

Uporabnost brezpilotnih letalnikov za spremljanje žarišč smrekovih in jelovih podlubnikov

Dopolnjena in popravljena izdaja

Andrej Kobler

Gozdarski inštitut Slovenije

Oktober 2019

Uvod

Na študiji primerov smo ugotavljali uporabnost za javno gozdarsko službo brezpilotnega krilatega letala ali kvadrokopterja (v nadaljevanju letalnika), opremljenega z multispektralno kamero za vidni del in bližnji IR del svetlobnega spektra (MicaSense in Parrot Sequoia), za lokalno periodično zaznavanje/spremljanje različnih faz napada podlubnikov na ravni drevesa ali gozdnega sestoja. V času vegetacijske dobe med leti 2017 in 2019 smo na vzorčnih ploskvah z različnimi brezpilotnimi letalniki v vidnem in IR spektru fotografirali smrekove sestoje v različnih fazah napadenosti in fotografije z fotogrametričnim orodjem pretvorili v digitalne orto-fotografije (DOF) in v digitalne modele površin (DSM). S sočasnim terenskim beleženjem stanja vsakega drevesa na vzorčnih ploskvah smo analizirali prepoznavnost različnih faz napada podlubnikov iz zraka na ravni posameznega drevesa in sestoja. Izdelali smo modele, ki povezujejo multispektralne digitalne ortofotografije (DOF) brezpilotnih letalnikov s stopnjo osutosti in obarvanosti krošnje zaradi napada podlubnikov. Analizirali smo vplive uporabljenih pojasnjevalnih podatkov na zaznavanje stopnje napada ter na stroške monitoringa z letalnikom. Izdelali smo ocene stroškov monitoringa podlubnikov z letalnikom pri različnih scenarijih (nakup drona in lastno snemanje in obdelava podatkov, najem storitve snemanja in lastna obdelava podatkov).

Metode

Uporabili smo tri različne kombinacije letalnika, fotografske kamere in fotogrametričnih orodij:

1. Gozdarski inštitut je posnel del žarišč z kvadrokopterjem MD4-1000 proizvajalca Microdrones GmbH (Slika 1) v kombinaciji s multispektralno kamero MicaSense (Slika 4), ki snema v petih delih spektra: modri, zeleni, rdeči, NIR in red edge in prostorsko ločljivostjo reda velikosti nekaj centimetrov (odvisno od višine leta). Za pretvorbo letalskih slik v DOF in 3D digitalni model površin (DMP) so bile uporabljene talne oslonilne točke in orodje Agisoft Professional na Gozdarskem inštitutu Slovenije.
2. Podizvajalec snemanja podjetje C-astral je uporabljal brezpilotno letalo lastne konstrukcije Bramor ppX (Slika 2) v kombinaciji s multispektralno kamero MicaSense Rededge MX in GPS sistemom PPK (post processing kinematic), zaradi katerega so talne oslonilne točke nepotrebne za izdelavo DOF, pri čemer prostorska napaka DOF še vedno ni presegla 10 cm. C-astral je sam poskrbel za izdelavo DOF in DSM s fotogrametričnim orodjem PIX4Dmapper.
3. Podizvajlec ElevonX je uporabljal brezpilotno letalo lastne konstrukcije SkyEye Delta (Slika 3) v kombinaciji s multispektralno kamero Parrot Sequoia, last Oddelka za gozdarstvo Biotehniške fakultete (Slika 4), ki je podobnih lastnosti kot MicaSense, le da ne ponuja modrega slikovnega kanala. Podatke smo fotogrametrično obdelali na Gozdarskem inštitutu Slovenije z orodjem PIX4Dmapper s pomočjo talnih oslonilnih točk.

Zaradi finančnih omejitev projekta smo podatke za kalibracijo modelov smo zbirali ne le z lastnim kvadrokopterjem MD4-1000, ampak smo sprejeli tudi velikodušni ponudbi podjetij C-astral in ElevonX, ki sta za ta raziskovalni projekt ponudili snemanje pod izjemno ugodnimi pogoji (C-astral daleč pod lastno ceno, ElevonX pa zastonj). To v fazi oblikovanja modelov ni bil problem, ker na lastnosti podatkov, ki so pomembne za model, vpliva predvsem kamera, v mnogo manjši meri pa letalnik. Letalnik pa močno vpliva na hektarsko ceno snemanja (kjer so - kot bo spodaj pojasnjeno - krilati letalniki v prednosti pred ortokopterji), zato smo v poglavju Kalkulacija stroškov primerjali le letalnika C-astral Bramor ppX in ElevonX SkyEye Delta, vendar pa oba ob predpostavki enake kamere, to je MicaSense RedEdge MX. Tehnično primerjavo obeh krilatih letalnikov podaja Preglednica 1.

Lokacije in datume žarišč, kjer je bila uporabljena posamezna kombinacija letalnik-kamera, prikazuje Preglednica 3. Iz preglednice je razvidno, da je od treh gornjih kombinacij prva (kvadrokopter GIS + MicaSense) pokrivala najbolj heterogene smrekove sestoje (Kalce, Logatec in Črni vrh na Notranjskem in Pokljuka v Alpah), druga (krilati letalnik C-astral + MicaSense) le alpski gozd (Pokljuka in Jelovica), tretja kombinacija (krilati letalnik ElevonX + Parrot Sequoia) pa le eno ploskev ob robu Ljubljanskega barja, vendar v štirih zaporednih snemanjih. Vzroki za razlike v geografskim pokrivanju niso bili vsebinski ampak logistični in finančni. Na terenskih popisih za 4-kratno snemanje Pijave gorice (tretja kombinacija zgoraj) smo za razliko od prvih dveh kombinacij beležili le stanje napadenosti krošnje in sicer 4 stopnje: 1 - zdravo drevo, 2 - drevo napadeno, a brez vidnega obarvanja krošnje (»zelena faza«), 3 - drevo napadeno z obarvanjem krošnje (»rdeča faza«), 4 - odmrlo drevo (»siva faza«).

Uporabljeni letalniki pripadajo dvema različnima kategorijama, ki se razlikujeta po svojih temeljnih značilnostih. Letalnik Microdrones MD4-1000 spada v kategorijo kvadrokopterjev, letalnik C-astral Bramor in ElewvonX SkyEye pa v kategorijo krilatih letalnikov (letal). Ključne razlike med kategorijama so:

1. Krilati letalniki so aerodinamično bolj učinkoviti, zato imajo daljšo avtonomijo in večji doseg, letijo hitreje, v enem poletu lahko posnamejo veliko večjo površino. Načeloma stanejo več od kvadrokopterjev, a je cena podatkov merjena na hektar nižja. Primerni so za regionalna velikopovršinska snemanja.
2. Kvadrokopterji ne zahtevajo katapulta in ne potrebujejo veliko prostora za vzlet, so enostavnejši za uporabo, večji modeli kot je na primer Microdrones MD4-1000 imajo podobno nosilnost kot krilati letalniki. Načeloma so cenejši od krilatih letalnikov, a je zaradi manjše avtonomije cena podatkov na hektar višja. Primerni so za lokalna malopovršinska snemanja.

Ne glede na opisane lastnosti obeh kategorij pa je trenutno glavna omejitev uporabe letalnikov Uredba o sistemih brezpilotnih zrakoplovov, Uradni list RS, št. 52/2016, ki dopušča le letenje do 150 m nad terenom, v vidnem polju in še to le do 500 m daleč. S tem je predvsem prizadeta uporabnost krilatih letalnikov, ki po svojih tehničnih lastnostih omogočajo regionalni doseg in bi bili ob manj restriktivnih predpisih cenovno ugodnejša konkurenca snemanjem z ultralahkimi letali. Kot se bo izkazalo v poglavju Kalkulacija stroškov, na ceno snemanja na hektar bistveno vpliva višina leta nad terenom, zato smo hipotetično izračunali hektarske cene snemanja tudi za višino leta 350 m in 700 m nad terenom. Preseganje omejitev v Uredbi je stvar dogovora izvajalca letov z Javno agencijo za civilno letalstvo. Ločljivost posnetkov v odvisnosti od višine leta podaja Preglednica 2.



Slika 1: kvadrokopter MD4-1000 proizvajalca Microdrones GmbH (foto Microdrones).



Slika 2: Brezpilotni krilati letalnik C-astral Bramor ppX in pripadajoči katapult za izstrelitev (foto C-astral).



Slika 3: Brezpilotni krilati letalnik ElevonX SkyEye Delta in pripadajoči katapult za izstrelitev (foto ElevonX).



Slika 4: Uporabljeni multispektralni kameri MicaSense RedEdge MX (levo) in Parrot Sequoia (desno). MicaSense snema v petih delih spektra: modri, zeleni, rdeči, NIR in red edge in s prostorsko ločljivostjo reda velikosti nekaj centimetrov (odvisno od višine leta). Parrot Sequoia (uporabljena kamera je last Oddelka za gozdarstvo Biotehniške fakultete) je podobnih lastnosti kot MicaSense, le da ne ponuja modrega slikovnega kanala. Obe kameri omogočata kalibracijo slik glede na svetlobne razmere ter beleženje lokacije posnetka z vgrajenim GPS (foto MicaSense, Parrot).

Preglednica 1: Primerjava tehničnih lastnosti obeh uporabljenih krilatih letalnikov.

Letalnik	C_astral Bramor ppX	ElevonX Delta PPK
Vzletna teža	do 4,8 kg	6,25 kg
Razpon krila	2,3 m	2,29 m
Pogon	Električen, Baterije	
Potovalna hitrost	16 m/s	16 m/s
Maximalna hitrost	26 m/s	28 m/s
Vzlet	Katapult	
Pristanek	Padalo	
Trajanje leta	Do 3.5 h	Do 3 h
Opcije senzorjev	MicaSense ALTUM, MicaSense RedEdge-MX, RGB 42MP	MicaSense ALTUM, MicaSense RedEdge-MX, Sony RGB + MicaSense
Avtopilot	Lasten razvoj	ProfiCNC Pixhawk 2.1 Cube
GNSS sprejemnik	Septentrio: GPS L1/L2, GLONASS: L1/L2, Galileo, BeiDou	ProfiCNC HERE: GPS L1, Glonass L1, Galileo, BeiDou
Natančnost sprejemnika RTK	horizontalno 0.6 cm, vertikalno 1 cm	horizontalno 2.5 cm, vertikalno 5 cm
Potreba po oslonilnih točkah	Ne	
Programska oprema za upravljanje sistema	C3P – Lasten razvoj	MissionPlanner
TRL stopnja razvoja	9	
Dosežena CAA klasifikacija letalnika	D - letenje nad naseljenimi področji	
Št. prodanih sistemov oz. v operativni uporabi	250+	1
Hitrost dobave sistemov	30 dni	8 tednov

Preglednica 2: Ločljivost posnetkov kamer Parrot Sequoia in MicaSense RedEdge MX (ki sta bili uporabljeni v naši analizi) ter najnovejše kamere MicaSense Altum.

