

POPOLNI ORTOFOTO V URBANIH OKOLJIH

TRUE ORTHOPHOTO IN URBAN AREAS

Mojca Kosmatin Fras, Katja Šušteršič, Aleksandar Šašić Kežul

UDK: 528.9

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.02

Prispelo: 12. 1. 2021

Sprejeto: 25. 2. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2021.01.27-45

REVIEW ARTICLE

Received: 12. 1. 2021

Accepted: 25. 2. 2021

IZVLEČEK

Popolni ortofoto je v urbanih okoljih boljši izdelek kot klasični ortofoto, ker so zgradbe na njem prikazane na pravilnem ravninskem položaju, vidna je tudi vsebina v njihovi okolici. Glavni cilj naše raziskave je bil preizkusiti dva postopka izdelave popolnega ortofota: a) postopek na podlagi digitalnega modela reliefa in digitalnega modela zgradb ter b) postopek samodejne izdelave popolnega ortofota. Raziskavo smo izvedli na dveh študijskih območjih v mestni občini Ljubljana. Oba postopka in izdelane popolne ortofote smo primerjali s klasično izdelanim ortofotom, ocenili smo tudi časovno komponento izdelave. Za popolni ortofoto potrebujemo aerofotografije z večjim prekrivanjem kot za izdelavo klasičnega ortofota, zato se čas aerofotografiranja poveča za približno 25 odstotkov. Čas ročne obdelave, v primerjavi s postopkom izdelave klasičnega ortofota, se pri postopku samodejne izdelave popolnega ortofota zmanjša za faktor 0,27, oziroma se pri postopku izdelave popolnega ortofota na podlagi digitalnega modela reliefa in digitalnega modela zgradb poveča za faktor 2,75. Estetski videz samodejno izdelanega popolnega ortofota je nekoliko slabši le na robovih streh zgradb, ki so rahlo nazobčane. Če upoštevamo vse navedene vidike, je samodejno izdelan popolni ortofoto konkurenčen klasičnemu ortofotu.

KLJUČNE BESEDE

popolni ortofoto, klasični ortofoto, samodejna izdelava popolnega ortofota, vektorizacija zgradb, lidarski oblak točk, aerofotografiranje

ABSTRACT

True orthophoto is a better product than a classical orthophoto in urban areas, because buildings are depicted in the correct plane position, and the content around the building is also visible. The main goal of our research was to verify two approaches of a true orthophoto production: a) true orthophoto production based on digital terrain model and digital building model, and b) automatic true orthophoto production. We performed the research in two test areas within the Municipality of Ljubljana. We compared the both procedures and the produced true orthophotos with the classical orthophoto, and assessed the production time component as well. To produce true orthophoto, larger overlapping of aerial images is required, thus the time for aerial surveying is increased by approximately 25 percentage. The time of manual work, compared to classical orthophoto production, is lower by the factor 0.27 for automatically produced true orthophoto, and is greater by the factor 2.75 for the true orthophoto based on digital terrain model and digital building model. Aesthetic appearance of automatically produced orthophoto has only minor shortcomings on the buildings' roof edges which are slightly serrated. Considering all the mentioned aspects, the automatically produced true orthophoto is competitive with the classical orthophoto.

KEY WORDS

true orthophoto, classical orthophoto, automatic true orthophoto production, building vectorisation, lidar point cloud, aerial surveying

1 UVOD

Ortofoto je v svetovnem merilu uveljavljen fotogrametrični izdelek, ki se tudi v slovenski praksi zelo pogosto uporablja za najrazličnejše namene (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2020). V Sloveniji se od sredine 90. let 20. stoletja iz aerofotografij cikličnega aerofotografiranja Slovenije z digitalno tehnologijo izdeluje državni ortofoto (Kosmatin Fras, Fabiani in Triglav Čekada, 2014). Ortofoto je mogoče izdelati iz satelitskih podob (Marsetič, Oštir in Kosmatin Fras, 2015; Marsetič in Pehani, 2019), dandanes je tudi eden od osnovnih izdelkov fotogrametrične obdelave fotografij z daljinsko vodenih letalnikov (Nex in Remondino, 2014).

Izraz klasični ortofoto se nanaša na osnovni, tradicionalni način izdelave ortofota z začetkom v drugi polovici 80. let 20. stoletja. Projekcijska ploskev za preslikavo aerofotografije v ortofoto je digitalni model reliefa (DMR). Geometrijsko pravilno se preslikajo le tiste vsebine s fotografije, ki so na ploskvi reliefa. Za izdelavo popolnega ortofota se za projekcijsko ploskev na območjih, kjer so grajeni objekti, uporabi digitalni model zgradb (DMZ) ali pa se DMR nadomesti z digitalnim modelom površja (DMP) (Nielsen, 2004). V ortogonalni projekciji je tako pravilno prikazana tudi topografska vsebina, ki je nad reliefom (zgradbe in mostovi, vegetacija). Čeprav je osnovno načelo izdelave klasičnega in popolnega ortofota enako, je proces izdelave popolnega ortofota kompleksnejši. Napredek na različnih področjih je šele ob koncu 20. stoletja omogočil izdelavo popolnega ortofota (angl. *true orthophoto*) (Amhar, Jansa in Ries, 1998; Schickler in Thorpe, 1998; Nielsen, 2004). Prostorska ločljivost aerofotografij je vse boljša, poleg tega vse zmogljivejši računalniki omogočajo hitro obdelavo velikih količin podatkov. Na operativnost izdelave popolnega ortofota so vplivali predvsem novi, učinkoviti algoritmi slikovnega ujemanja in lidarska tehnologija, ki oboji omogočajo izdelavo podrobnih digitalnih modelov površja in digitalnih modelov zgradb. Zaradi velikega povpraševanja po ortofotu, ki je bolj ažuren in ekonomičen izdelek od vektorsko zajetih podatkov, in zaradi zahtev uporabnikov po vse večji kakovosti popolni ortofoto, predvsem na urbanih območjih, pridobiva prednost pred klasičnim.

Izdelava popolnega ortofota kljub temu še ni zelo razširjena (Šašić Kežul, 2020). Razlog je predvsem v kompleksni obdelavi podatkov in s tem povezani razmeroma visoki ceni izdelka še do pred nekaj leti. Z velikim napredkom v programskih rešitvah in avtomatizaciji so se ti postopki v zadnjem času poenostavili in skrajšali, tako da je izdelava popolnega ortofota vse bolj ekonomična. Na trgu so dostopna različna programska orodja, ki omogočajo skoraj popolno samodejno obdelavo fotografij in izdelavo popolnega ortofota visoke prostorske ločljivosti. Države srednje in severne Evrope že opuščajo izdelavo klasičnega ortofota in se odločajo za popolni ortofoto. Združenje geodetskih uprav Nemčije je tako na primer sprejelo standarde kakovosti za izdelavo popolnega ortofota za celotno državo (Baltrusch, 2017). V Sloveniji se v okviru državnega projekta Ciklično aerofotografiranje Slovenije izdeluje klasični ortofoto (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2020), pri čemer se v DMR upoštevajo površine mostov in prometnic, ki so nad ali pod terenom, ne pa tudi zgradbe.

