

POŠEVNO AEROFOTOGRAFIRANJE OBLIQUE AERIAL PHOTOGRAPHY

Andreja Švab Lenarčič, Vasja Bric, Katja Oven, Katja Šušteršič, Peter Prešeren

1 UVOD

Aerofotografiranje se v Sloveniji izvaja že sedemdeset let, sistematično pa že skoraj petdeset let. Tako dolga doba priča, da so aerofotografije zelo uporabne. Zaradi posebnih fotogrametričnih aerofotoaparatur in sistematičnega pokrivanja večjega območja so bile zajete skoraj izključno nadirne aerofotografije, le izjemoma so bile posnete tudi privlačne panoramske fotografije. Fotogrametrični zajem fotografij zahteva vsaj 60 % preklap v smeri leta in vsaj 30 % preklap med pasovi, kar omogoča natančno orientacijo aerofotografij. To je podlaga za izdelavo digitalnih modelov višin (DMV) in ortofotov (OF), ki so najbolj uporabljeni izdelki aerofotografiranja. Orientirane aerofotografije se s stereozajemom uporabljajo predvsem za izdelavo tridimenzionalnih (3D) vektorskih topografskih podatkov in kartografskih prikazov v različnih merilih. Ortofoto se lahko izdeluje povsem samodejno in je tako brez vpliva morebitnih napak operaterja, je pa nekoliko težje berljiv kot karta, ki vsebuje še dodatne informacije.

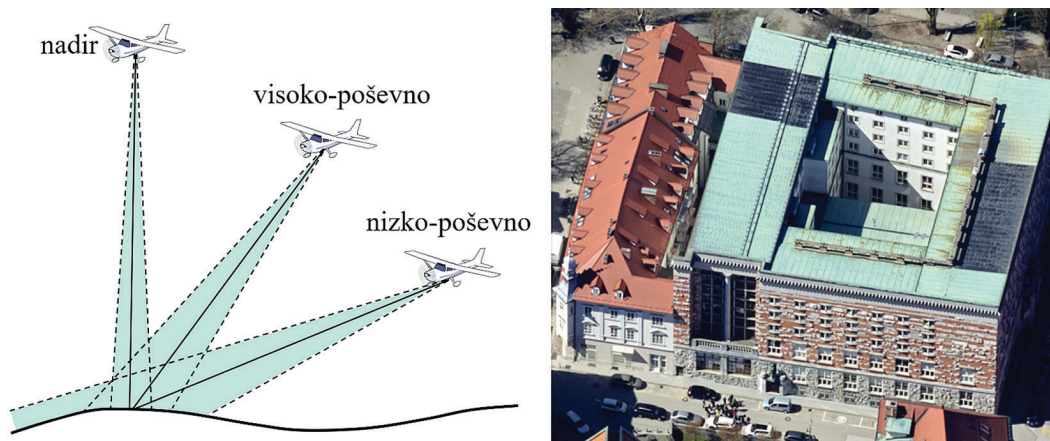
Dvodimenzionalne (2D) karte in načrti so še vedno priročni in so bili vsa ta leta zadostna prostorska podlaga, a le za ljudi z dobro prostorsko predstavo. Raziskave namreč kažejo, da se vsebina 2D-kart v človeških možganih prikazuje kot 3D-prostor, in sicer glede na izkušnje v prostoru. Ljudje se veliko lažje orientiramo in premikamo skozi prostor, če ni ravninski. Zakaj torej načrtov ne prikazujemo kar v 3D, da bi različne prostorske situacije in ukrepe približali še širšemu krogu uporabnikov? Fotogrametrični stereozajem že dolgo omogoča izdelavo 3D načrtov in kart, vendar zahteva ročno delo izurjenega operaterja na posebni opremi, kar pa je drago in zahteva precej časa. Šele v zadnjih letih se avtomatizacija vsaj v nekaterih postopkih izdelave 3D kart in načrtov približuje kakovosti ročnega 3D zajema, zato so vse večje tudi želje po ažurnih 3D podatkih.