Višina leta nad tlemi	Parrot Sequoia	MicaSense RedEdge MX	MicaSense Altum
150 m	14 cm	10 cm	6 cm
350 m	33 cm	24 cm	15 cm
700 m	66 cm	49 cm	30 cm

Ansambelski model v obliki random forest, sestavljen iz 100 regresijskih dreves, smo izdelali z odprtokodnim orodjem za strojno učenje CLUS 2.7 (<https://dtai.cs.kuleuven.be/clus/index.html>). Ciljni spremenljivki sta bili barva oziroma razbarvanost krošnje ter osutost krošnje, iz zraka vidna kazalnika napadenosti drevesa s podlubnikom.

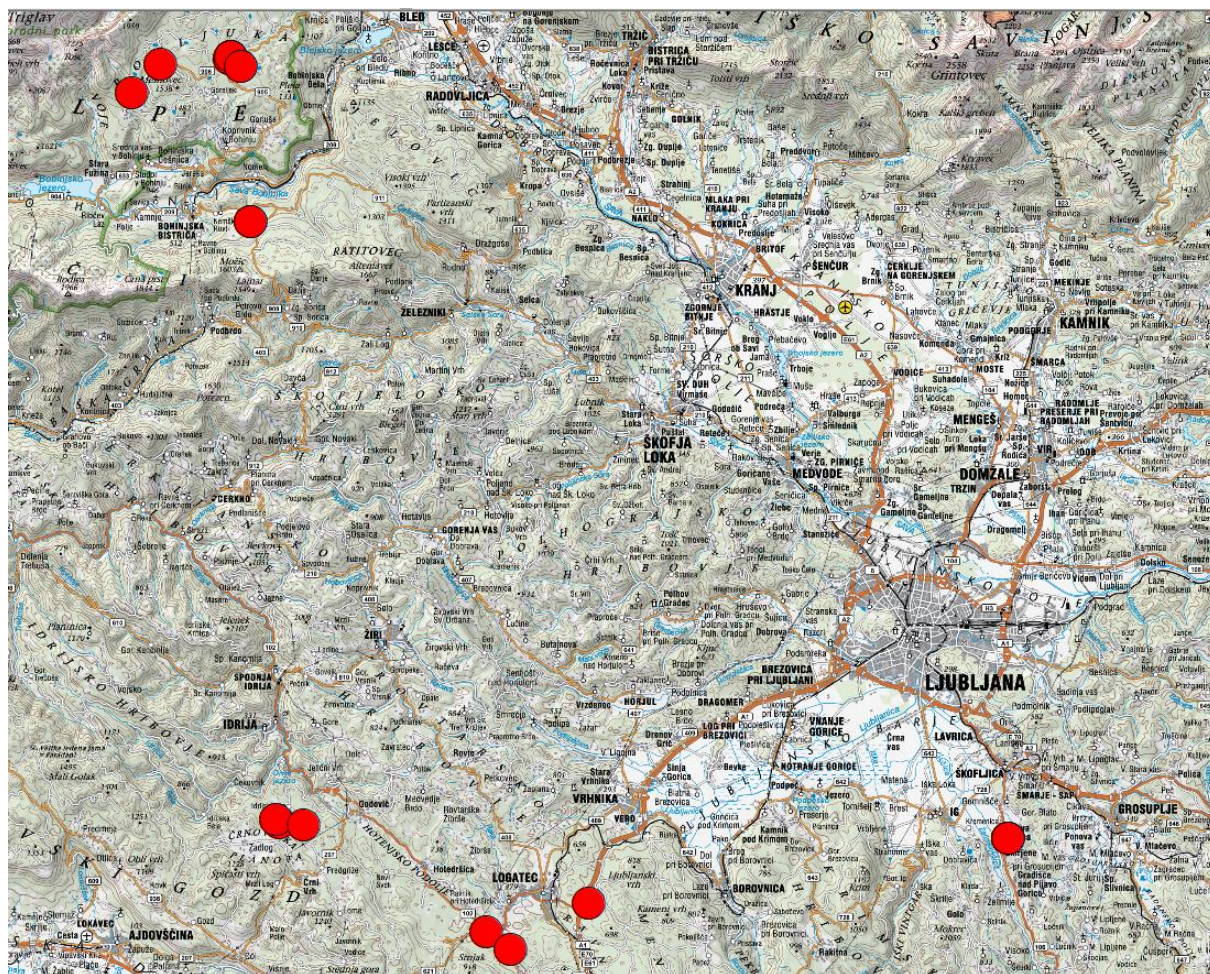
Poleg petih spektralnih kanalov (oziroma štirih za Parrot Sequoia) smo izračunali še vegetacijske indekse NDVI in EVI (za Parrot Sequoia le NDVI, ker EVI za izračun potrebuje tudi modri kanal). Pojasnjevalne spremenljivke so bile za vsak multispektralni kanal in vegetacijski indeks izračunane kot statistični povzetki (aritmetična sredina in standardni odklon) pikslov znotraj različnih polmerov okoli lokacije drevesa. Pri trenaji modela smo hkrati uporabili smo naslednje vrednosti polmerov: 1 m, 2 m, 4 m, 8 m. Poleg tega smo med pojasnjevalne spremenljivke dodali še dan v letu, s čimer smo zajeli sezonski vpliv, kolikor je pač bilo mogoče glede na razpoložljive datume posnetkov.

Referenčne podatke za učenje modelov iz podatkov zbranih z brezpilotnimi letalniki smo zbrali na ravni posameznih dreves na 15 žariščih podlubnika, na nekaterih večkrat zaporedoma, tako da je bilo vseh popisov žarišč 24. Zračnih posnetkov nekaterih žarišč žal nismo mogli uporabiti, ker so bile talne oslonilne točke, potrebne za fotogrametrično obdelavo premaknjene ali nevidne zaradi vetra, vandalov ali zasenčenja. Geografsko porazdelitev uporabljenih žarišč prikazuje slika Slika 5. Na ploskvi smo popisali lokacije in stanje vseh lubadarke (večinoma smreke, nekaj jelk) in približno enako število zdravih dreves. Žarišča smo izbirali po naslednjih kriterijih:

- Sestoj je v razvojni fazi starejši drogovnjak do debeljak
- Zaznane so bile lubadarke v zgodnjih fazah napada, o čemer so nas obveščali sodelavci ZGS
- V času, ko so lubadarke še v zgodnji fazi, je moralo biti vreme primerno za letenje
- Območje letenja z brezpilotnim letalnikom je moralo biti izven letaliških kontrolnih con
- V bližini žarišča je moralo biti dovolj prostora za vzlet
- Letalnik mora biti med poletom pilotu viden (oziroma iz vzletišča). Uredba o sistemih brezpilotnih zrakoplovov, Uradni list RS, št. 52/2016, dopušča le letenje v vidnem polju in do 500 m daleč.

Preglednica 3: Žarišča podlubnikov, na ravni drevesa popisana na terenu in posneta z letalnikom iz zraka. Podatki letalnika za nekatera žarišča niso bili uporabni, ker je talne oznake oslonilnih točk pred snemanjem poškodoval / odnesel dež, veter ali vandali.

Lokacija	Datum	Snemalec	Podatki letalnika uporabni?
Uskovnica	19.jun.17	C-astral, Geavis, Gernot	Da
Mrzli studenec - sever	19.jun.17	C-astral	Da
Kalce	8.nov.17	Gozdarski inštitut	Da
Logatec	10.nov.17	Gozdarski inštitut	Da
Svibno 1	20.nov.17	Gozdarski inštitut	Ne
Svibno 4	20.nov.17	Gozdarski inštitut	Ne
Planina	22.nov.17	Gozdarski inštitut	Da
Črni vrh 1	24.nov.17	Gozdarski inštitut	Da
Črni vrh 2	24.nov.17	Gozdarski inštitut	Da
Črni vrh 3	24.nov.17	Gozdarski inštitut	Da
Mrzli studenec - Skladišče lese	22.avg.18	C-astral	Da
Mrzli studenec - Jug	28.avg.18	C-astral	Da
Mrzli studenec - Sever	28.avg.18	C-astral	Da
Rudno polje	28.avg.18	Gozdarski inštitut	Da
Jelovica	29.avg.18	C-astral	Da
Rudno polje	21.sep.18	Gozdarski inštitut	Ne
Mrzli studenec - Jug	25.sep.18	C-astral	Da
Mrzli studenec - Sever	25.sep.18	C-astral	Da
Mrzli studenec - Skladišče lesa	25.sep.18	C-astral	Da
Jelovica	26.sep.18	C-astral	Da
Pijava gorica	7.jun.19	ElevonX	Da
Pijava gorica	13.jun.19	ElevonX	Da
Pijava gorica	20.jun.19	ElevonX	Da
Pijava gorica	11.jul.19	ElevonX	Da



Slika 5: Lokacije žarišč, uporabljenih v analizi.

Popisovali smo le drevesa dominantnega sloja. Drevesa so bila dendrometrično popisana in locirana s tahimetrom in preciznim GPS. Stopnjo napadenosti in stanje dreves je bilo večinoma popisano na isti dan kot je bil opravljeno snemanje iz zraka z brezpilotnim letalnikom. Popisani so bili naslednji znaki napadenosti: osutost, porumenelost, prisotnost vhodnih odprtin, prisotnost izhodnih odprtin, prisotnost črvine, odstopanje skorje in smoljenje. Šifrant teh znakov opisuje Preglednica 4.