1.1 Pregled raziskav

Znanstvene vsebine, povezane z različnimi pristopi in metodami za izdelavo popolnega ortofota iz fotogrametričnih letalskih fotografij, so že obravnavali različni avtorji. Andresen (2004) opiše osnovne korake pri izdelavi klasičnega in popolnega ortofota, pri čemer poudari pomen in prednosti popolnega ortofota v mestih. Teoretične podlage in težave pri postopku izdelave popolnega ortofota ter praktični primer so opisali Biasion, Dequal in Lingua (2004). Pomen popolnega ortofota v urbanih območjih v

povezavi z geografskimi informacijskimi sistemi izpostavita Habib in Kim (2006). Lidarska tehnologija omogoča izdelavo podrobnih DMR in DMP, ki se lahko uporabijo pri izdelavi popolnega ortofota. Disa et al. (2011) so analizirali različne možnosti implementacije lidarskih oblakov točk pri izdelavi popolnega ortofota. Uporabljata se v glavnem dva pristopa: a) izdelava se DMP in b) s polsamodejnimi metodami se izdelava vektorski model zgradb, ki se kombinira z DMR. Uporabnost fotogrametričnih oziroma lidarskih oblakov točk v procesu izdelave ortofota sta v raziskavi preverjala Gharibi in Habib (2018). Ugotovila sta, da je popolni ortofoto, izdelan na osnovi lidarskega modela površja, nekoliko boljše kakovosti. Pri DMP, ki je izdelan iz fotogrametričnega oblaka točk, lahko pride na območju med zgradbami in okolico do nepravilne detekcije slikovnih točk, kar se na popolnem ortofotu odraža v netočnem prikazu robov streh zgradb. Haggag, Zahran in Salah (2018) so predstavili postopek izdelave popolnega ortofota na študijskem primeru, pri katerem so uporabili letalske fotografije visoke prostorske ločljivosti (10 cm) in preklap fotografij 80 % v vzdolžni in prečni smeri. Po orientaciji bloka aerofotografij z aerotriangulacijo so izdelali DMP z uporabo metode polglobalnega iskanja ujemanja (angl. *semi-global matching*, SGM). Ker so DMP izdelali iz istih fotografij kot popolni ortofoto, so lahko natančneje določili zakrita območja in tako zmanjšali pojav večkratne preslikave.

1.2 Cilji raziskave in struktura članka

V raziskavi smo si zastavili dva glavna raziskovalna cilja, za katera v obstoječi literaturi nismo našli ustreznih odgovorov: (a) preizkus dveh postopkov za izdelavo popolnega ortofota in njuna primerjava s klasičnim ortofotom ter (b) analiza prednosti in slabosti samodejno izdelanega popolnega ortofota v primerjavi s klasičnim ortofotom. Popolni ortofoto smo izdelali na dva načina: s postopkom na podlagi DMR in DMZ, ki je zelo zamuden, in s samodejnim postopkom, ki je časovno in s tem tudi stroškovno veliko ugodnejši. Z raziskavo smo želeli najti tudi odgovor na raziskovalno vprašanje, ali je samodejno izdelani popolni ortofoto z vidika popolnosti vsebine in estetskega videza enako kakovosten kot popolni ortofoto, izdelan na podlagi DMR in DMZ. Analize ravninske točnosti izdelanih ortofotov v prispevku ne obravnavamo, ker je to tema, ki je že dobro raziskana, in se v projektih izvaja v skladu z zahtevami naročnikov.

Osnovna načela izdelave klasičnega in popolnega ortofota predstavimo v drugem poglavju. V tretjem poglavju obravnavamo študijsko območje, vhodne podatke, uporabljeno opremo in metodologijo različnih načinov izdelave ortofota. Opišemo konkretne postopke izdelave klasičnega ortofota in popolnih ortofotov, izdelanih na dva načina. V četrtem poglavju predstavimo rezultate in njihovo analizo. Ocenimo popolnost vsebine in estetski videz izdelanih ortofotov ter analiziramo prednosti in slabosti samodejno izdelanega popolnega ortofota v primerjavi s klasičnim ortofotom. V zaključku strnemo ugotovitve in izpostavimo prednosti samodejno izdelanega popolnega ortofota.

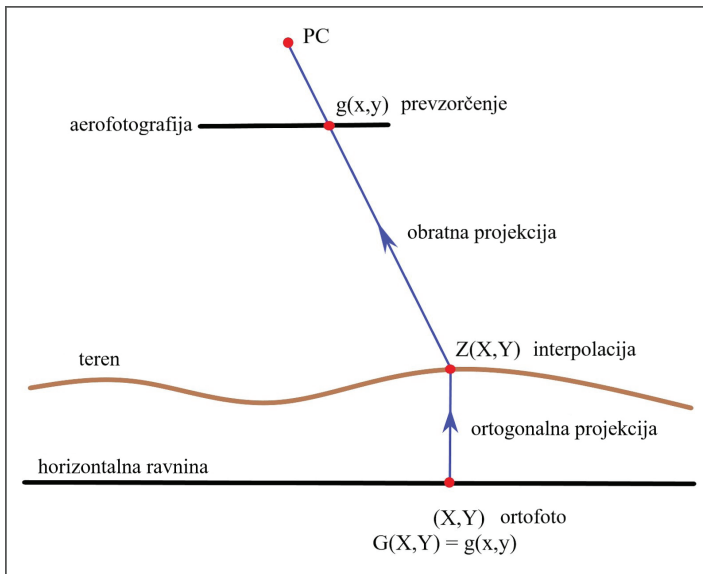
2 NAČELO IZDELAVE KLASIČNEGA IN POPOLNEGA ORTOFOTA

2.1 Klasični ortofoto

Vhodni podatki za izdelavo klasičnega ortofota so georeferencirane aerofotografije in DMR, popravljen za namen izdelave ortofota (na primer mostovi, viadukti in podobno). Georeferenciranje aerofotografij se izvede v projektu aerotriangulacije, v okviru katerega se izračunajo parametri zunanje orientacije vseh

fotografij, ki sestavljajo fotogrametrični blok (Kraus, 2007). Ker se za fotografiranje uporabijo veliko- ali srednjeformatni merski fotogrametrični fotoaparati, parametre notranje orientacije pridobimo s kalibracijskim certifikatom proizvajalca. Aerofotografije v fotogrametričnem bloku se med seboj deloma prekrivajo, in sicer v vzdolžni smeri (smer zajema fotografij v snemalnem pasu) in v prečni smeri (prekrivanje med snemalnimi pasovi). Za izdelavo klasičnega ortofota se fotografiranje izvede s prekrivanjem 60–80 % v vzdolžni smeri in 20–30 % v prečni smeri.