Zadnjih nekaj let vse bolj prehajamo na 3D modeliranje prostora. V arhitekturi, projektiranju in gradbeništvu se uporablja tehnologija BIM (angl. *Building Information Modeling*), v urbanističnem načrtovanju, arheologiji, strojništvu in na mnogih drugih področjih pa drugi načini 3D modeliranja. Temu procesu prehoda v tridimenzionalnost sledi tudi Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS), in sicer na področju prostorskih in nepremičninskih podatkov. Zajem prostorskih podatkov v treh dimenzijah pa je v geodeziji in na področju daljinskega zaznavanja že stalnica. Cikličnemu aerofotografiranju Slovenije (CAS) se je v letu 2011 pridružilo zračno lasersko skeniranje (ZLS), ki je v letu 2023 prešlo v ciklično lasersko skeniranje Slovenije (CLSS). V letu 2022 smo se na Gursu odločili, da v okviru mehanizma Načrt za okrevalje in odpornost iz razvojnega področja Digitalna preobrazba v okviru investicije Zeleni slovenski lokacijski okvir finančno podpremo testni projekt poševnega aerofotografiranja (PAF-test), katerega izsledke podajamo v tem prispevku.

2 KAJ SO POŠEVNE AEROFOTOGRAFIJE ?

Fotografije iz zraka na splošno delimo na nadirne (vertikalne) in poševne. Nadirne fotografije so posnete tako, da je os kamere obrnjena proti tlorajšču čim bolj vertikalno, medtem ko je pri zajemu poševnih fotografij os kamere usmerjena poševno proti tlorajšču (slika 1 levo). Glede na velikost kota fotografiranja jih delimo na visoko-poševne in nizko-poševne. Za potrebe spremljanja in modeliranja prostora je bolj uporabno visoko-poševno fotografiranje.

V primerjavi z nadirnimi aerofotografijami poševne aerofotografije gledalcu ponujajo lažje predstaviteljivo podobo posamezne lokacije, saj na primer pri stavbi poleg strehe vidimo tudi njeno fasado, lažja je tudi presoja o višini stavbe, številu etaž, lokaciji vhoda v stavbo in podobno (slika 1 desno). Ker poševen pogled skriva vsebino za stavbo, se pri postopku poševnega fotografiranja zajamejo štiri različne poševne aerofotografije iz štirih različnih smeri hkrati (razvidno s slik 4 in 8).



Slika 1: Levo: smer fotografiranja (nadir, visoko-poševno in nizko-poševno); desno: primer visoko-poševno posnete aerofotografije (vir: GURS).