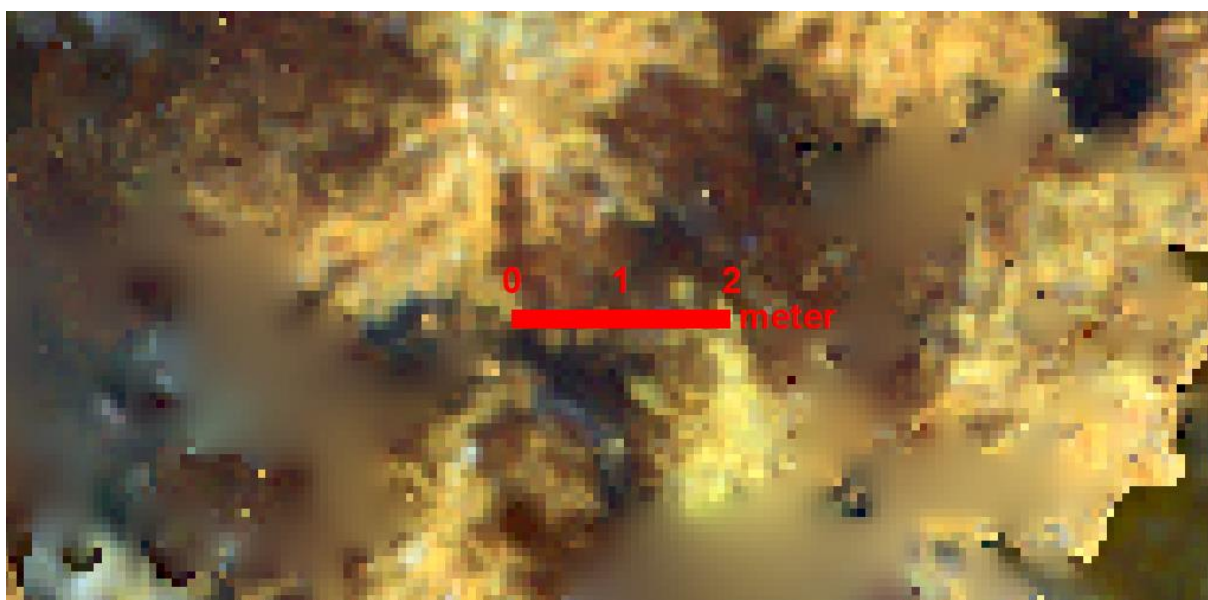
Preglednica 4: Šifrant za popis znakov napadenosti dreves

Osutost	Razred	Opis
Osutost je okularno ocenjen delež (%) manjkajočih asimilacijskih organov (listov, iglic) v primerjavi z namišljenim normalnim drevesom istega socialnega položaja, iste drevesne vrste in z enakega rastišča.	0	ni (0–10 %)
	1	šibka (10–25 %)
	2	srednja (25–60 %)
	3	močna (več kot 60 %)
	4	odmrlo drevo
Sprememba barve krošnje	Razred	Opis
	0	ni sprememb v barvi iglic
	1	šibka obarvanost na rumeno ali na sivo
	2	močna obarvanost na rdečkasto ali rjavo
	3	odmrlo drevo (popolnoma osuta krošnja)
Prisotnost vhodnih odprtín na višini do 2 m	Razred	Opis
Pomembno za oceno, kadar je dež spral vso črvino.	0	Ne
	1	Da, manj kot 1 odprtina na 1 dm ²
	2	Da, več kot 1 odprtina na 1 dm ²
Prisotnost izhodnih odprtín na višini do 2 m	Razred	Opis
	0	Ne
	1	Da
Prisotnost črvine	Razred	Opis
	0	Ne
	1	Da, malo, črvina je težko opazna
	2	Da, veliko
Odstopanje skorje	Razred	Opis
	0	Ne
	1	Da, tik pod bazo krošnje
	2	Da, pod bazo krošnje in niže po deblu
Smoljenje pod bazo krošnje	Razred	Opis
	0	Ne
	1	Da
Osutost zaradi drugega dejavnika (ne podlubnika)	Razred	Opis
Osutost je okularno ocenjen delež (%) manjkajočih asimilacijskih organov (listov, iglic) v primerjavi z namišljenim normalnim drevesom istega socialnega položaja, iste drevesne vrste in z enakega rastišča.	0	ni (0–10 %)
	1	šibka (10–25 %)
	2	srednja (25–60 %)
	3	močna (več kot 60 %)
	4	odmrlo drevo
Dodaten vzrok osutosti krošnje		
Navedemo glavni dejavnik osutosti krošnje zaradi drugega dejavnika (točka 8). Navedemo lahko več vzrokov, po vrstnem redu glede na pomembnost.		

Štirje zaporedni terenski popisi dreves žarišča Pjava gorica so se razlikovali od vseh drugih. Drevesa nismo locirali s tahimetrom, ampak s kombinacijo terenske meritve z GPS in kasnejšo identifikacijo drevesa na DOF (2 do 3 metre napake GPS pod krošnjami). Od znakov drevesa smo beležili le napadenost in sicer s štirimi stopnjami: 0 - zdravo drevo, 1 - drevo napadeno z vidno črvino in brez vidnega obarvanja krošnje (»zelena faza«), 2 - drevo napadeno z vidno črvino in z obarvanjem krošnje (»rdeča faza«), 3 - odmrlo drevo (»siva faza«).

Pred vzorčenjem slikovnih podatkov za trenažo modela smo se odločili za slabšanje prostorske ločljivosti podatkov DOF z metodo redčenja (thinning) iz originalne ločljivosti DOF, ki je znašala med 5 in 10 cm na ločljivost 20 do 50 cm. Vzroki so bili:

- včasih precejšnja razlika med geometrično prostorsko ločljivostjo DOF in efektivno prostorsko ločljivostjo, ki se izkaže z razločljivostjo listov, vej in delov krošenj na končnem DOF (Slika 6).
- velika količina slikovnih podatkov (pet-kanalni DOF, ki pokriva 10 ha pri ločljivosti 5 cm, skupaj z dvema vegetacijskima indeksoma doseže 270 MB).
- pozicijska točnost DOF je slabša od njihove prostorske ločljivosti, pri zelo visoki prostorski ločljivosti DOF zato ne vemo točno, kateri piksli pripadajo določenemu drevesu (četudi bi bila segmentacija krošenj brez napak).
- relativno majhno število na terenu izmerjenih dreves je v nesorazmerju z redundanco slikovnih podatkov.



Slika 6: Razlika med geometrično in efektivno ločljivostjo DOF. Geometrična ločljivost tega posnetka s kamero MicaSense iz kvadrokopterja na višini približno 80 m nad tlemi je 7 cm, dejanska ločljivost po fotogrametrični obdelavi pa je ponekod slabša od 1 m. Rudno polje, 28. avgusta 2018, kompozitna RGB slika kanalov NIR, red edge, red.

Kombinacije treh letalnikov in dveh kamer zaradi režimov leta in različnih kamer niso bile dovolj primerljive in jih ni bilo mogoče uporabiti za trenažo skupnega modela. Zato smo iz zbranih terenskih in letalskih podatkov ustvarili tri trenažne množice in iz njih tri različne modele:

- za devet žarišč na Notranjskem in v Alpah. Model je temeljil na 253 terensko popisanih drevesih;
- za pet žarišč v Alpah. Model je temeljil na 260 terensko popisanih drevesih;
- za eno žarišče ob Ljubljanskem barju. Model je temeljil na 118 terensko popisanih drevesih.

Vse tri modele smo implementirali v lastni aplikaciji Dron_model, napisani v jeziku Python. Rezultat modelov so rastrske modelne karte, izračunane za območja posnetih žarišč. Karte so rastrske z ločljivostjo med 20 in 50 cm in v prvem koraku prikazujejo ciljni spremenljivki Barva in Osutost na ravni piksla, ne drevesa. V drugem koraku smo prikaz na ravni dreves naredili po naslednjem algoritmu:

1. Z lastnim pythonskim orodjem LM (za local maximum) smo na DMP poiskali lokalne višinske maksimume, ki predstavljajo vrhove dreves. Za vsak vrh smo izračunali njegovo višino nad tlemi glede na podatke lidarskega digitalnega modela reliefa, ki je bil iz podatkov laserskega snemanja 2014 in 2015 narejen v horizontalni ločljivosti 1 m za vso državo (Geodetski inštitut Slovenije, FERI). Obdržali smo le vrhove tistih dreves, ki so visoka vsaj 10 m.
2. Modelne rastrske rezultate Barve in Osutosti smo prikazali le znotraj krogov s polmerom 1 m in s centri v vrhovih tako izbranih dreves. Tak prikaz ima naslednje prednosti:
 - a. Ne prikaže modelne rezultate vrzeli med drevesi in neporaslih površin, ki so nesmiseleni, ker teh površin model vsebinsko ne zajema.
 - b. Tematsko klasificirani segmenti s polmerom 1 m omogočajo vizualno prepoznavanje posameznih dreves tudi na rastrski karti.
 - c. Rastrski prikaz vseh klasificiranih pikslov segmenta v nasprotju z vektorskim prikazom (ki zahteva neko rigidno posplošitev vseh vrednosti pikslov v segmentu) dopušča uporabniku, da se sam odloči o ogroženosti posameznega drevesa glede na vzorec klasificiranih pikslov znotraj segmenta.

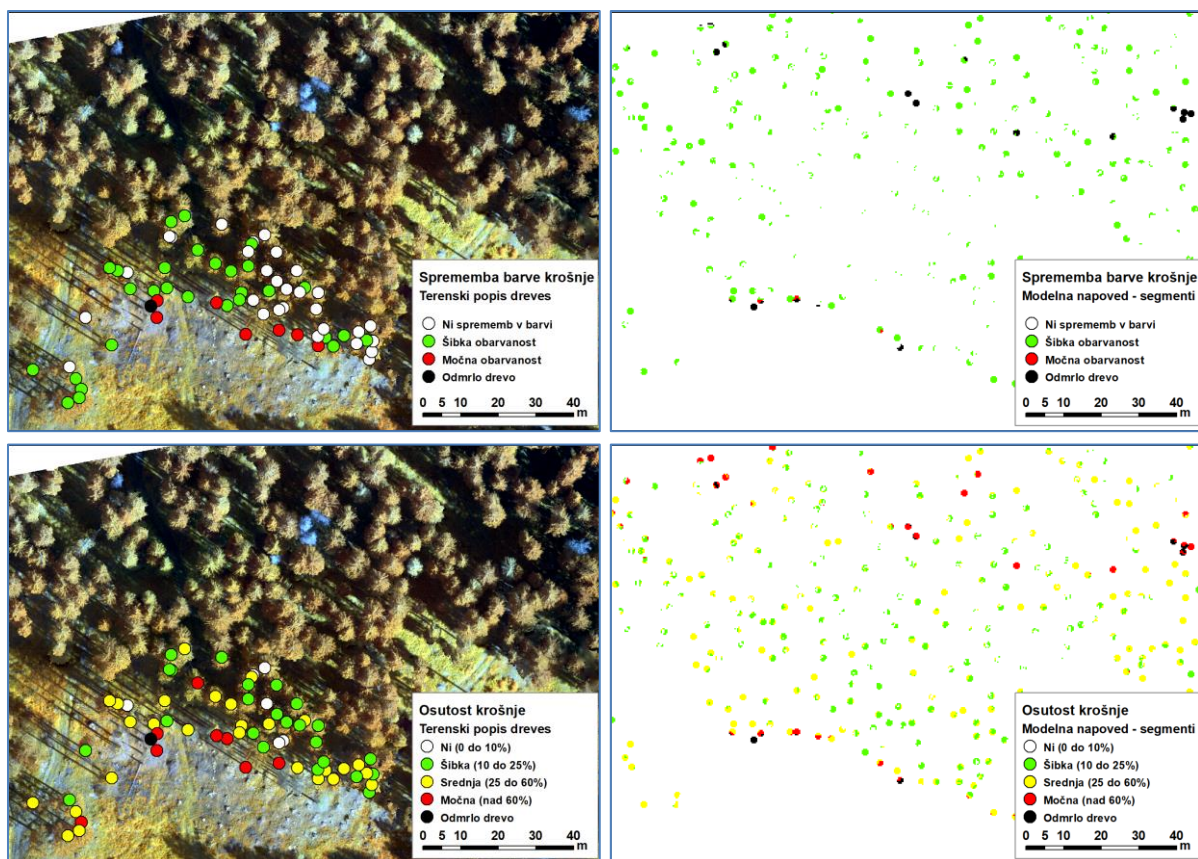
Rezultati

Tri kombinacije letalnikov in kamer zaradi različnih režimov leta in različnih kamer niso bile dovolj primerljive in jih ni bilo mogoče uporabiti hkrati za trenajo enega skupnega modela. Zato smo iz zbranih terenskih in letalskih podatkov ustvarili tri ločene trenajne množice in iz njih tri različne modele:

1. Model za devet žarišč na Notranjskem in v Alpah. Model je temeljil na 253 terensko popisanih drevesih. Točnost modela, ocenjena na testnih podatkih, je znašala 74.7% za kategorijo obarvanosti krošnje in 51.1% za kategorijo osutosti krošnje (Slika 7).
2. Model za pet žarišč v Alpah. Model je temeljil na 260 terensko popisanih drevesih. Točnost modela, ocenjena na testnih podatkih, je znašala 66.2% za kategorijo obarvanosti krošnje in 44.6% za kategorijo osutosti krošnje.
3. Model za eno žarišče ob Ljubljanskem barju, vendar posneto štirikrat zaporedoma. Model je temeljil na 118 terensko popisanih drevesih. Točnost modela, ocenjena na testnih podatkih, je znašala 67.8% za stopnjo napadenosti krošnje.