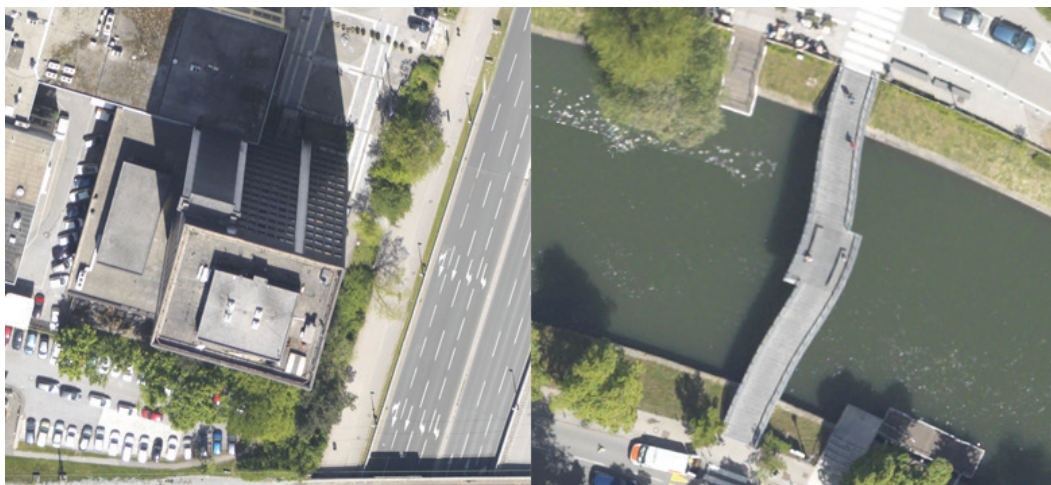
Digitalni model reliefa (slika 3a) je lahko neodvisen vhodni vir ali pa se izdelava iz fotografij v okviru istega projekta na podlagi algoritmov slikovnega ujemanja. Zaradi enostavnosti obdelave in hranjenja se najpogosteje uporablja digitalni model višin (DMV) kot rastrska oblika zapisa DMR. Kakovost DMR ima velik vpliv na kakovost ortofota. V splošnem je kakovost določitve ploskve reliefa odvisna od točnosti in gostote podanih višin ter razgibanosti reliefa (Kosmatin Fras, 2004). V Sloveniji se je v začetnem obdobju izdelave državnega ortofota DMR izdeloval s slikovnim ujemanjem iz istih fotografij, iz katerih je bil izdelan ortofoto. Dandanes se pogosto uporabijo lidarski podatki. Način izdelave klasičnega ortofota je prikazan na sliki 1.



Slika 1: Način izdelave klasičnega ortofota.

Pri izdelavi ortofota se vsebina fotografije, ki je upodobljena v centralni projekciji, ortogonalno projicira na izbrano (običajno horizontalno) ravnino. V praksi se uporabi posredni postopek (obratna projekcija), kjer se pikslu ortofota na lokaciji (X, Y) določi radiometrična vrednost (G) na podlagi njegovih izračunanih slikovnih koordinat (x, y) in prevzorčenja radiometričnih vrednosti (g) na fotografiji. Pripadajočo višino Z za piksel ortofota (X, Y) določimo z interpolacijo med višinami, s katerimi je definirana ploskev reliefa, slikovne koordinate pa izračunamo s kolinearnimi enačbami centralne projekcije (Kraus, 2007). Ta postopek se imenuje posredni zato, ker izhajamo iz pikselov na ortofotu, in ima prednost pred neposrednim postopkom, pri katerem izhajamo iz pikselov na fotografiji, saj dobimo za vsak piksel ortofota samo eno radiometrično vrednost.

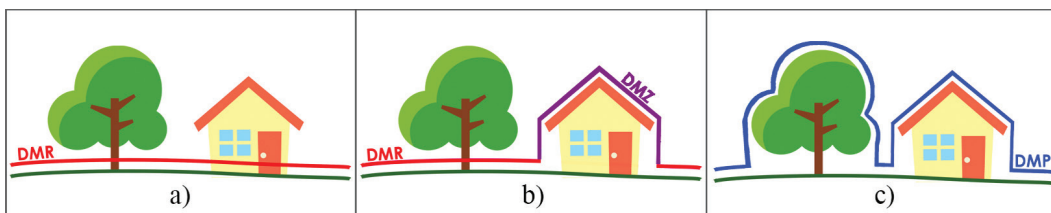
Ortofoto je 2D-izdelek, kot pa je razvidno s slike 1, je višina Z na reliefu funkcija ravninskih koordinat (X,Y). Iz opisanega načela izdelave sledi, da se na ortofotu na pravilnem ravninskem položaju prikaže le vsebina, ki je na ploskvi reliefa. Grajeni objekti in vegetacija se na klasičnem ortofotu prikažejo premaknjeno (slika 2). Velikost odmika od pravega položaja je odvisna od več dejavnikov (goriščne razdalje objektiva, velikosti senzorja, višine fotografiranja, razgibanosti terena, relativne višine objekta nad terenom, oddaljenosti objekta od glavne točke fotografije) in je, na primer, na državnem ortofotu lahko tudi več metrov (Triglav Čekada, 2016).



Slika 2: Primer klasičnega ortofota. Slika levo: streha prikazane zgradbe je premaknjena glede na temelje, deloma se vidita tudi dve fasadi; zaradi centralne projekcije fotografij zvrnjen položaj zgradbe zakriva vsebino, ki je ob zgradbi. Slika desno: most čez reko je prelomljen in zvit, ker projekcijska ploskev ne poteka po površini mostu.

2.2 Popolni ortofoto

Popolni ortofoto se izdelava po enakem načelu kot klasični ortofoto, le da pri njem uporabimo drugo ploskev preslikave. Lahko uporabimo kombinacijo DMR in DMZ (slika 3b) ali DMP, ki poleg zgradb vključuje tudi zgornjo ploskev vegetacije (slika 3c).

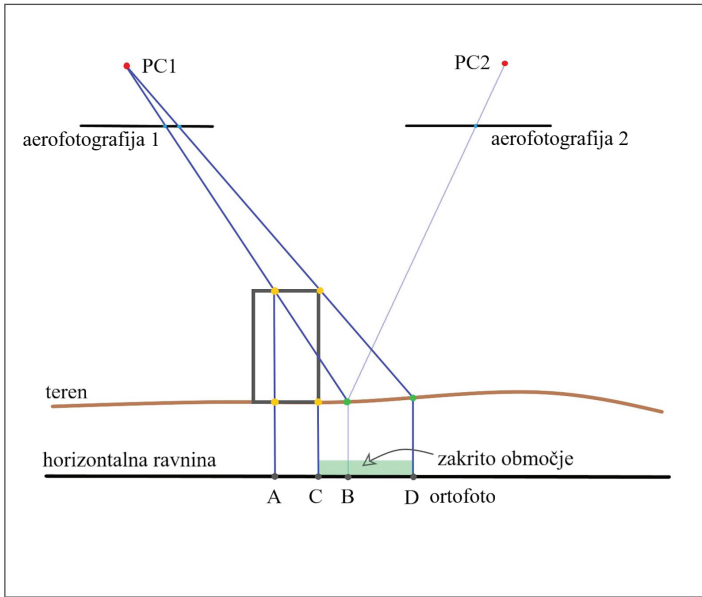


Slika 3: (a) Projekcijska ploskev pri izdelavi klasičnega ortofota je DMR; (b) projekcijska ploskev pri izdelavi popolnega ortofota je lahko kombinacija DMR (na odprtem terenu in pod vegetacijo) in DMZ ali (c) DMP.