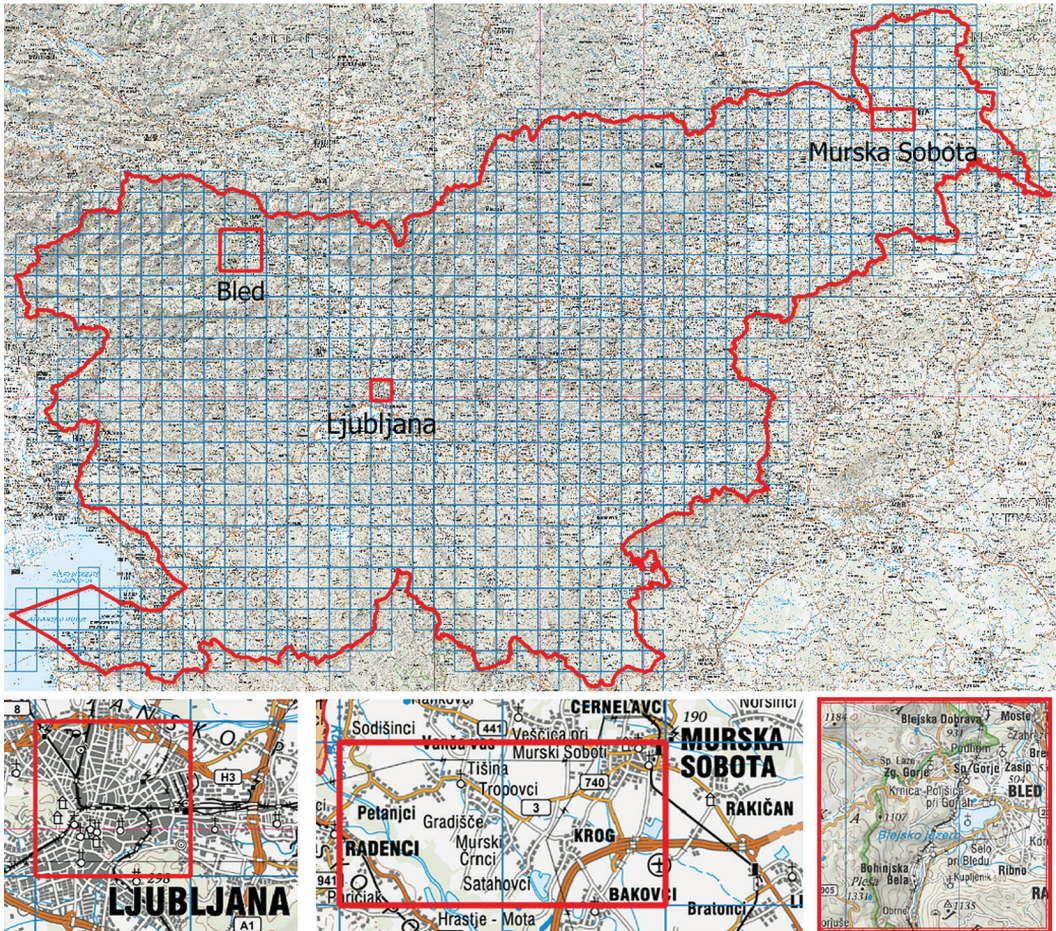
3 OPIS TESTNEGA PROJEKTA PAF

V letu 2022 smo na Gursu podprli izvedbo projekta »Poševno aerofotografiranje – test«, katerega predmet naročila je bila izvedba poševnega aerofotografiranja (PAF) za pridobitev aerofotografij treh različnih geometrijskih ločljivosti na treh različnih testnih lokacijah v Sloveniji. Rezultat zajema aerofotografij in GNSS/INS meritev so: natančni parametri zunanje orientacije aerofotografij, digitalni model površja (DMP), popolni ortofoto (POF), 3D mreža (angl. *3D mesh*), izdelana pa je bila tudi aplikacija za pregledovanje in izvajanje osnovnih meritev na poševnih aerofotografijah. Projekt je izvedlo podjetje Flycom Technologies, kontrolo kakovosti izdelkov in analizo uporabnosti rezultatov pa Geodetski inštitut Slovenije.

3.1 Testna območja

V okviru testnega projekta so bile poševne aerofotografije zajete na treh geografsko ločenih območjih pravokotne oblike in z izhodiščem, skladnim s kilometrsko državno mrežo. Meje območij in njihova imena so prikazani na sliki 2. Območja so bila izbrana glede na njihove značilnosti, in sicer:

- območje 1: Ljubljana, 5 × 5 km (25 km²), mestno in primestno območje, višina leta 1100 m, ločljivost 5 cm;
- območje 2: Murska Sobota, 10 × 5 km (50 km²), podeželje, višina leta 2410 m, ločljivost 10 cm;
- območje 3: Bled, 10 × 10 km (100 km²), hribovito območje, višina leta 4300 m, ločljivost 15 cm.



Slika 2: Lokacije treh območij za izvedbo PAF in njihova imena (vir: GI).