Podrobneje lahko presodimo točnost napovedi, če si ogledamo matrike napak. Te prikazujejo Preglednica 5, Preglednica 6 in Preglednica 7. Iz njih lahko ugotovimo ne le skupno točnost napovedi, ampak tudi točnosti napovedovanja posameznih razredov ciljnih premenljivk - osutost, barva in napadenost krošenj (Preglednica 8). Preglednica 8 povzema napake klasifikacije po razredih ciljnih spremenljivk. Povzetek temelji na matrikah napak. Pri presoji točnosti je treba upoštevati tudi število primerov v vzorcu, ki so razvidni iz matrik napak. Opozarjamo, da je ciljna spremenljivka na ploskvi Pijava gorica drugačna, kot na ostalih ploskvah (Preglednica 8).

Pojasnjevalno moč posameznih kanalov za napovedovanje osutosti in barve krošenj prikazujejo Slika 8, Slika 9 in Slika 10.



Slika 7: Modelno napovedovanje spremembe barve krošnje (zgornji karti) in osutosti krošnje (spodnji karti). Levi dve karti prikazujeta terenski popis dejanskega stanja napadenosti dreves (na ozadju infrardeče kompozitne slike, posnete s kamero MicaSense iz kvadrokopterja MD4-1000 iz višine 80 m nad terenom). Desni dve karti prikazujeta modelno napoved na podlagi multispektralnih podatkov za celoten sestoj, za segmentirane krošnje dreves, ki so visoka vsaj 10 m. Rudno polje, 28. 8. 2018.

Preglednica 5: Matriki napak modelov barve in osutosti krošnje ocenjeni na testnih podatkih za 9 žarišč na Notranjskem in v Alpah, kvadrokopter MD4-1000, kamera MicaSense.

Osutost krošnje

REAL\PRED	0	1	2	3	4	
0	37	20	4	1	3	65
1	23	23	10	3	0	59
2	19	16	14	0	1	50
3	2	1	5	15	7	30
4	2	0	0	7	40	49
	83	60	33	26	51	253

Accuracy: 0.509881

Barva krošnje

REAL\PRED	0	1	2	3	
0	127	7	0	4	138
1	25	14	1	5	45
2	1	8	0	4	13
3	4	4	1	48	57
	157	33	2	61	253

Accuracy: 0.747036

Preglednica 6: Matriki napak modelov barve in osutosti krošnje, ocenjeni na testnih podatkih za 5 žarišč v Alpah, krilati letalnik C-astral Bramor, kamera MicaSense.

Osutost krošnje

REAL\PRED	0	1	2	3	4	
0	49	24	8	0	0	81
1	27	30	30	0	0	87
2	17	31	37	0	0	85
3	1	0	5	0	0	6
4	0	1	0	0	0	1
	94	86	80	0	0	260

Accuracy: 0.446154

Barva krošnje

REAL\PRED	0	1	2	3	
0	149	20	0	0	169
1	63	23	0	0	86
2	1	3	0	0	4
3	1	0	0	0	1
	214	46	0	0	260

Accuracy: 0.661538

Preglednica 7: Matrika napak modela za napadenost krošnje (razredi: 1 - zdravo drevo, 2 - napadeno napadeno brez vidnega obarvanja krošnje, 3 - napadeno drevo z obarvanjem krošnje, 4 - odmrlo drevo), ocenjena na testnih podatkih štirih meritev žarišča v Pijavi Gorici, krilati letalnik ElevationX SkyEye, kamera Parrot Sequoia.

Napadenost

REAL\PRED	1	2	3	4	
1	50	7	2	0	59
2	15	23	3	0	41
3	3	4	7	1	15
4	0	0	3	0	3
	68	34	15	1	118

Accuracy: 0.677966

Preglednica 8: Povzetek napak klasifikacije po razredih ciljnih spremenljivk. Povzetek temelji na matrikah napak v preglednicah 3 do 5. Pri presoji točnosti je treba upoštevati tudi število primerov v vzorcu, razvidnih iz gornjih preglednic. Opozorilo: ciljna spremenljivka na ploskvi Pijava gorica je drugačna kot na ostalih ploskvah.

9 žarišč na Notranjskem in v Alpah, kvadrokopter MD4-1000, kamera MicaSense

Razredi osutosti	Točnost
0	64.6%
1	37.3%
2	26.0%
3	56.7%
4	77.6%

Razredi barve	Točnost
0	92.9%
1	13.0%
2	29.2%
3	85.7%

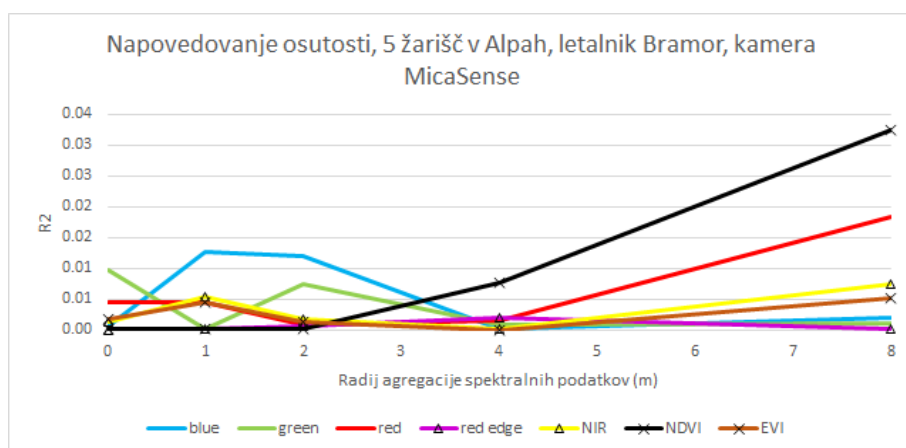
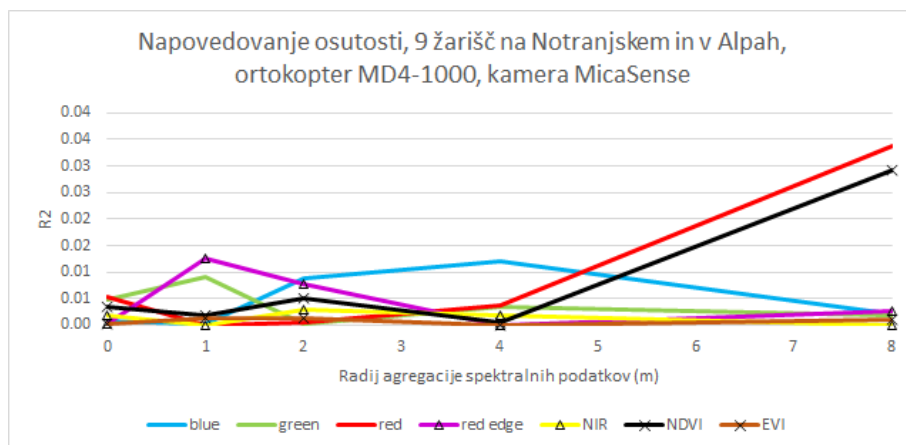
5 žarišč v Alpah, letalnik Bramor, kamera MicaSense

Razredi osutosti	Točnost
0	55.6%
1	33.3%
2	43.5%
3	0.0%
4	0.0%

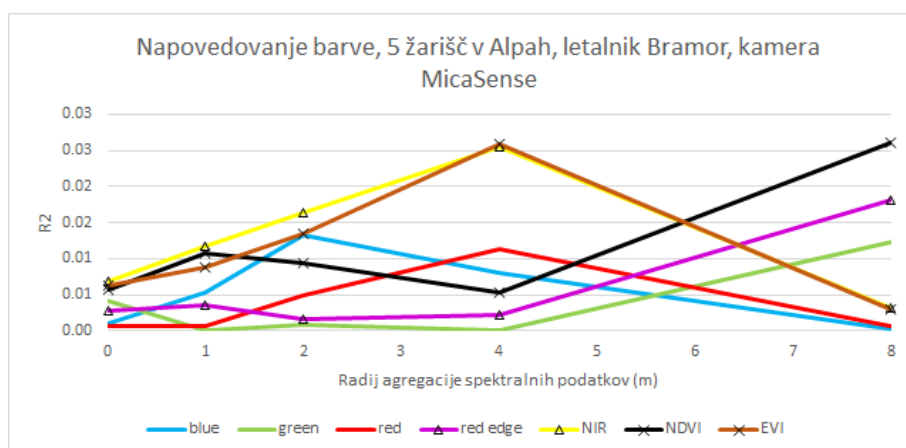
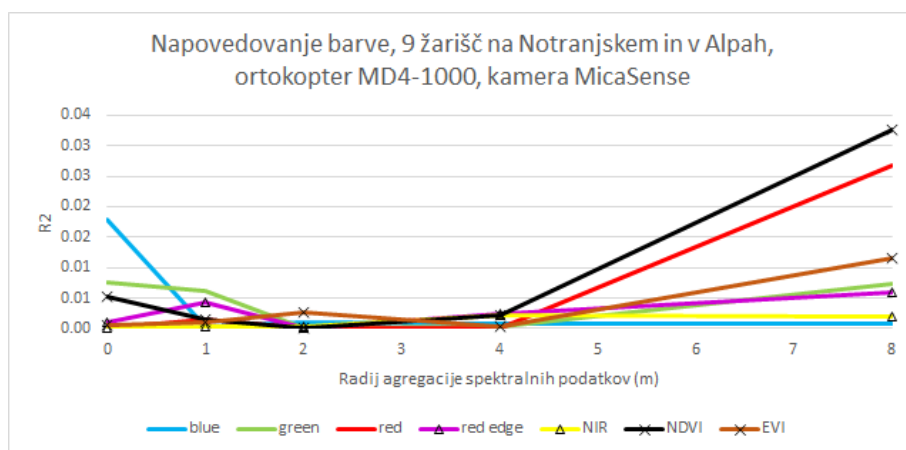
Razredi barve	Točnost
0	85.8%
1	31.4%
2	0.0%
3	0.0%