Ta, na videz manjša razlika v vhodnih podatkih v postopku povzroči dve težavi, ki z algoritmi nista enostavno rešljivi: a) zaradi perspektivne preslikave so nekatere vsebine zakrite oziroma so v senci višjih objektov (angl. *hidden areas*; *shadow areas*) ter b) na ortofotu se vsebine, ki so nad reliefom, preslikajo večkrat (angl. *double mapping*; tudi: *ghost effect*). Poglejmo si to na primeru zgradbe (slika 4). Točka A se bo na območju strehe

zgradbe pravilno preslikala. V zakritem območju (med točkama C in D) na aerofotografiji 1 ni prave vsebine, zato se bo na primer točka B, ki je na površju reliefa, na ortofotu preslikala z isto vsebino kot točka A.

Težavo vsebine na zakrilih območjih lahko rešimo le tako, da imamo na voljo aerofotografijo iz drugega zornega kota (aerofotografija 2 na sliki 4), na kateri je vidna zakrita vsebina. Iz tega sledi, da lahko celotno fotografsko vsebino na nekem območju zagotovimo le, če prekrivanje aerofotografij v vzdolžni in prečni smeri teoretično znaša najmanj 50 %.



Slika 4: Težave pri izdelavi popolnega ortofota: območje med C-D je na aerofotografiji 1 zakrito; točka A se na ortofotu preslika dvakrat, če prej nismo opredelili zakritega območja; prava vsebina med C-D je na aerofotografiji 2.

Prekrivanje fotografij v vzdolžni smeri je že pri klasičnem načinu aerofotografiranja običajno najmanj 60 %, prečno prekrivanje pa ne ustreza zahtevam za izdelavo popolnega ortofota. Za izdelavo popolnega ortofota je splošno priporočilo vzdolžno prekrivanje 80 % in prečno prekrivanje vsaj 60 % (Li et al., 2020). Če je na nekem območju zelo gosta pozidava in so zgradbe visoke, potem je za dober rezultat potrebno še višje prekrivanje, celo do 80 % v obeh smereh. To seveda pomeni tudi daljši čas snemanja in s tem višji fiksni strošek v projektu, kar bomo podrobneje opisali v poglavju 4.2.

Z zagotovitvijo ustreznih vhodnih fotografij še ne rešimo celotne težave, potrebujemo namreč tudi ustrezen računalniški program. Algoritem za izdelavo popolnega ortofota mora dobro izvesti dve nalogi: a) najprej določiti, kje so zakrita območja, zato da se prepreči večkratna preslikava vsebine, ter b) za zakrita območja poiskati ustrezno vsebino na sosednjih fotografijah. Razvitih je bilo več metod za iskanje zakrilih območij. Li et al. (2020) so izdelali podroben pregled teh metod, kjer so predstavili različne načine pri iskanju zakrilih območij in izpostavili glavne težave posameznih algoritmov. Algoritme razvrščajo v naslednjih šest glavnih kategorij: algoritem Z-pasu (angl. *Z-buffer algorithm*), algoritem določanja senc na osnovi kotov (angl. *angle-based shadow detection algorithm*), algoritem določanja senc na osnovi višin (angl. *height-based shadow detection algorithm*), določanje vektorskih poligonov (angl. *vector-based*

polygons), sinteza na osnovi tekstur (angl. *texture-based synthesis*) in objektno orientirani algoritmi (angl. *object-oriented algorithms*).

Ne glede na to, kateri algoritem je implementiran v posameznem računalniškem programskem paketu za izdelavo popolnega ortofota, vpliva na natančnost določitve zakritih območij tudi digitalna ploskev preslikave. Če so strehe in obrisi zgradb natančno definirani v digitalnem modelu zgradb, potem bo natančno določeno tudi območje zakrivanja. Če pa je vhodni podatek DMP, v katerem obrisi zgradb niso natančno določeni, potem tudi zakrita območja niso natančno definirana. Slednje se na popolnem ortofotu pokaže v obliki nazobčanih robov zgradb. Izdelava digitalnega modela zgradb je zahtevna in dolgotrajna, kar pomeni, da za izdelavo popolnega ortofota potrebujemo precej več časa in denarja. Zato je ekonomsko bolj učinkovito, če se kot vhodni podatek uporabi DMP, ki pa lahko da precej slabši estetski rezultat izdelanega ortofota (neostri ali nazobčani robovi streh zgradb). V raziskavi, ki smo jo izvedli, smo zato med drugim želeli preveriti, ali s sodobnimi orodji za izdelavo popolnega ortofota dobimo dovolj dobre rezultate tudi s samodejnim postopkom, pri katerem uporabimo DMP.

3 RAZISKAVA NA ŠTUDIJSKEM PRIMERU

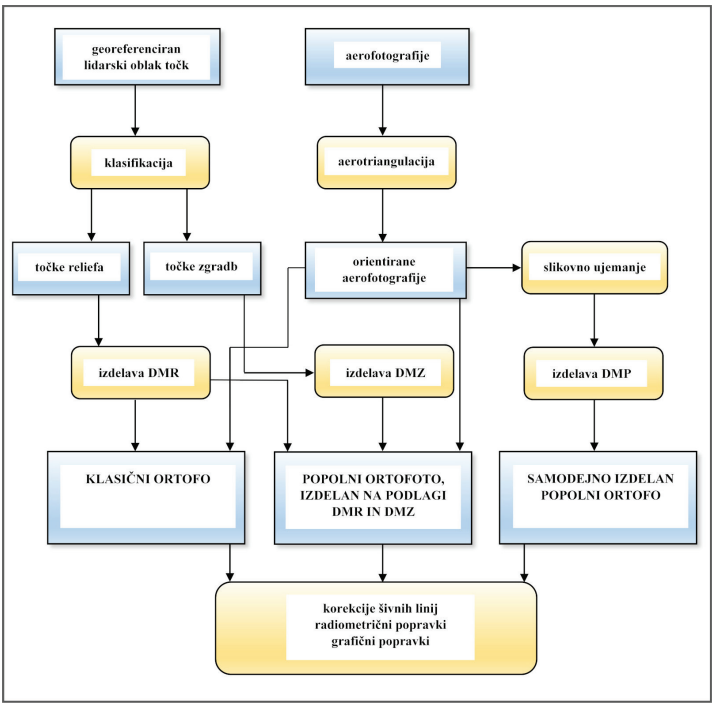
Raziskavo smo izvedli na dveh območjih v mestni občini Ljubljana, ki imata različno gostoto in vrsto pozidave (slika 5). Prvo območje (A) je v starem delu Ljubljane in vsebuje strnjeno gradnjo večnadstropnih zgradb (veliko je približno 700 metrov x 500 metrov). Drugo območje (B) je v mestni četrti Dravljje, kjer je redkejša pozidava z enodružinskimi hišami (veliko je približno 500 metrov x 400 metrov).



Slika 5: Študijski območji raziskave v mestni občini Ljubljana. Območje A je v starem mestnem središču Ljubljane, območje B je v mestni četrti Dravljje.