3.2 Aerofotogrametrični sistem poševnega aerofotografiranja

Aerofotografiranje Murske Sobotne in Bleda se je izvajalo s poševnim in nadirnim integriranim aerofotogrametričnim sistemom PAS880. To je najnovejši sistem podjetja, ki je sestavljen iz štirih poševnih fotoaparata ločljivosti 150 MP (angl. *megapixel*) in nadirnega fotoaparata z ločljivostjo 280 MP, integriranih v eno enoto za hkratno zajemanje fotografij. Razmerje med dolžino talnega intervala nadirne aerofotografije proti poševni fotografiji znaša 1 : 1,18, kar je še posebej ugodno za načrtovanje leta na goratem in hribovitem terenu. Poševni fotoaparati so nagnjeni za 45 stopinj. Fotografiranje Ljubljane se je izvajalo z različico PAS880i, ki ima v sistem dodan tudi NIR fotoaparata z ločljivostjo 150 MP. Sistem za zajem fotografij je bil nameščen na letalo, kot je prikazano na sliki 3, kjer je tudi skica smeri in oblike zajetih fotografij.



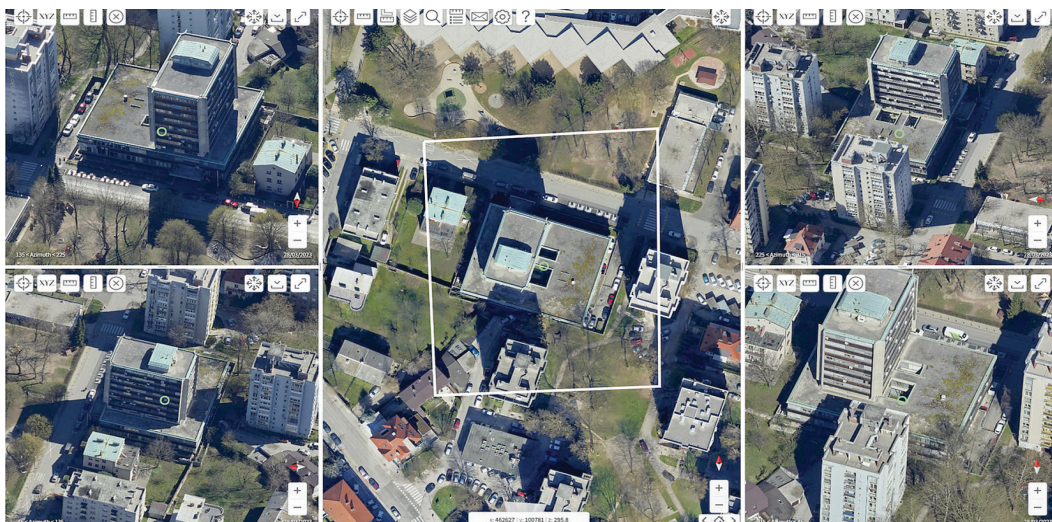
Slika 3: Levo: montaža sistema PhaseOne PAS880i (PhaseOne, 2024) v letalo; sredina: letalo Pilatus PC6 porter; desno: hkratne smeri aerofotografiranja v opisanem sistemu (vir: arhiv Flycom).

4 IZDELKI TESTNEGA PROJEKTA

Uporabniku najzanimivejši izdelki testnega projekta so: orientirane poševne aerofotografije, digitalni model površja, popolni ortofoto, 3D mreža ter aplikacija za pregledovanje in 3D merjenje. V nadaljevanju sledi kratek opis vsakega izmed njih.