Pijava gorica, letalnik SkyEye, kamera Parrot Sequoia

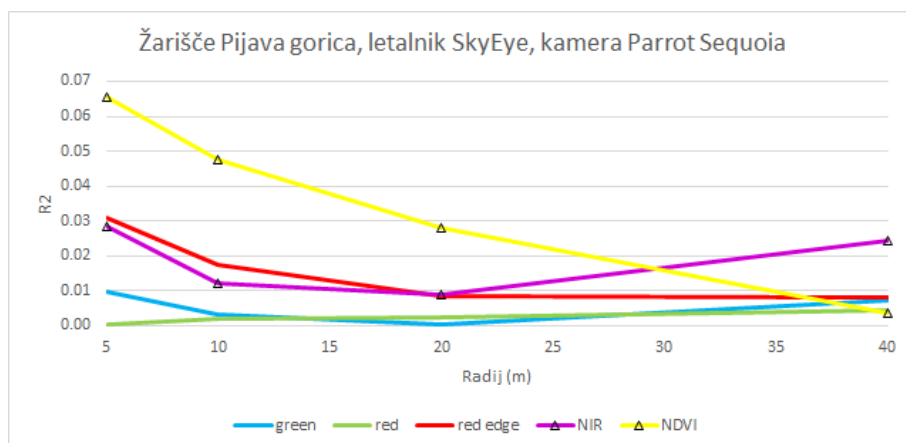
Razredi napadenosti	Točnost
1	84.7%
2	56.1%
3	46.7%
4	0.0%



Slika 8: Vpliv spektralnega kanala in prostorske ločljivosti podatkov na pojasnjevalno moč posameznega slikovnega kanala za napovedovanje osutosti krošnje.



Slika 9: Vpliv spektralnega kanala in prostorske ločljivosti podatkov na pojasnjevalno moč posameznega slikovnega kanala za napovedovanje barve krošnje.



Slika 10: Vpliv spektralnega kanala in prostorske ločljivosti podatkov na pojasnjevalno moč posameznega slikovnega kanala za napovedovanje stanja napadenosti krošnje.

Kalkulacija stroškov

Stroške spremljanja napadov podlubnikov z letalniki na ravni države smo razdelili v dve kategoriji, vsako pa še po različnih scenarijih:

1. stroške operativnega spremljanja napadov podlubnikov:
 - scenarij nakupa letalnika, lastno snemanje in fotogrametrična obdelava podatkov, lastna izdelava kart napadov na podlagi obstoječega modela,
 - scenarij najema storitve snemanja in predobdelave podatkov do faze multispektralnega IR DOF (digitalni ortofoto s 5 slikovnimi kanali - modri, zeleni, rdeči, red edge, infra-rdeči), lastna izdelava kart napadov na podlagi obstoječega modela;
2. stroške izdelave modela za identifikacijo dreves v zgodnji fazi napada:
 - scenarij zbiranja referenčnih podatkov z lastnim letalnikom,
 - scenarij zbiranja referenčnih podatkov z najemom storitve letalnika,
 - scenarij zbiranja referenčnih podatkov s klasično terensko metodo.

Pri kalkulacijah smo izhajali iz naslednjih predpostavk:

- Po podatkih zbirke Timber Zavoda za gozdove je bilo v Sloveniji med leti 2008 in 2018 sanitarnim posekom zaradi smrekovih podlubnikov prizadetih od 10.3 % odsekov leta 2010 do 33.2% odsekov leta 2016 in v povprečju 18.8% (Slika 11). 18.8% je torej predpostavljen delež gozdov, kjer se lahko potencialno pojavljajo napadi podlubnikov (v nadaljevanju »potencialno ogroženi gozdovi«).
- Predpostavili smo, da bi potencialno ogrožene gozdove snemali desetkrat v sezoni in da pri vsakokratnem snemanju posneli le tisti del teh površin, kjer je v danem obdobju dejansko mogoče pričakovati napade podlubnika (v nadaljevanju »spremljani gozdovi«). Te površine bi identificirali z modeli, ki časovno in prostorsko eksplicitno napovedujejo napade podlubnikov. Taki modeli so bili razviti v okviru projekta. Na voljo so na spletnem naslovu <https://www.zdravgozd.si/projekti/podlubniki/rezultati.aspx>. Stroške spremljanja smo primerjali glede na različne predpostavljene deleže spremljanih gozdov (to je tistih, ki jih posnamemo iz zraka) znotraj potencialno ogroženih gozdov. Upoštevali smo vrednosti 1 % (1180300 ha x 18.8% x 1% = 2223 ha za vso državo), 2 % (4446 ha), 4 % (8893 ha), 8 % (17786 ha) in 16 % (35571 ha).
- Zaradi večjega dosega sistematično velikopovršinsko napade podlubnika spremljamo s krilatim letalnikom in ne s kvadrokopterji. Po podatkih ElevonX in C-astral (proizvajalca krilatih letalnikov in hkrati ponudnika storitve snemanja in dobave IR DOF) velikopovršinski in ponavljajoč zajem in georeferenciranje aeroposnetkov z letalnikom stane 4,5 EUR/ha do vključno faze multispektralnega IR DOF pri višini snemanja do 150 m. Pri kalkulaciji smo upoštevali oba krilata letalnika, uporabljena v projektu: C-astral Bramor ppX in ElevonX SkyEye Delta. Na podlagi informativnih ponudb C-astral (18. oktober 2019) in ElevonX (23. oktober 2019) sta oba letalnika opremljena z multispektralno kamero MicaSense RedEdge MX in z GPS sprejemnikom PPK (post processing kinematic), zaradi katerega talne oslonilne točke niso potrebne za izdelavo DOF. Informativna cena opremljenega letalnika C-astral

Bramor ppX znaša 38000 EUR, za ElevonX Skyeeye Delta pa 30250 EUR. Obe informativni ceni vključujta vso talno opremo, potrebno za obratovanje letalnikov.

- Agencija za civilni letalski promet izda dovoljenje za letenje onkraj vidnega polja in dlje kot 500 m.
- Število potrebnih snemanj je vsaj 10 v sezoni, tako v fazi gradnje modela, kot tudi v naslednjih letih v fazi operativnega spremljanja podlubnikov.
- V primeru uporabe lastne opreme za zračno snemanje je treba imeti zadostno število kompletov opreme. Komplet opreme sestavlja letalnik (s kamero, GPS PPK, zemeljsko postajo, katapultom), licenca za fotogrametrično programsko opremo PIX4Dmapper ter delovna postaja. Pri izračunu potrebnega števila kompletov opreme (Preglednica 9) smo izhajali iz predpostavke, da letalnik pri višini leta 150 m lahko posname 200 ha na uro (500 ha pri 350 m in 1000 ha pri 700 m), da na dan leti 4 ure in 5 dni na teden ter da je treba celotno ponovitev snemanja opraviti v enem tednu.
- Ostale parametre kalkulacij navajata Preglednica 10.

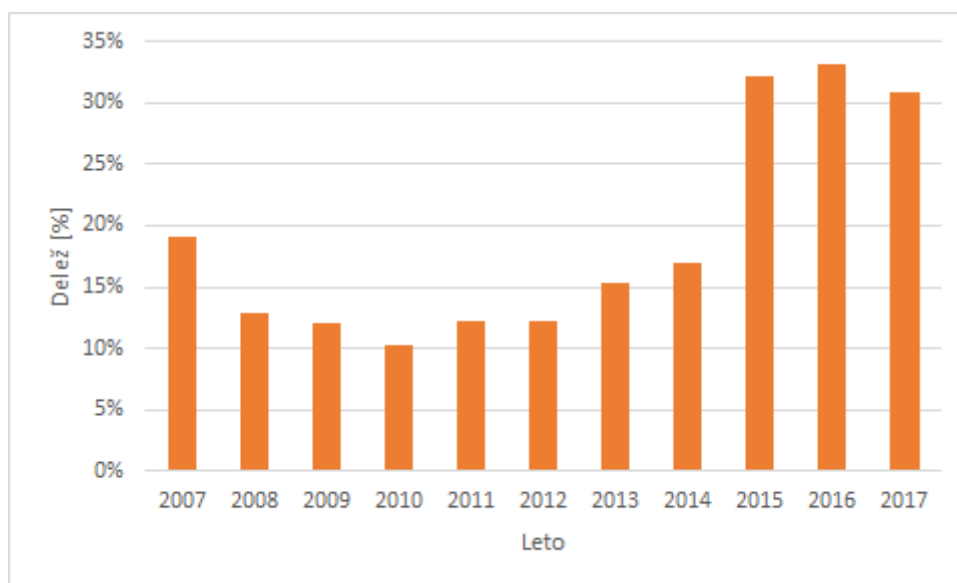
Na podlagi teh predpostavk smo izračunali letne stroške spremljanja napadov podlubnika na ravni države z letalnikom po dveh glavnih scenarijih:

1. z najemom storitve snemanja do vključno faze IR DOF in z lastno izdelavo kart napadov na podlagi prej razvitega modela; predpostavljali smo višino leta do 150 m nad terenom in ceno snemanja 4.5 EUR/ha;
2. z nakupom vse potrebne opreme in snemanjem v lastni režiji in z lastno izdelavo kart napadov na podlagi prej razvitega modela. Pri tem scenariju je treba poleg letnih stroškov, ki upoštevajo amortizacijo opreme, računati tudi z začetno investicijo v opremo. Oprema vključuje ustrezno število opremljenih letalnikov, enako število licenc fotogrametrične programske opreme PIX4Dmapper ter delovnih postaj. Dodatno smo izračunali stroške pri hipotetičnih višinah leta 350 m in 700 m nad tlemi. Taki leti pa presegajo po Uredbi maksimalno dovoljeno višino 150 m in so mogoči le s posebnim dovoljenjem Agencije za civilno letalstvo. Opozorilo: pri kalkulaciji stroškov po tem scenariju smo zanemarili stroške zavarovanja letalnika (oziroma morebitnih popravil zaradi lomov letalnika) ter stroške šolanja pilotov. Smo pa upoštevali stroške rednega servisa letalnika na vsakih 100 ur leta (menjava baterije, motorja, elise).

Znotraj obeh scenarijev smo upoštevali še možne različne deleže spremljanih gozdov znotraj potencialno ogroženih gozdov, ki jih dejansko snemamo iz zraka pri vsaki ponovitvi snemanja: 1 % (1180300 ha x 18.8% x 1% = 2223 ha za vso državo), 2 % (4446 ha), 4 % (8893 ha), 8 % (17786 ha) in 16 % (35571 ha). Rezultate primerjalne kalkulacije prikazuje Preglednica 11, grafično pa Slika 11.