V raziskavi smo uporabili aerofotografije in lidarski oblak točk, oboje zajeto v aprilu 2019. Naročnik je bila Mestna občina Ljubljana. Prekrivanje med aerofotografijami je 70 % vzdolžno in 50 % prečno,

ker aerofotografiranje ni bilo posebej namenjeno za izdelavo popolnega ortofota. Aerofotografiranje in lidarsko snemanje sta bila izvedena na višini približno 750 metrov nad terenom, posamezna aerofotografija vsebuje okrog 60 megapikslov, dolžina talnega vzorca (angl. *ground sample distance*) je 10 centimetrov. Prekrivanje aerofotografij sicer ni optimalno glede na priporočila za izdelavo popolnega ortofota (Lie et al., 2020), vendar zadošča (teoretično je dovolj 50 % v obeh smereh). Raziskava je bila namreč izvedena pred projektom izdelave popolnega ortofota za celotno območje Mestne občine Ljubljana, za katero je bilo izvedeno novo aerofotografiranje z večjim preklopom (aprila 2020). Kot je bilo že navedeno v poglavju 1.1, v znanstveni literaturi nismo našli ustreznih raziskav, iz katerih bi lahko črpali informacije, potrebne za izdelavo popolnega ortofota na tako velikem projektu.



Slika 6: Grafični prikaz izdelave klasičnega ortofota, popolnega ortofota, izdelanega na podlagi DMR in DMZ, in samodejno izdelanega popolnega ortofota.

Za izdelavo klasičnega ortofota in popolnega ortofota, izdelanega na podlagi DMR in DMZ, smo uporabili v prejšnjem odstavku opisane aerofotografije in lidarski oblak točk. Povprečna gostota oblaka točk za prvi in zadnji odboj je bila 18 točk/m². Digitalni model površja, ki smo ga uporabili v postopku samodejne izdelave popolnega ortofota, smo izdelali s slikovnim ujemanjem iz istih letalskih fotografij kot popolni ortofoto.

Za izdelavo popolnega ortofota in obdelavo lidarskih podatkov smo v naši študiji uporabili naslednje programe:

- **Phocus**: program za radiometrično popravo surovih fotografij in pretvorbo formata zapisa;

- **MatchAT**: izvedba aerotriangulacije za namen samodejne izdelave popolnega ortofota; podatke orientacije fotografij je iz tega programa mogoče neposredno uvoziti v program SURE;
- **RiPROCESS**: programski paket za obdelavo surovih lidarskih podatkov in grobo registracijo oblaka točk;
- **Terrasolid** programski paket z vtičniki za okolje Microstation:
 - TerraScan: upravljanje in obdelava lidarskih podatkov, vektorizacija zgradb,
 - TerraMatch: georeferenciranje lidarskih podatkov,
 - TerraModeler: modeliranje in vizualizacija 3D-modelov,
 - TerraPhoto: orodje za izdelavo klasičnega ortofota in popolnega ortofota, izdelanega na podlagi DMR in DMZ; vključuje tudi postopek aerotriangulacije;
- **SURE**: programski paket za samodejno izdelavo popolnega ortofota.

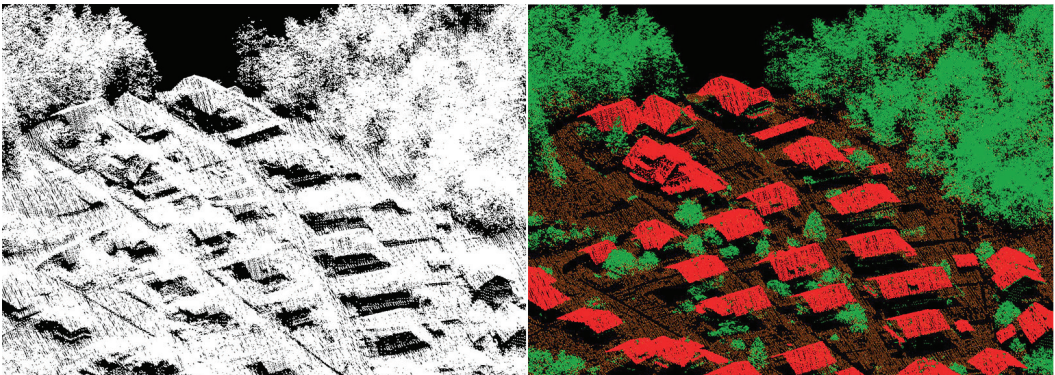
Na sliki 6 je predstavljena metodologija izdelave ortofotov. Za vsako od obeh testnih območij (A in B) smo izdelali po tri različne ortofote: (a) klasični ortofoto, (b) popolni ortofoto, izdelan na podlagi DMR in DMZ iz klasificiranega lidarskega oblaka točk, in (c) samodejno izdelan popolni ortofoto.

Vhodni podatki so aerofotografije in georeferencirani lidarski oblak točk. Priprava aerofotografij, ki vključuje radiometrične popravke in aerotriangulacijo, je enaka za vse tri načine izdelave ortofota. S klasifikacijo smo iz lidarskega oblaka točk določili točke reliefa in točke zgradb, ki smo jih uporabili za izdelavo DMR oziroma DMZ. Postopke izdelave posamezne vrste ortofota opisujemo v podpoglavjih 3.1, 3.2 in 3.2.

3.1 Izdelava klasičnega ortofota

Klasični ortofoto smo v vtičniku TerraPhoto izdelali iz orientiranih aerofotografij in DMR v obliki nepravilne trikotniške mreže iz lidarskega oblaka točk. V aplikaciji TerraScan smo izvedli klasifikacijo oblaka točk v tri glavne razrede: relief, vegetacija in zgradbe (slika 7). Rezultate samodejne klasifikacije smo vizualno pregledali v aplikacijah TerraModeler in TerraScan ter popravili napake in višine na območjih mostov.

Ko so vhodni podatki ustrezno pripravljene, je izdelava mozaika iz ortorektificiranih fotografij samodejna (slika 8).

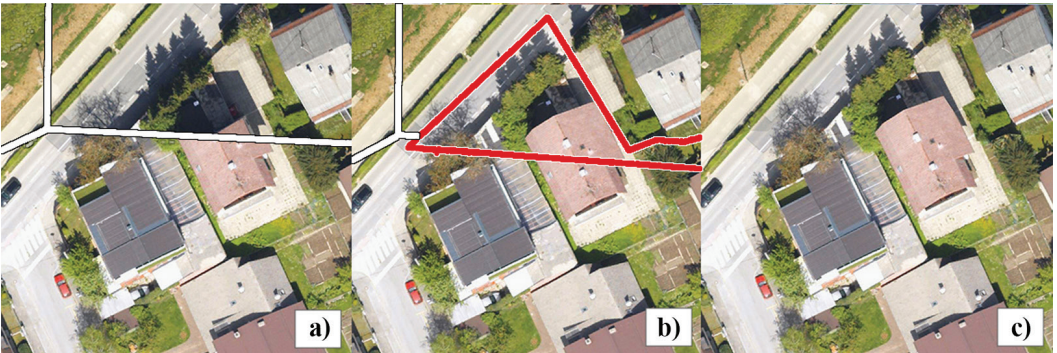


Slika 7: Prikaz neklasificiranega oblaka točk (levo) in oblaka točk, klasificiranega na kategorije (desno): relief, vegetacija, zgradbe.