4.1 Orientirane poševne aerofotografije

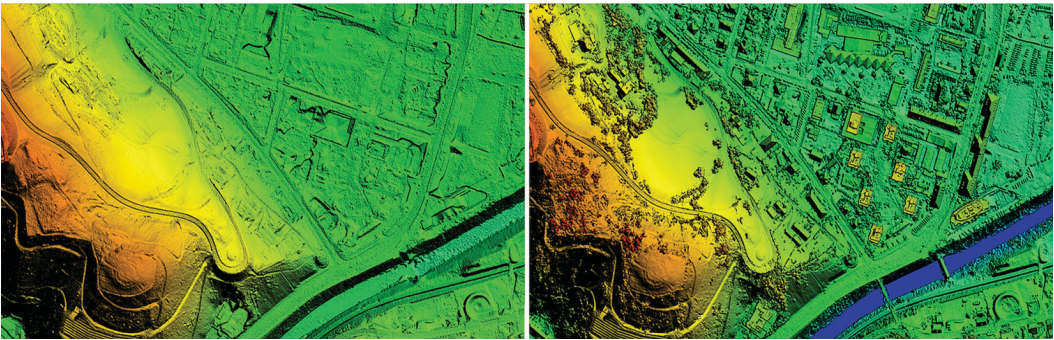
Orientirane poševne aerofotografije imajo natančno določene parametre zunanje orientacije (položaj projekcijskega centra in tri rotacije v 3D prostoru), ki se pridobijo po izvedenem postopku aerotriangulacije. Na sliki 4 je primer ogleda takšnih aerofotografij v spletnem pregledovalniku Oblivision. Na sredini je popolni ortofoto izbranega območja, ob kliku na posamezno lokacijo na popolnem ortofotu pa se ob straneh odprejo orientirane poševne aerofotografije istega območja, posnete z vseh štirih strani poševnega aerofotografiranja. S slike je razvidno, da poševne aerofotografije ponujajo veliko boljšo prostorsko in semantično predstavbo o izbrani stavbi, kot bi jo omogočale zgolj nadirne aerofotografije.



Slika 4: Ogled aerofotografij v spletnem pregledovalniku Oblivision (Oblivision, 2024), kjer je še mogoče videti aerofotografije za Ljubljano.

4.2 Digitalni model višin (DMV)

Za prikaz višinskih podatkov površja Zemlje običajno uporabljamo digitalni model višin (DMV), ki se deli na dva tipa: digitalni model reliefa (DMR), ki modelira teren, in digitalni model površja (DMP), ki modelira površje. DMR prikazuje površje Zemlje na način, da ne vsebuje nadzemnih objektov (slika 5 levo). DMP se izdelava s samodejno obdelavo nadirnih in/ali poševnih aerofotografij in modelira tudi nadzemne objekte. Na območjih brez vegetacije in objektov je enak DMR-ju. Digitalni model površja prikazuje višinske podatke v vseh točkah, kjer je ujemanje fotografij uspešno, vključno z nadzemnimi objekti, kot so stavbe, drevesa, mostovi itd. (slika 5 desno). Takšen model je pogosto pomemben pri načrtovanju infrastrukture, urbanističnem načrtovanju, analizah poplavnih območij in drugih področjih, kjer je potrebno podrobno poznavanje terena in objektov na njem.



Slika 5: Dva tipa digitalnega modela višin: DMR (levo) in DMP (desno) (vir: Flycom Technologies).

DMP, ki se generira iz aerofotografij, zajetih s sistemom za poševno aerofotografiranje, je v primerjavi z modelom površja, izdelanim samo iz nadirnih aerofotografij, veliko bogatejši in vsebuje tudi točke na fasadah stavb in drugih visokih objektih, kar omogoča tudi izdelavo bolj kakovostne 3D mreže.

4.3 Popolni ortofoto (POF)

Ortofoto (OF) je uveljavljen fotogrametrični izdelek, ki se zelo pogosto uporablja za najrazličnejše namene. Državni ortofoto je izdelan tako, da kot projekcijsko ploskev za preslikavo aerofotografije v ortofoto uporabimo digitalni model reliefa (DMR), ki je lokalno popravljen za namen izdelav ortofota na mostovih in viadukih. Geometrijsko pravilno se zato preslikajo le tiste vsebine z aerofotografije, ki ležijo na ploskvi reliefa. Kadar je na voljo digitalni model površja (DMP), lahko z njim nadomestimo DMR, s čimer je na ortofotu položajno pravilno prikazana tudi topografska vsebina, ki je nad reliefom (zgradbe, vegetacija). Takšen ortofoto imenujemo popolni ortofoto (POF). Popolni ortofoto je boljši izdelek kot klasični ortofoto, ker so zgradbe in drugi objekti, ki se dvigajo nad terenom, na njem prikazani na pravilnem ravninskem položaju, vidna pa je tudi vsebina v njihovi okolici (slika 6), če so preklopi med fotografijami dovolj veliki. Se pa na POF lahko pojavljajo različni fotoefekti, ki so najbolj vidni na robovih streh. Do njih prihaja prav zaradi premikov streh na pravilne lokacije in zapolnjevanja okolice stavb iz drugih fotografij.