Poleg fotogrametričnega orodja PIX4Dmapper, ki smo ga uporabljali za ortorektifikacijo zračnih posnetkov, so pred kratkim uvedli tudi poenostavljeno različico orodja PIX4Dfield. PIX4Dfield je optimiran za 2D, njegova mesečna licenca pa je za 27 % cenejša od PIX4Dmapper (ki je optimiran za 3D). Orodja nismo testirali, proizvajalec pa v primerjavi z PIX4Dmapper navaja hitrejše delo v 2D, enostavnejši uporabniški vmesnik ter omejitev DOF na 50 milijonov pikslov (313 hektarov pri ločljivosti 25 cm in 1250 ha pri ločljivosti 50 cm).

Če je namen spremljanja napadov le zaznavanje dreves v poznih fazah napada, potem izdelava modelnih kart napadov ni potrebna, saj zadošča fotointerpretacija IR DOF. Če pa je namen tudi odkrivanje dreves v zgodnjih fazah napada, je prej treba izdelati/kalibrirati napovedovalni model. Glavni strošek izdelave modela je zbiranje referenčnih podatkov za kalibracijo modela. Letalnik lahko poleg snemanja IR DOF uporabimo za zbiranje referenčnih podatkov dreves v zgodnji fazi napada. Stroške tega smo izračunali za primer kalibracije modela na ravni Slovenije po scenariju najema storitve letalnika, po scenariju nakupa letalnika in oba primerjali s stroški po klasični metodi s terenskim popisovanjem dreves (Preglednica 12). Pri scenariju nakupa je treba računati tudi z začetno investicijo v opremo. Opozoriti je treba, da je tudi pri terenski metodi popisovanja referenčnih dreves še vedno potrebno hkratno snemanje z letalnikom zaradi primerjave dreves z njihovim spektralnim odzivom na IR DOF. Ni pa v tem primeru potrebna fotointerpretacija dreves na IR DOF.



Slika 11: Delež odsekov, kjer je potekala sanitarna sečnja zaradi podlubnikov. Povzeto iz zbirke podatkov Timber, vzok sečnje = 301. Dobljen delež je bil povečan za 11.33%, kolikor je bilo zapisov, za katere ni bila najdena povezava Timber <> odseki.

Preglednica 9: Število letalnikov, ki je potrebno za eno ponovitev snemanja napadenih gozdov, glede na delež potencialno ogroženih gozdov v Sloveniji, ki jih spremljamo z letalniki. Predpostavke izračuna: hitrost snemanja je 200 ha/h pri višini leta 150 m nad terenom, 500 ha/h pri 350 m in 1000 ha/h pri 700 m; celotna ponovitev snemanja mora biti končana v enem tednu (5 delovnih dni), potencialno ogroženih gozdov v Sloveniji je 18.8 % oziroma 222320 ha.

Delež zajema potencialnih ogroženih gozdov	Višina leta nad terenom		
	150 m	350 m	700 m
1 % oziroma 2223 ha	1	1	1
2 % oziroma 4446 ha	2	1	1
4 % oziroma 8893 ha	3	1	1
8 % oziroma 17786 ha	5	2	1
16 % oziroma 35571 ha	9	4	2

Preglednica 10: Parametri kalkulacij ob predpostavki snemanja iz višine do 150 m ter pri 2% deležu spremljanih gozdov znotraj potencialno ogroženih gozdov. Vrednosti specifične za posamezen letalnik so le pri dveh parametrih, kjer sta podatka ločena s poševno črto. Prvi podatek velja za C-astral Bramor ppX in drugi za ElevonX SkyEye Delta.

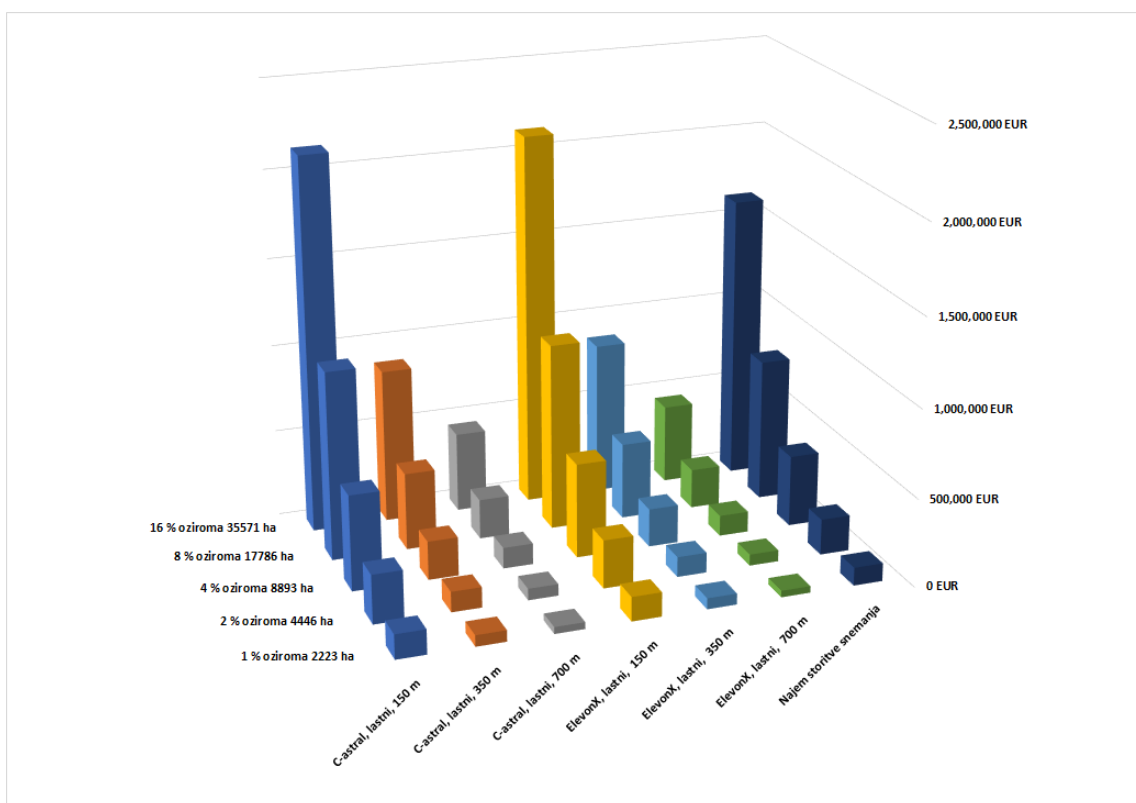
Parameter	Vrednost	Skupina parametrov
Kapaciteta terenske ekipe (dreves/dan)	100	Parametri terenskega zbiranja referenčnih podatkov
Število ljudi v ekipi	3	
Urna postavka	20.00 EUR	
Potrebno število popisanih dreves	10000	
Najem robotskega tahimetra in geodetskega GPS na mesec	2,970.00 EUR	
Kilometrina	0.23 EUR	
Prevožena razdalja (km/dan)	300	Parametri zbiranja referenčnih podatkov z letalnikom kot storitvijo
Število transektov	3	
Velikost transekta (ha)	500	
Število snemanj v vegetacijski sezoni	10	
Stroški snemanja na hektar	4.50 EUR	
Urna postavka fotointerpretacije	20.00 EUR	
Delovnih ur fotointerpretacije na hektar	0.10	Parametri zbiranja referenčnih podatkov z lastnim letalnikom
Delovnih ur na transekt	16	
Urna postavka snemanja	40.00 EUR	
+ Stroški nakupa letalnika s kamero MicaSense RegEdge in GPS (PPK)	38000/30250 EUR	
+ Stroški rednega servisa letalnika na 100 ur leta (baterija, motor,	500/450 EUR	
Amortizacijska doba letalnika (let)	5	
Stroški nakupa fotogrametričnega programskega orodja PIX4Dmapper	3,990.00 EUR	
Amortizacijska doba računalniške in programske opreme (let)	2	
* PIX4Dmapper delovnih ur na ha (ne časa procesiranja!)	0.2	
Urna postavka fotogrametričnega dela	20.00 EUR	
Stroški nakupa delovne postaje	4,000.00 EUR	Parametri spremljanja podlubnikov z letalnikom kot storitvijo
Površina gozdov v Sloveniji	1180300	
Povp. % odsekov 2007-2017 z odkazilom DV11 VRSEC301	18.8%	
Delež površine ogroženih odsekov ki ga vsakič posnamemo	2.0%	
Stroški dobave IR DOF na hektar	4.50 EUR	
Delovnih ur za izračun modela stopnje napadenosti na hektar	0.002	
Urna postavka za izračun modela	40.00 EUR	Parametri spremljanja podlubnikov z lastnim letalnikom
Površina posneta na uro in letalnik pri višini leta 150 m (ha)	200	
* Potrebno število letalnikov	2	
* Skupaj ur letenja za eno snemanje napadenih gozdov	22	
* Del.ur za eno snemanje napadenih gozdov	178	
* Potrebno število licenc PIX4Dmapper	2	
* Potrebno število delovnih postaj	2	

Opomba 1: vrednosti parametrov, označenih s plus+, so podane v dveh različicah - prva vrednost velja za C-astral in druga za ElevonX.

Opomba 2: vrednosti parametrov, označenih z zvezdico*, so izračunane glede na vrednosti ostalih parametrov.

Preglednica 11: Primerjava letnih stroškov (EUR) operativnega spremljanja podlubnika z najemom storitve letalnika ali z nakupom letalnika C-astral ali ElevonX glede na delež vseh potencialno ogroženih gozdov, ki jih spremljamo z letalniki in glede na višino leta. Opozorilo: višine leta nad 150 m so hipotetične, ker po trenutni uredbi niso dovoljene oziroma je potrebno posebno dovoljenje Agencije za civilno letalstvo. V primeru najema storitve snemanja ni razlik med stroški C-astral in ElevonX.

Višina leta nad tlemi →	Lastna oprema						Najem storitve
	150 m		350 m		700 m		150 m
Delež potencialno ogroženih gozdov v Sloveniji, ki jih spremljamo z letalniki ↓	C-astral	ElevonX	C-astral	ElevonX	C-astral	ElevonX	C-astral ali ElevonX
1 % oziroma 2223 ha	138812	137207	63549	61977	38461	36900	101823
2 % oziroma 4446 ha	277624	274413	115503	113909	65328	63755	203645
4 % oziroma 8893 ha	543653	538781	219411	217772	119060	117466	407290
8 % oziroma 17786 ha	1075712	1067517	438822	435544	226525	224886	814581
16 % oziroma 35571 ha	2139829	2124990	877644	871088	453050	449772	1629162



Slika 11: Grafična primerjava letnih stroškov (EUR) operativnega spremljanja podlubnika z najemom storitve letalnika ali z nakupom letalnika C-astral ali ElevonX glede na delež vseh potencialno ogroženih gozdov, ki jih spremljamo z letalniki in glede na višino leta. Opozorilo: višine leta nad 150 m so hipotetične, ker po trenutni uredbi niso dovoljene oziroma je potrebno posebno dovoljenje Agencije za civilno letalstvo. V primeru najema storitve snemanja ni razlik med stroški C-astral in ElevonX.

