavod za gozdove Slovenije, 500 str.
- Král, K., McMahon, S. M., Janík, D., Adam, D., Vrška, T. (2014). Patch mosaic of developmental stages in central European natural forests along vegetation gradient. *Forest Ecology and Management*, 330, 17–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.034>
- Lafond, V., Lagarrigues, G., Cordonnier, T., Courbaud, B. (2014). Uneven-aged management options to promote forest resilience for climate change adaptation: effects of group selection and harvesting intensity. *Annals of Forest Science*, 71 (2), 173–186. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0291-y>
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27 (1), 88–106. DOI: <https://doi.org/10.1191/0309133303pp360>
- Mason, W. L., Diaci, J., Carvalho, J., Valkonen, S. (2021). Continuous cover forestry in Europe: usage and the knowledge gaps and challenges to wider adoption. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 95 (1), 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab038>
- MKGP (2015). Grafični podatki RABA za celo Slovenijo. Ministrstvo za kmetijstvo gozdarstvo in prehrano.
- Morgan, J. N., Savitsky, B. G. (1998). Error and the Gap Analysis Model. V G. S. Basil, E. L. Thomas (ur.). *GIS Methodologies for Developing Conservation Strategies*. New York Chichester, West Sussex, Columbia University Press, 170–178.
- Nagel, T. A., Svoboda, M. (2008). Gap disturbance regime in an old-growth Fagus–Abies forest in the Dinaric Mountains, Bosnia–Herzegovina. *Canadian Journal of Forest Research*, 38 (11), 2728–2737. DOI: <https://doi.org/10.1139/X08-110>
- O'hara, K. L., Hasenauer, H., Kindermann, G. (2007). Sustainability in multi-aged stands: an analysis of long-term plenter systems. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 80 (2), 163–181. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl051>
- Pintar, A. M., Hladnik, D. (2018). Strukturna pestrost gozdnih sestojev na Pahernikovi gozdni posesti. *Acta Silvae et Ligni*, 117, 1–16.
- Pintar, A. M., Hladnik, D. (2019). Razlike v fenološkem razvoju prevladujočih drevesnih vrst na Pahernikovi gozdni posesti ocenjene z analizo satelitskih posnetkov. *Gozdarski vestnik*, 77 (7/8), 263–275.
- Rugani, T., Diaci, J., Hladnik, D. (2013). Gap Dynamics and Structure of Two Old-Growth Beech Forest Remnants in Slovenia. *PLOS ONE*, 8 (1), e52641. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052641>
- Schütz, J. P., Saniga, M., Diaci, J., Vrška, T. (2016). Comparing close-to-naturesilviculture with processes in pristine forests: lessons from Central Europe. *Annals of Forest Science*, 73 (4), 911–921. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0579-9>

- Silva, C. A., Valbuena, R., Pinagé, E. R., Mohan, M., de Almeida, D. R. A., North Broadbent, E., Jaafar, W. S. W. M., de Almeida Papa, D., Cardil, A., Klauberg, C. (2019). ForestGapR: An R Package for forest gap analysis from canopy height models. *Methods in Ecology and Evolution*, 10 (8), 1347–1356. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13211>
- Skudnik, M. (2007). Tehnologija izdelave in vzdrževanja karte gozdnih sestojev. Ljubljana, Biotehniška Fakulteta, Univerza v Ljubljani, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Diplomsko delo (univerzitetni študij).
- Stepper, C., Straub, C., Pretzsch, H. (2014). Assessing height changes in a highly structured forest using regularly acquired aerial image data. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 88 (3), 304–316. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu050>
- Triglav Čekada, M., Bric, V. (2015). Končan je projekt Laserskega skeniranja Slovenije. *Geodetski vestnik*, 59 (3), 586–592
- Valbuena, R., Maltamo, M., Mehtätalo, L., Packalen, P. (2017). Key structural features of Boreal forests may be detected directly using L-moments from airborne lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 194, 437–446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.024>
- Vastaranta, M., Wulder, M. A., White, J. C., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Kankare, V., Holopainen, M., Hyypä, J., Hyypä, H. (2013). Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: comparative results and implications to forest mapping and inventory update. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39 (5), 382–395. DOI: <https://doi.org/10.5589/m13-046>
- Vehmas, M., Packalén, P., Maltamo, M., Eerikainen, K. (2011). Using airborne laser scanning data for detecting canopy gaps and their understorey type in mature boreal forest. *Annals of Forest Science*, 68 (4), 825–835. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0079-x>
- Vepakomma, U., Kneeshaw, D., Fortin, M. J. (2012). Spatial contiguity and continuity of canopy gaps in mixed wood boreal forests: persistence, expansion, shrinkage and displacement. *Journal of Ecology*, 100 (5), 1257–1268. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2012.01996.x>
- Veselič, Ž. (2017). Nezadovoljivo pomlajevanje zaradi preveč številne rastlinojede divjadi je največja grožnja ohranjenosti slovenskih gozdov. *Gozdarski vestnik*, 75 (9), 383–397.
- Vilhar, U., Skudnik, M., Simončič, P. (2013). Fenološke faze dreves na ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji. *Acta silvae et ligni*, 100, 5–17. DOI: <http://doi.org/10.20315/ASetL.100.1>
- White, E. P., Enquist, B. J., Green, J. L. (2008). On estimating the exponent of power-law frequency distributions. *Ecology*, 89 (4), 905–912. DOI: <https://doi.org/10.1890/07-1288.1>
- White, J. C., Arnett, J. T. R., Wulder, M. A., Tompalski, P., Coops, N. C. (2015). Evaluating the impact of leaf-on and leaf-off airborne laser scanning data on the estimation of forest inventory attributes with the area-based approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 45 (11), 1498–1513. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0192>
- White, J. C., Tompalski, P., Coops, N. C., Wulder, M. A. (2018). Comparison of airborne laser scanning and digital stereo imagery for characterizing forest canopy gaps in coastal temperate rainforests. *Remote Sensing of Environment*, 208, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.002>
- ZGS (2015). Posestni načrt za gozdove Pahernikove ustanove 2014–2023. Zavod za gozdove Slovenije, 90 str.
- Zielewska-Büttner, K., Adler, P., Ehmann, M., Braunisch, V. (2016). Automated Detection of Forest Gaps in Spruce Dominated Stands Using Canopy Height Models Derived from Stereo Aerial Imagery. *Remote Sensing*, 8 (3), 175. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8030175>



Pintar A. M., Skudnik M. (2024). Uporabnost nacionalnih podatkov laserskega skeniranja in cikličnega aerofotografiranja pri zaznavanju gozdnih vrzeli. *Geodetski vestnik*, 68 (2), 180–193.

DOI: <https://10.15292/geodetski-vestnik.2024.02.180-193>

Anže Martin Pintar, mag. inž. gozd.

Gozdarski inštitut Slovenije

Oddelek za načrtovanje in monitoring gozdov in krajine

Večna pot 2

SI-1000 Ljubljana

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta

Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire

Večna pot 83

SI-1000 Ljubljana

e-naslov: anzemartin.pintar@gzd.si

doc. dr. Mitja Skudnik, univ. dipl. inž. gozd.

Gozdarski inštitut Slovenije

Oddelek za načrtovanje in monitoring gozdov in krajine

Večna pot 2

SI-1000 Ljubljana

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta

Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire

Večna pot 83

SI-1000 Ljubljana, Slovenija

e-naslov: mitja.skudnik@gzd.si