Slika 6: Isto območje na klasičnem ortofotou iz leta 2021 (levo) ter na popolnem ortofotou, izdelanem v sklopu zajema poševnih aerofotografij leta 2023 (desno). Razvidno je, da so na popolnem ortofotou visoke zgradbe locirane na pravo pozicijo (ni zamika streh zaradi višine) ter da je vidna celotna okolica visokih zgradb: na klasičnem OF je lahko okolica zgradbe zakrita, saj je stavba »zvrnjena« (vir: GURS).

4.4 3D mreža

Iz oblaka točk DMP generiramo trikotniško 3D mrežo, ki je digitalna predstavitev 3D objekta, sestavljenega iz množice povezanih trikotnikov. Da je 3D mreža čimbolj podobna realnosti, se mreža zapolni z delčki fotografij. Na sliki 7 je primer ogleda 3D mreže v pregledovalniku LIFT. Pregledovalnik omogoča, da se poljubno gibljemo po digitalnem prostoru, si posamezne objekte ogledujemo z vseh strani ter izvajamo meritve. V tem primeru si torej ne ogledujemo posameznih poševnih aerofotografij (kot na sliki 4), ampak iz njih generirane 3D modele.

Taki samodejno generirani 3D modeli vsebujejo tudi veliko nepravilnosti, ko jih pogledamo od blizu. Vzrok je slabša kakovost slikovnega ujemanja (angl. *image matching*) na površinah, kot so steklene površine, gladke kovinske površine in tudi druge gladke površine brez strukture, povzročijo namreč nastanek točk DMP, ki jih na površju objekta v resnici ni.



Slika 7: Prikaz teksturirane 3D mreže v pregledovalniku LIFT (vir: Flycom Technologies).

4.5 Aplikacija za pregledovanje in 3D merjenje POF in poševnih aerofotografij

V okviru projekta je bila izdelana spletna aplikacija LIFT. Deluje na namiznih/prenosnih računalnikih, na tabličnih računalnikih in mobilnih telefonih. Omogoča uvoz in prikazovanje različnih vektorskih in rastrskih slojev. Primer ogleda POF ter pripadajočih poševnih aerofotografij je prikazan na sliki 8.



Slika 8: Poševne aerofotografije v pregledovalniku LIFT. Zgoraj na sredini je POF, okrog so poševne aerofotografije območja POF, zajete iz različnih smeri (vir: Flycom Technologies).

Za potrebe projekta je bila uporabljena tudi aplikacija Oblivision (slika 4).

5 UPORABNOST REZULTATOV

Če upoštevamo, da že ciklično aerofotografiranje Slovenije (CAS) zagotavlja številne informacije o zgrajenih ali naravnih objektih, s čimer ima zelo široko množico uporabnikov, potem si ni težko predstavljati, da je uporabna vrednost poševnega aerofotografiranja, ki poleg poševnih vsebuje tudi nadirne fotografije, še višja. Iz poševnih aerofotografij lahko pridobimo veliko več merskih in semantičnih informacij o objektih kot iz aerofotografij CAS. Pridobimo na primer informacije o stranskih ploskvah objektov, kot so fasade, stik objekta s terenom, število etaž ipd. Že samo z opazovanjem poševnih aerofotografij, ne da bi na njih izvajali meritve, je prostorska predstava o objektih v prostoru veliko natančnejša kot na aerofotografijah CAS. Nikakor pa ne smemo zanemariti, da so informacije na poševnih fotografijah oziroma v 3D mreži tudi merske. To pomeni, da lahko poleg dolžin in površin merimo tudi višine objekta, površine fasade, oken, pa tudi kote, naklone, volumne ipd. Prav tako je treba omeniti, da so geometrijske ločljivosti aerofotografij pri PAF večje kot v projektu CAS.