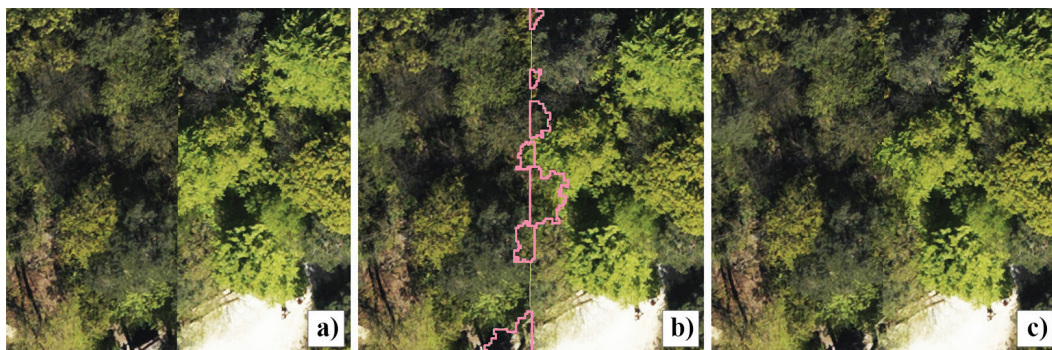
Slika 8: Samodejno izdelan klasični ortofoto mozaik za študijsko območje A.

Na koncu je treba mozaik še vizualno pregledati in ročno obdelati, s čimer uredimo šivne linije med posameznimi ortorektificiranimi fotografijami. Največ težav pri mozaičenju nastane na območjih zgradb. Program TerraPhoto, ki smo ga uporabili za izdelavo klasičnega ortofota, omogoča izdelavo ortofoto mozaika s korekcijskimi poligoni, s katerimi lahko ročno določimo, kateri deli ortorektificiranih fotografij se prikažejo v mozaiku. Primer urejanja šivnih linij je prikazan na sliki 9.



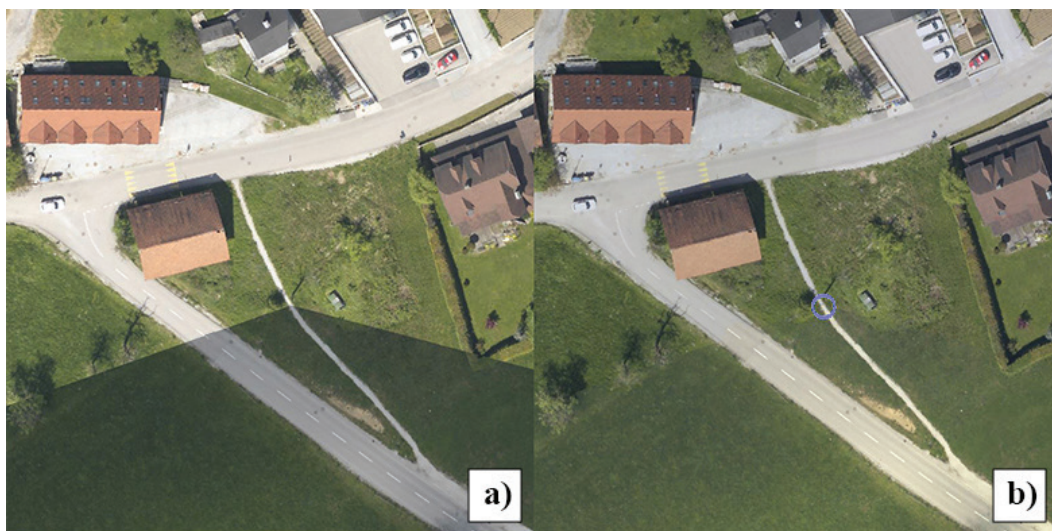
Slika 9: Popravljanje šivnih linij s korekcijskimi poligoni; a) prikazane so samodejno določene šivne linije; b) ročno določimo območje in fotografijo z ustrezno vsebino; c) rezultat ročno urejenega mozaika.

Po končanem ročnem pregledu in popravi šivnih linij se izvede še samodejna poprava šivnih linij. Algoritem poišče preostale napake na mejah med fotografijami in samodejno generira korekcijske poligone. S tem postopkom se izboljšajo predvsem prehodi med fotografijami na območjih gozdov (slika 10).



Slika 10: Izboljšanje prehodov med fotografijami na območjih gozdov s samodejnimi korekcijskimi poligoni: a) samodejno določena šivna linija; b) samodejno določeni korekcijski poligoni; c) šivne linije so manj opazne.

Sledijo radiometrične korekcije (slika 11) in končno grafično urejanje ortofoto mozaika.

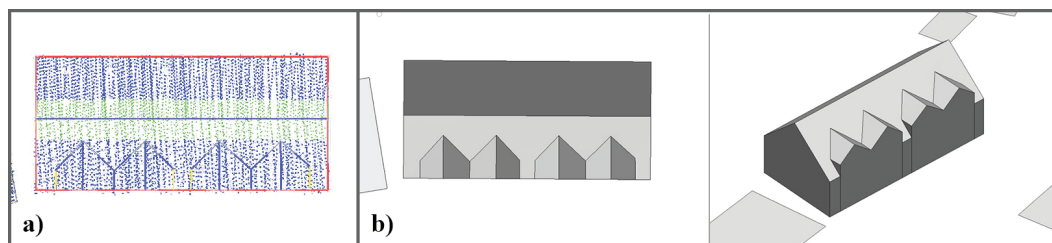


Slika 11: Primer radiometrične korekcije ortofota: a) velike razlike v svetlosti v ortomozaiku; b) radiometrična izboljšava ortomozaika; z modrim krogom je označeno mesto, kjer smo v programu določili mesto za izračun radiometričnih popravkov.

3.2 Izdelava popolnega ortofota na podlagi DMR in DMZ

Digitalni model zgradb, ki ga v tem postopku potrebujemo kot vhodni podatek, lahko izdelamo na različne načine. V našem primeru smo ga v programu Terrascan izdelali samodejno iz klasificiranega lidarskega oblaka točk, in sicer iz točk v razredu zgradbe. Kakovost samodejne vektorizacije robov streh zgradb je zelo odvisna od kakovosti predhodno izvedene klasifikacije in gostote oblaka točk. Večja gostota točk omogoča izdelavo natančnejših modelov zgradb. V našem primeru smo uporabili izvorno gostoto točk.

Samodejno izdelane vektorske 3D-modele zgradb smo nato ročno pregledali in popravili z vgrajenimi orodji, ki ohranjajo topologijo modelov ter omogočajo njihovo hitro in enostavno urejanje. Kljub temu je ta del postopka precej zamuden in se zaradi njega celoten časovni obseg izdelave popolnega ortofota zelo podaljša (podrobneje je to opisano v poglavju 4.2). Rezultat vektorizacije so 3D-ploskovni modeli streh, sten in zunanjih obodov zgradb (slika 12).



Slika 12: a) Primer vektorizirane zgradbe iz klasificiranega oblaka točk in b) izdelan ploskovni model.

Iz ustrezno pripravljenih vhodnih podatkov smo nato izdelali mozaik popolnega ortofota. Končno urejanje ortomozaika je potekalo enako, kot smo opisali na primeru klasičnega ortofota.