Preglednica 12: Stroški zbiranja referenčnih podatkov za kalibracijo modela za prepoznavanje napada podlubnikov iz multispektralnih podatkov.

	Letalnik C-astral	Letalnik ElevonX	Teren
Terenski zajem			135900 EUR
Najem storitve letalnika	97500 EUR	97500 EUR	
Zajem z lastnim letalnikom	121860 EUR	120273 EUR	

Razprava

Za prepoznavanje lubadark v kasnejših fazah napada in sušic zadošča že vizualna interpretacija infrardeče kompozitne slike DOF (IR DOF). V našem primeru smo RGB kompozit izdelali s kanali R = NIR, G = red edge in B = rdeči (Slika 7, levi stolpec). Modelni pristop pa je nujen za zgodnejše faze napada, ki jih na IR DOF s prostim očesom ni mogoče razločiti (Slika 7, desni stolpec).

Kamera MicaSense snema v treh vidnih delih spektra (modri, zeleni rdeči) in dveh IR delih (red edge in NIR), Parrot Sequoia enako v IR delu, v vidnem deli pa le zeleni in rdeči kanal. Tem kanalom smo dodali še izračunana vegetacijska indeksa NDVI in EVI (slednjega le za MicaSense, ker je za izračun EVI potreben tudi modri kanal). Od razpoložljivih kanalov so se na uporabljenih vzorcih kot najbolj povedni slikovni kanali za modeliranje stanja krošenj izkazali NDVI, NIR, rdeči in red edge (Slika 8, Slika 9, Slika 10). Za natančnejšo izjavo o vlogi slikovnih kanalov bi bila potrebna obsežnejša analiza širšega nabora možnih spektralnih kanalov s hiperspektralno kamero na večjem bolj reprezentativnem vzorcu dreves.

Dosežene točnosti modelnih napovedi osutosti, spremembe barve in napadenosti krošnje je treba presojati na ravni posameznega razreda (Preglednica 8). Posebej nas zanimajo zgodnje faze napada, ki vizualno na IR DOF niso prepoznavne. Točnost prepoznavanja za fazo šibke osutosti znaša od 33 do 37% za fazo šibke obarvanosti pa 13 do 31 %. To se ne zdi mnogo, vendar je še vedno za dobro polovico bolje kot je delež na terenu pravočasno odkritih lubadark v zgodnji fazi (prisotnost vhodnih izvrtin in črvine pri nespremenjeni barvi krošnje), ko je še mogoče preprečiti izlet in nastanek večjih škod. Delež na terenu odkritih lubadark v zgodnji fazi po anekdotičnih podatkih znaša 20 %. Treba je pripomniti, da smo zaradi finančnih omejitev projekta lahko zbrali le majhno količino referenčnih podatkov za kalibracijo modelov. Sodimo, da bi pri intenzivnejšem vzorčenju lahko točnost modelov izboljšali in s tem zmanjšali škodo zaradi širjenja podlubnikov iz prepozno odkritih žarišč. Z geografsko obsežnejšim vzorčenjem pa bi tudi razširili veljavnost modelov na večino smrekovih gozdov v Sloveniji.

Kaj bi bilo potrebno za tako razširitev veljavnosti? V prvi vrsti je bistvena razširitev vzorčenja dreves. Terenska metoda popisa dreves je zamudna in draga, saj ena ekipa na dan lahko popiše in natančno locira kvečjemu 100 dreves na do dveh žariščih, ki med seboj nista preveč oddaljeni. Prej je treba ta žarišča še poiskati in to v zgodnji fazi napada, ko so podatki za trenažo modela relevantni. Taka žarišča so majhna in jih je težko najti. To pa zahteva še dodatno delo lokalnih gozdarjev.

Kot alternativo terenski metodi predlagamo metodo periodičnega snemanja z letalniki, ki bi bila po naših kalkulacijah bistveno cenejša in učinkovitejša. Na nekaj značilnih območjih smreke v Sloveniji izberemo transekte površine na primer 500 ha, ki jih snemamo z letalnikom približno na dva tedna, pri čemer se ravnamo po modelih potencialne ogroženosti, ki časovno in prostorsko eksplicitno napovedujejo napade podlubnikov. Iz kasnejših posnetkov je na IR DOF mogoče z vizualno interpretacijo določiti lubadarke v poznejših fazah napada, sušice in vrzeli zaradi njihove odstranitve. S tem podatkom je na zgodnejših posnetkih mogoče najti lubadarke v zgodnjih fazah napada. Več-časovni podatki letalnikov bi torej hkrati nudili podatke za ciljno spremenljivko v modelu (stanje dreves) kot tudi slikovne podatke za pojasnjevalne spremenljivke.

Izkazalo se je, da so prostorske ločljivosti 5 do 10 cm, kakršne smo dobili s testiranimi letalniki, za vizualno interpretacijo odlične. Za potrebe modeliranja pa so ne le pretirane, ampak celo predstavljajo oviro. Proces izračuna trenažnega vzorca za modeliranje se pri tako ekstremni ločljivosti podaljša iz nekaj ur na en teden ali več. Zato smo pred obdelavo vse DOF razredčili na ločljivost 20 do 50 cm. S tem na povednosti podatkov nič ne izgubimo, ker je pozicijska točnost DOF itak slabša od njihove geometrične ločljivosti. Poleg tega za podatek na ravni lista ali majhne vejice pri modeliranju stanja drevesa predstavlja šum. Zadošča podatek na ravni dela krošnje oziroma ločljivost 0.5 m. Nenavsezadnje postopek fotogrametrične obdelave podrobnosti drevesa pogosto popači in zabriše, kot priča Slika 6.

Manjše zahteve po ločljivosti posnetkov nam dopuščajo letenje na večjih višinah in s tem zajem večjih površin v enakem času. Naše kalkulacije za scenarij nakupa lastnih letalnikov kažejo, da bi se z večjo višino leta bistveno znižali ceno snemanj. Potrebni bi bilo manj kompletov opreme (letalnik, licenca za fotogrametrični softver, delovna postaja), manj ekip in čas obdelave podatkov bi se skrajšal. Kameri MicaSense RedEdge MX ter MicaSense Altum potrebno ločljivost zagotavljata tudi na višini 700 m nad terenom. Kamera Parrot Sequoia pa potrebno ločljivost zagotavlja na višini do 530 m.

Za scenarij najema storitve snemanja z letalnikom smo imeli podatke o ceni na hektar le za višino leta 150 m nad terenom. Podane kalkulacije za scenarij lastne opreme so dobra osnova za pogajanja z dobavitelji podatkov o znižanju hektarske cene glede na višino leta. Te kalkulacije kažejo, da s spremembo višine leta iz 150 m na 700 m nad terenom prihranimo 72 % do 79 % stroškov pri ceni na hektar. Pogoji je seveda dovoljenje Agencije za civilni letalski promet, da presežemo največjo dovoljeno višino leta, ki je po Uredbi 150 m.

Stroške monitoringa z letalniki lahko znižamo z uporabo modelov, ki časovno in prostorsko eksplicitno napovedujejo napade podlubnikov. Taki modeli so bili razviti v okviru projekta. Na voljo so na spletnem naslovu <https://www.zdravgozd.si/projekti/podlubniki/rezultati.aspx>.

V naši študiji smo uporabili letalnike, ki pripadajo dvema različnima kategorijama, ki se razlikujeta po svojih temeljnih značilnostih. Letalnik Microdrones MD4-1000 spada v kategorijo kvadrokopterjev, letalnik C-astral Bramor in ElevonX SkyEye pa v kategorijo krilatih letalnikov. Ključne razlike med kategorijama so:

1. Krilati letalniki so aerodinamično bolj učinkoviti, zato imajo daljšo avtonomijo (nekaj ur) in večji doseg (nekaj deset kilometrov), letijo hitreje, v enem poletu lahko posnamejo veliko večjo površino. Načeloma stanejo več od kvadrokopterjev, a je cena podatkov merjena na hektar nižja. Primerni so za velikopovršinska snemanja nad 100 ha.
2. Kvadrokopterji ne zahtevajo katapulte in ne potrebujejo veliko prostora za vzlet, so enostavnejši za uporabo, večji modeli kot je na primer Microdrones MD4-1000 imajo podobno nosilnost kot krilati letalniki. Načeloma so cenejši od krilatih letalnikov, a je zaradi manjše avtonomije cena podatkov na hektar višja. Primerni so za lokalna malopovršinska snemanja do nekaj deset hektarov.

Ne glede na opisane lastnosti obeh kategorij pa je trenutno glavna omejitev uporabe letalnikov Uredba o sistemih brezpilotnih zrakoplovov, Uradni list RS, št. 52/2016, ki dopušča le letenje v vidnem polju in še to le do 500 m daleč in do 150 m nad terenom. S tem je predvsem prizadeta uporabnost krilatih letalnikov, ki po svojih tehničnih lastnostih omogočajo regionalni doseg in bi bili ob manj restriktivnih predpisih cenovno ugodnejša konkurenca snemanjem z ultralahkimi letali.

Primerjali smo hipotetične stroške spremljanja napadov podlubnika na državni ravni in sicer po dveh scenarijih – nakup opreme in najem storitve. Ob predpostavki leta na višini 150 m je scenarij najema storitve snemanja (čemur pa ne glede na scenarij sledi lastni izračun modelne karte ali pa lastna fotointerpretacija IR DOF!) za 23 % do 27 % (odvisno od površine snemanja) finančno ugodnejši od scenarija, ki predvideva nakup letalnikov, softverske opreme in delovnih postaj, lastno snemanje in fotogrametrično obdelavo podatkov. Letni stroški snemanja po scenariju lastne opreme so med obema ponudnikoma zelo podobni, ElevonX je pri danih izhodiščih za 0.7 % do 1.2 % cenejši od C-astral. Pri scenariju lastne opreme pa je treba upoštevati časovno dinamiko stroškov, saj začetna investicija v nakup opreme za en komplet letalnik + licenca za fotogrametrično programsko orodje + delovna postaja znaša 38240 EUR za ElevonX SkyEye Delta in 45990 EUR za C-astral Bramor ppX. Potrebno število kompletov opreme je odvisno od površine snemanja in od višine leta. Na primer, če želimo v enem tednu posneti 16 % vseh potencialno ogroženih gozdov v Sloveniji, kar zneso 35571 ha, potrebujemo 2 kompleta, če snemamo iz višine 700 m nad terenom in 9 kompletov, če snemamo iz višine 150 m.

Za scenarij najema storitve snemanja z letalnikom smo imeli podatke o ceni na hektar le za višino leta 150 m nad terenom. Hipotetično pa smo izračunali prihranke pri hektarski ceni snemanja z lastno opremo tudi za višine leta, ki presegajo po Uredbi dovoljeno maksimalno vrednost. Izračuni kažejo, da s spremembo višine leta iz 150 m na 700 m nad terenom prihranimo 72 % do 79 % stroškov pri ceni na hektar. Pogoj za prihranek je seveda dovoljenje Agencije za civilni letalski promet, da presežemo največjo dovoljeno višino leta, ki je po Uredbi 150 m.