Poševne aerofotografije in iz njih izvedeni izdelki so uporabni v javnem in zasebnem sektorju, povsod, kjer potrebujejo semantično in mersko popolne 3D podatke o topografskih objektih. Tehnologija poševne aerofotografije se pogosto uporablja pri geodetskih meritvah, za kartiranje linijske infrastrukture (ceste, železnice, daljnovodi in podobno), kartiranje okoljskih sprememb, naravnih nesreč, pri upravljanju rek in jezer, nepremičnin, pri inženirskih meritvah, v kmetijstvu in gozdarstvu, pri načrtovanju prometa, v BIM in GIS, pri upravljanju gradbenih posegov v prostor in podobno. Poleg tega je poševne aerofotografije mogoče uporabiti še v pametnih mestih, kjer 3D modeli urbanistom zagotavljajo dosledne in zanesljive podatke za vizualizacijo projektov in oceno učinkov vseh pobud. Če 3D modele opremimo še z drugimi vektorskimi sloji, kot so ceste in stavbe, uporabnikom ponujajo bistveno bolj realističen pogled, kot če bi imeli podložen le ortofoto. Modele lahko še dodatno nadgradimo, na primer za analizo vpliva senc na posameznih objektih.

Teoretična uporabnost je torej velika. Kaj pa praktična? Katere države že uporabljajo poševne aerofotografije in iz njih izpeljane 3D modele? Kakšne so njihove izkušnje? Množične pokritosti celotnih površin držav s poševnimi aerofotografijami še ni zaslediti. Glede na ugotovitve v našem testnem projektu predpostavljamo, da je tako zaradi velike količine podatkov, zahteve po zelo zmogljivi programski in strojni opremi ter posledično zelo visoki ceni. Vendar pa se tehnologija kljub temu vsaj na manjših območjih uporablja v številnih državah. Od evropskih velja omeniti Nizozemsko, kjer imajo poševne aerofotografije za vso državo, vendar jih ponuja zasebni sektor in niso brezplačne. Tudi Črna gora je imela podatke za celo državo, vendar aplikacija ni več dostopna. Izrael uporablja PAF za kontrolo gradbišč, črnih odlagališč ipd. Italijani so s poševnimi aerofotografijami ocenjevali škodo po potresu leta 2016. Avstrija in vsa večja mesta v Nemčiji, Švedski in Norveški uporabljajo PAF za pomoč pri upravljanju (3D pametna mesta).

Najbolj pa velja izpostaviti Dansko, ki ima s poševnimi aerofotografijami (10 cm prostorska ločljivost) pokrito celo državo, podatki pa so javno dostopni in brezplačni za vse javne in komercialne uporabnike ter tudi posameznike. Podatki so dostopni (tudi) preko javnega pregledovalnika, s čimer se je njihova uporaba izredno povečala. V prvih 24 urah so namreč imeli 28 milijonov ogledov, že v letu 2018 pa več kot 3 milijarde poizvedb. Pobudnik projekta poševnega aerofotografiranja je bilo njihovo davčno ministrstvo (Skatteministeriet), na katerem so s tem želeli znižati stroške dragega terenskega dela, po njegovi uvedbi pa je postalo jasno, da je uporaba poševnih fotografij veliko širša in da imajo od njih veliko koristi tudi druge državne ustanove in številne zasebne družbe. Mednje se tako uvrščajo čistilci oken, arhitekti, nepremičninski agenti, upravljalci stavb ter mnogi drugi obrtniki, med katerimi navajajo tudi prodajalce robotskih kosilnic, solarna podjetja, zatiralce podgan, postavljalce gradbenih odrov itd. Podjetjem so se znižali stroški terenskega dela, saj so vse potrebne informacije pridobili kar iz poševnih aerofotografij. Javne službe poševne aerofotografije uporabljajo za opravljanje inšpekcijskih pregledov, za prostorsko načrtovanje, za pregled in meritve stanja po naravnih nesrečah in drugih izrednih razmerah in podobno. Uporabljajo jih gasilci, oskrbovalci z vodo in elektriko in še in še bi lahko naštevali. Dodatno uporabnost ima tudi izdelek poševnega aerofotografiranja, tj. popolni ortofoto, s katerim se uporabniki (predvsem resorna ministrstva) izognejo napačnim zajemom visokih objektov, kar se zaradi zvrnjenosti stavb lahko pripeti pri klasičnem ortofotu. Projekt se na Danskem izvaja ciklično na dve do tri leta za celotno državo.