3.3 Samodejna izdelava popolnega ortofota

Samodejno izdelan popolni ortofoto smo izdelali v kompleksnem programskem orodju SURE (SURE aerial, 2020). Vhodni podatki so orientirane aerofotografije, DMP v obliki nepravilne trikotniške mreže pa se izdela samodejno v okviru postopka izdelave ortofota iz gostega oblaka točk, pridobljenega s slikovnim ujemanjem fotografij. Gostota trikotnikov je lokalno prilagojena razgibanosti terena – razgibana območja so predstavljena z manjšimi trikotniki, ravninska območja pa z večjimi trikotniki. Digitalni model površja vključuje relief in vse objekte, ki so nad reliefom (ograje, grmičevje, drevesa, zgradbe ipd.). Pri ortorektifikaciji se torej vsi objekti nad reliefom preslikajo na pravilni položaj na ortofotu. Program SURE sicer omogoča izdelavo trikotniške mreže DMP tudi iz uvoženih lidarskih podatkov, vendar tega v našem primeru nismo uporabili, saj smo želeli preizkusiti celoten proces obdelave v tem programu.

Program omogoča tudi ročno popravo morebitnih napak v DMP, saj te napake neposredno vplivajo na kakovost izdelanega ortofota. V postopku samodejne izdelave popolnega ortofota je to edini korak, ki zahteva ročno intervencijo, a s tem izboljšamo rezultate.

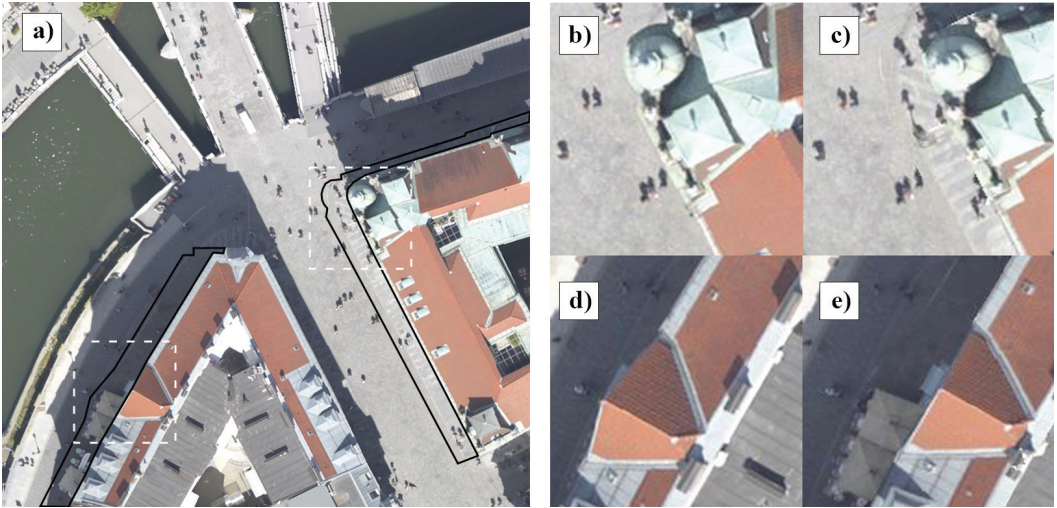
4 REZULTATI IN NJIHOVA ANALIZA

Rezultat opisanih postopkov so trije različni ortofoti za vsako od dveh območij (A in B), skupno torej šest izdelkov. Ortofote smo ovrednotili z vidika popolnosti vsebine in estetskega videza (poglavje 4.1) ter naredili analizo prednosti in slabosti popolnega ortofota v primerjavi s klasičnim ortofotom (poglavje 4.2).

4.1 Popolnost vsebine in estetski videz izdelanih ortofotov

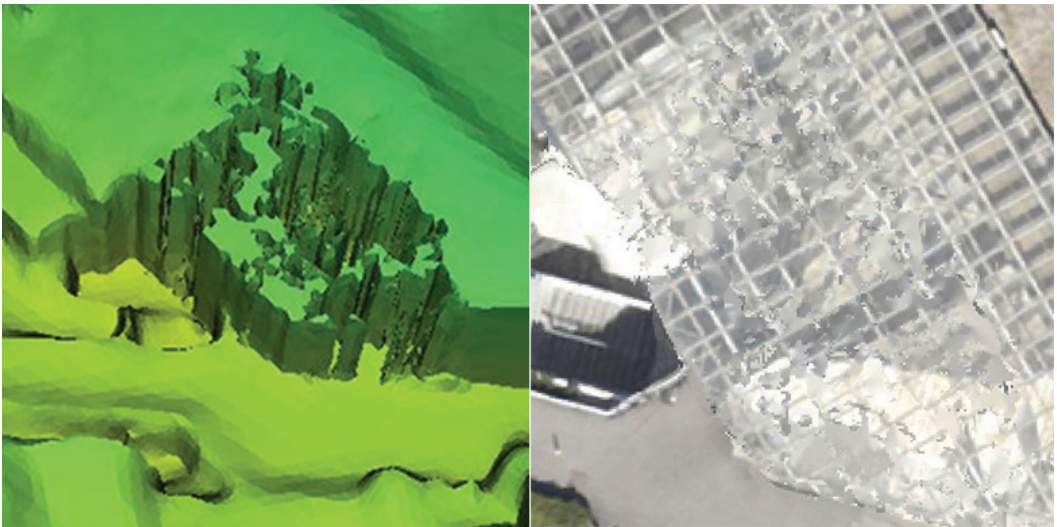
Ker so bile vse tri vrste ortofota izdelane iz istih aerofotografij, je njihova osnovna fotografska kakovost enaka. Zaradi različnih postopkov in programskih orodij pa se razlikujejo v podrobnostih oziroma v popolnosti vsebine ter estetskem videzu. Na izdelkih smo preverjali predvsem vidnost detajlov na zakritih

območjih in kakovost prikaza robov streh zgradb. Pri klasičnem ortofotu je v urbanih območjih največja pomanjkljivost v zakriti vsebini v bližini zgradb (slika 13).



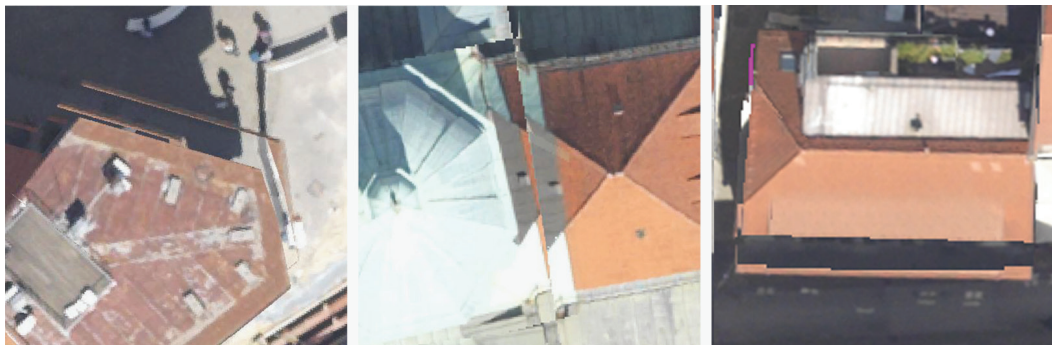
Slika 13: Slika a) večji izsek iz samodejno izdelanega popolnega ortofota na študijskem območju A; vidnost vsebin na zakritih območjih je dobra, ni pojava večkratne preslikave; b) klasični ortofoto na manjšem izseku in c) popolni ortofoto na istem izseku; d) klasični ortofoto na manjšem izseku in e) popolni ortofoto na istem izseku. Izseka sta na sliki (a) označena s črtkanima belima kvadratoma. Črna poligona na sliki a) označujeta zakrita območja na klasičnem ortofotu.