Stroške monitoringa z letalniki lahko znižamo z uporabo modelov, ki časovno in prostorsko eksplicitno napovedujejo napade podlubnikov. Taki modeli so bili razviti v okviru projekta. Na voljo so na spletnem naslovu <https://www.zdravgozd.si/projekti/podlubniki/rezultati.aspx>.

Za zaznavanje lubadark v poznih fazah napad zadošča vizualna fotointerpretacija IR DOF. Za zaznavanje zgodnejših faz pa je potreben model. Analizirali smo stroške zbiranja referenčnih podatkov za kalibracijo modela, ki so tudi največja postavka pri izdelavi modela. Pri klasični terenski metodi ti stroški znašajo 135900 EUR. Z najemom storitve snemanja prihranimo 28 %, enako za oba ponudnika. Pri nakupu lastne opreme pa prihranimo 10 % pri C-astral in 11 % pri ElevonX.

Naj zapišemo še nekaj praktičnih izkušenj, ki smo jih pridobili v teku projekta:

- Pri terenskih popisih dreves ni bila omejitev le razpoložljivost ekipe, ampak tudi najti dovolj lubadark v zgodnji fazi napada, saj jih je težko opaziti. Iskanje žarišč v zgodnji fazi je bila še dodatna obremenitev revirnih gozdarjev.
- Višina leta: največja dovoljena višina leta je 150 m nad terenom, kar še vedno zadošča za 10 cm ločljivosti pri MicaSense in 14 cm pri Parrot Sequoia. Višine leta na manj kot 100 m nad terenom lahko prinesejo težave pri avtomatskem vpenjanju slik v fotogrametrični model. Vzrok je premaknjenost slik zaradi hitrosti letalnika ali zaradi premikanja vej v vetru. Če nujno potrebujemo slike zelo visoke ločljivosti, potem dobro deluje kombinacija snemanja na dveh višinah, na primer 80 m in 150 m, slike pa potem obdelamo hkrati v enem samem PIX4Dmapper projektu.
- V primeru, da nas zanimajo tudi običajni RGB DOF, kamera Parrot Sequoia ni primerna izbira, ker ne ponuja modrega kanala. Kamera sicer ponuja RGB slike v JPG formatu, ki pa so posnete s tehniko rolling shutter (v nasprotju z global shutter, ki celotno sceno zabeleži v

istem trenutku), zato so fotografije popačene, če so posnete med gibanjem letalnika (kar pa ni nujno problem pri ortokopterjih).

- Če naj bodo talne oznake za oslonilne točke na posnetkih vidne, morajo biti vsaj formata A1, postavljene na osončenih površinah in z okolico, ki je brez ovir vsaj 45° nad horizontom. Pri dovolj visokem prekrivanju med snemalnimi redovi in med zaporednimi slikami bodo oslonilke vidne na več sosednjih posnetkih. Odlične oslonilke so lahko tudi z barvnim sprejem narisani križi na betonu ali asfaltu.
- Pomembno je točno lociranje dreves, če naj jih združimo s podatki letalnika. Tahimetske meritve v kombinaciji z geodetskim GPS so se izkazale kot kvalitetna, čeprav zamudna metoda. Merjenje lokacij z GPS neposredno pri drevesu daje slabe rezultate tudi z razmeroma kvalitetnim GPS (Leica Zeno GG04 z RTK). Pozicijska napaka je bila 2 do 3 metre in je bilo treba lokacije dreves naknadno popravljati na ekranu pomočjo DOF in DMP.

Sklep in priporočila

Za zaznavanje lubadark v poznih fazah napada zadošča vizualna fotointerpretacija IR DOF, za zaznavanje zgodnejših faz pa je potreben model za prepoznavanje lubadark v zgodnjih fazah napada. Stroške zbiranja referenčnih podatkov za kalibracijo vseslovenskega modela, ki so največja postavka pri izdelavi modela, lahko z najemom storitve snemanja z letalnikom znižamo do 28 % v primerjavi s klasičnim terenskim zbiranjem podatkov.

Kamera MicaSense RedEdge MX je primernejša od kamere ParrotSequoia, ker ponuja vse tri vidne kanale ter ima global shutter tudi za pregledne RGB slike (Sequoia ima rolling shutter, kar pri hitrejših letalnikih privede do popačenih preglednih slik). Obe kameri ponujata kanala red edge in NIR. Pri višinah leta nad 700 m je zaradi boljše ločljivosti še boljša izbira kamera MicaSense Altum, ki pa je v projektu nismo preiskusili.

Na testnih ploskvah je bila dosežena točnost prepoznavanja zgodnjih faz razmeroma skromna (za fazo šibke osutosti od 33 do 37%, za fazo šibke obarvanosti pa 13 do 31 %), kar pripisujemo majhnemu in ne dovolj reprezentativnemu vzorcu referenčnih dreves. Omenjena točnost pa je še vedno za polovico boljše kot je delež na terenu pravočasno odkritih lubadark v zgodnji fazi (prisotnost vhodnih izvrtin in črvine pri nespremenjeni barvi krošnje), ko je še mogoče preprečiti izlet in nastanek večjih škod. Ta delež po anekdotičnih podatkih znaša 20 %.

Sodimo, da bi pri geografsko obsežnejšem vzorčenju lahko točnost modelov izboljšali in razširili njihovo veljavnost na večino smrekovih gozdov v Sloveniji. Za to bi bilo potrebna bistvena razširitev vzorčenja dreves. Terenska metoda popisa dreves je zamudna in draga. Predlagamo alternativno metodo periodičnega snemanja z letalniki. Na nekaj značilnih območjih smreke v Sloveniji izberemo transekte površine po nekaj 100 ha, ki jih snemamo z letalnikom približno na dva tedna, pri čemer se ravnamo po modelih potencialne ogroženosti, ki v času in prostoru verjetnostno napovedujejo napade podlubnikov. Iz kasnejših posnetkov z vizualno določimo lubadarke v poznejših fazah napada, s tem podatkom pa na zgodnejših posnetkih najdemo lubadarke v zgodnjih fazah napada. Več-časovni podatki letalnikov nudijo vse potrebne podatke za kalibracijo modela: lokacije in stanje dreves ter spektralne podatke za pojasnjevalne spremenljivke v modelu.

Sodimo, da bi bilo možno modele za prepoznavo zgodnjih faz napada izboljšati tudi z analizo vloge posameznih delov spektra, za kar pa bi bila potrebna obsežnejša analiza širšega nabora možnih spektralnih kanalov s hiperspektralno kamero na večjem bolj reprezentativnem vzorcu dreves.

Izkazalo se je, da so prostorske ločljivosti 5 do 10 cm, kakršne smo dobili s testiranimi letalniki, za vizualno interpretacijo odlične. Za potrebe modeliranja pa so ne le pretirane, ampak celo predstavljajo oviro. Brez redčenja ločljivosti na 20 do 50 cm bi proces izračuna trenažnega vzorca za modeliranje trajal predolgo.

Stroške monitoringa z letalniki lahko znižamo z uporabo modelov, ki časovno in prostorsko eksplicitno napovedujejo napade podlubnikov. Taki modeli so bili razviti v okviru projekta. Na voljo so na spletnem naslovu <https://www.zdravgozd.si/projekti/podlubniki/rezultati.aspx>.

Krilati letalniki so aerodinamično bolj učinkoviti od kvadrokopterjev, zato imajo večji doseg, zato v enem poletu lahko posnamejo veliko večjo površino. Načeloma stanejo več od kvadrokopterjev, a je cena podatkov merjena na hektar nižja. Primerni so za velikopovršinska snemanja nad 100 ha.

Ne glede na opisane lastnosti obeh kategorij letalnikov je trenutno glavna omejitev uporabe letalnikov Uredba o sistemih brezpilotnih zrakoplovov, Uradni list RS, št. 52/2016, ki dopušča le letenje v vidnem polju in še to le do 500 m daleč in do 150 m nad terenom. S tem je predvsem prizadeta uporabnost krilatih letalnikov, ki po svojih tehničnih lastnostih omogočajo regionalni doseg in bi bili ob manj restriktivnih predpisih cenovno ugodnejša konkurenca snemanjem z ultralahkimi letali.

Primerjava stroškov spremljanja napadov podlubnika na državni ravni po dveh scenarijih (nakup opreme in najem storitve) in ob predpostavki snemanja iz višine 150 m kaže, da je najem storitve snemanja do 27 % cenejši od nakupa opreme in snemanja v lastni režiji. Po obeh scenarijih izračun upošteva izdelavo modelne karte (ali zgolj fotointerpretacija DOF) v lastni režiji.

Letni stroški snemanja po scenariju lastne opreme so med obema ponudnikoma zelo podobni. Potrebno število kompletov opreme (letalnik, licenca za fotogrametrični softver, delovna postaja) je odvisno od površine snemanja in od višine leta. Na primer, če želimo v enem tednu posneti 16 % vseh potencialno ogroženih gozdov v Sloveniji, kar zneso 35571 ha, potrebujemo 2 kompleta, če snemamo iz višine 700 m nad terenom in 9 kompletov, če snemamo iz višine 150 m.

Prihranki pri stroških snemanja z lastno opremo za višine leta, ki presegajo po Uredbi dovoljeno maksimalno vrednost, so znatni. S povečanjem višine leta iz 150 m na 700 m nad terenom, prihranimo 72 % do 79 % stroškov merjeno na hektar. Za namene spremljanja podlubnikov in ostalih gozdnih ujm bi bil zato nujen sistemski dogovor z Agencijo za civilni letalski promet glede povečanja dovoljenega radija leta in največje višine leta.

Stroške monitoringa z letalniki lahko znižamo z uporabo modelov, ki časovno in prostorsko eksplicitno napovedujejo napade podlubnikov. Taki modeli so bili razviti v okviru projekta. Na voljo so na spletnem naslovu <https://www.zdravgozd.si/projekti/podlubniki/rezultati.aspx>.

Zahvala

Ta študija je nastala kot eden rezultatov od delovnega sklopa 2 (Daljinsko zaznavanje) v okviru raziskovalnega projekta Razvoj metod zaznavanja poškodb iglavcev zaradi smrekovih in jelovih podlubnikov ter izdelava modelov za napovedovanje namnožitev smrekovih in jelovih podlubnikov v slovenskih razmerah, ki ga je vodil Nikica Ogris. Projekt sta financirala MKGP in ARRS. Študijo so podprli Zavod za gozdove Slovenije, Oddelek za gozdarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani ter podjetja C-astral, ElevonX in Geavis. Posebej se zahvaljujemo za osebni prispevek naslednjim ljudem (po abecednem redu): Peter Čadež, Matjaž Čater, Andreja Kavčič, Milan Kobal, Marija Kolšek, Matej Kozamernik, Katja Kunc, Janez Langus, Jernej Moderc, Nikica Ogris, Majda Petretič, Špela Planinšek, Gregor Senegačnik, Barbara Slabanja, Klemen Zalokar in Jure Žlogar.