6 SKLEP

Nobenega dvoma ni, da so poševne aerofotografije ter iz njih izpeljani izdelki lahko dragoceno orodje na različnih področjih, saj zagotavljajo podrobne vizualne in merske informacije za dokumentiranje, analizo, načrtovanje in sprejemanje odločitev. Z naprednimi tehnologijami lahko iz njih ustvarimo realističen 3D model topografskega površja (na primer mesta), ki je digitalna različica resničnega sveta. Posledično so vsi uporabniki »resničnega« prostora lahko tudi uporabniki realističnega 3D modela tega prostora. Poševne aerofotografije namreč uporabnikom omogočajo opazovanje in merjenje značilnosti grajenih objektov in preostalih površin iz različnih prostorskih pogledov (zornih kotov).

Kot geodeti, profesionalni merilci, prikazovalci in analitiki prostorskih podatkov bi morali komaj čakati, da s poševnimi aerofotografijami pokrijemo tudi našo prelepo Slovenijo. Kaj nas torej ovira? Tehnologijo poznamo, idej za uporabo izdelkov imamo veliko, pripravljen imamo tudi pregledovalnik. Ja, prav imate, ovira je, kot običajno, višja cena v primerjavi z obstoječimi cikličnimi zajemi podatkov daljinskega zaznavanja. Dobro poznanim izdelkom CAS se sedaj ciklično pridružujejo še izdelki CLSS, na vidiku pa so, kot smo predstavili v prispevku, tudi izdelki PAF. Poleg tega se prostor spreminja in zahteva vedno krajši čas med posodobitvami zbirk prostorskih podatkov, slednje pa zahteva stalno periodično financiranje. Verjetna množična uporaba izdelkov PAF na različnih področjih kliče k temu, da bo treba razmišljati tudi o nestandardnih načinih financiranja in združiti moči. Ampak to je že zgodba za kakšen drug članek.

Zahvala:

Projekt *Poševno aerofotografiranje – test* ter dopolnilni projekt *Kontrola testnega poševnega aerofotografiranja* je financirala Evropska unija (NextGenerationEU) preko mehanizma Načrt za okrevanje in odpornost iz razvojnega področja Digitalna preobrazba v okviru investicije Zeleni slovenski lokacijski okvir.

Literatura in viri:

Oblivision (2024). Spletna platforma Oblivision, dostopna na www.idansoft.com, pridobljeno 5. 1. 2024.

PhaseOne (2024). PhaseOne. <https://www.phaseone.com/>, pridobljeno 20. 2. 2024.

dr. Andreja Švab Lenarčič, univ. dipl. inž. geod.

Območna geodetska uprava Murska Sobota
Murska Sobota, Lendavska ulica 18, SI-9000 Murska Sobota
e-naslov: andreja.svab-lenaric@gov.si

mag. Vasja Bric, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana
e-naslov: vasja.bric@gis.si

mag. Katja Oven, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana
e-naslov: katja.oven@gis.si

Katja Šušteršič, univ. dipl. inž. geod.

Flycom Technologies, Celovška cesta 520, 1210 Ljubljana
e-naslov: katja.sustersic@flycom.si

Peter Prešeren, univ. dipl. inž. geod.

Geodetska uprava Republike Slovenije
Ljubljana, Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: peter.preseren@gov.si