Pri samodejni izdelavi popolnega ortofota na območju, kjer so objekti s steklenimi strehami, ki deloma prepuščajo svetlobo do tal, rezultati slikovnega ujemanja niso bili dobri, zato je ortofoto na teh mestih popačen (slika 14).



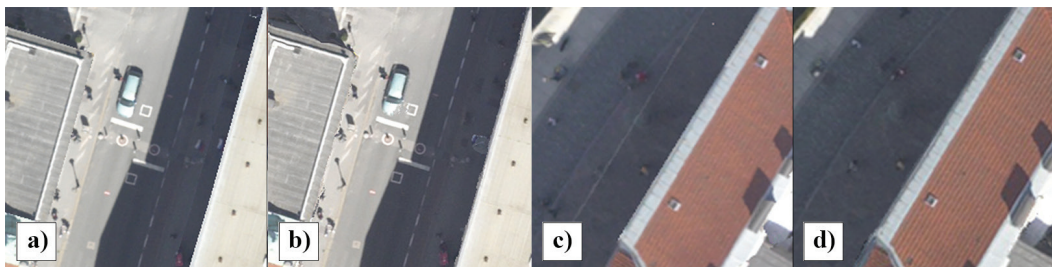
Slika 14: Samodejno izdelan DMP na območju objektov s steklenimi strehami (levo); vsebina na popolnem ortofotu je zelo popačena (desno).

Opazili smo, da se na popolnem ortofotu, izdelanem na podlagi DMR in DMZ, predvsem pri zgradbah s kompleksnimi obrisi, na zakritih območjih pojavi večkratna preslikava. Vsebina na ortofotu je tako nejasna. Izseki s primeri večkratne preslikave na popolnem ortofotu, izdelanem na podlagi DMR in DMZ, so prikazani na sliki 15. Na teh primerih lahko vidimo, kako pomembno je, da iz oblaka točk samodejno vektorizirane obrise streh zgradb še dodatno ročno popravimo.



Slika 15: Primeri večkratne preslikave na popolnem ortofotu, izdelanem na podlagi DMR in DMZ, ki so rezultat nenatančne določitve obrisa strehe zgradbe.

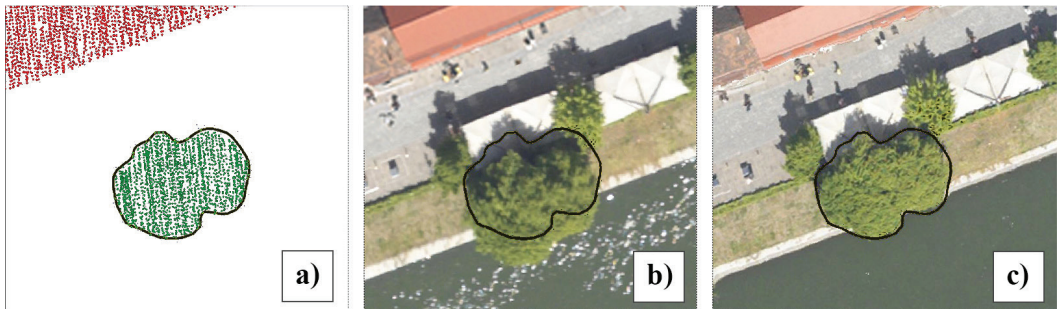
S primerjavo popolnega ortofota, izdelanega na podlagi DMR in DMZ, in samodejno izdelanega popolnega ortofota smo preverili tudi kakovost upodobitve robov streh zgradb. Na primeru dveh izsekov (slika 16) vidimo, da so robovi streh zgradb na ortofotu, ki je izdelan na podlagi DMR in DMZ, prikazani bolj ostro kot na samodejno izdelanem popolnem ortofotu, kjer so nekoliko nazobčani. Razlog je v tem, da robovi streh zgradb v samodejno izdelanem DMP niso natančno določeni. Vendar pa so razlike v estetskem videzu zelo majhne, zato tudi samodejno izdelan popolni ortofoto lahko štejemo za zelo dober izdelek. S tem smo tudi odgovorili na naše v uvodu zastavljeno raziskovalno vprašanje, ali je samodejno izdelan popolni ortofoto v primerjavi z ortofotom, izdelanim na podlagi DMR in DMZ, enako kakovosten z vidika popolnosti vsebine in estetskega videza. Ta ugotovitev je zelo pomembna za izvedbo postopka samodejne izdelave popolnega ortofota v izvedbenih projektih.



Slika 16: Primerjava kakovosti prikaza robov streh zgradb. Sliki a) in c) prikazujeta izseka iz popolnega ortofota, izdelanega na podlagi DMR in DMZ, sliki b) in d) sta ista izseka iz samodejno izdelanega popolnega ortofota.

Ne nazadnje je še ena prednost samodejne izdelave popolnega ortofota, da je na pravilnem ravninskem položaju prikazana tudi vegetacija (grmovje, drevesa), saj se kot projekcijska ploskev za preslikavo fotografij uporabi DMP. Za prikaz smo iz lidarskega oblaka točk vektorizirali obris krošnje drevesa (slika 17a)

in jo prikazali na popolnem ortofotu, izdelanem na podlagi DMR in DMZ (slika 17b), in samodejno izdelanem popolnem ortofotu (slika 17c). Kot vidimo, se pri samodejno izdelanem popolnem ortofotu obris krošnje drevesa nahaja na pravilnem ravninskem položaju, kot ga lahko ocenimo vizualno.



Slika 17: a) Vektoriziran obris krošnje drevesa iz lidarskega oblaka točk; b) popolni ortofoto, izdelan na podlagi DMR in DMZ, s prikazanim ravninskim položajem obroisa krošnje; c) samodejno izdelan ortofoto, pri katerem je obris krošnje drevesa na pravilnem ravninskem položaju, kot ga lahko ocenimo vizualno.

4.2 Analiza prednosti in slabosti popolnega ortofota v primerjavi s klasičnim ortofotom

Poleg praktičnega preizkusa dveh načinov izdelave popolnega ortofota nas je zanimal ekonomski vidik različnih postopkov. Največji zadržek naročnikov pri odločanju za popolni ortofoto je namreč njegova cena, ki je lahko precej višja od cene klasičnega ortofota. V naši raziskavi smo se osredotočili na trajanje posameznih faz v postopku izdelave ortofota, ki je eden izmed pomembnih parametrov za določitev cene izdelka. Podrobnejše cenovne analize nismo delali, ker to v širšem smislu sega v poslovno okolje izvajalca projekta (vlaganje v opremo, izobraževanje kadra ipd.).

Kot smo utemeljili že teoretično, moramo za izdelavo popolnega ortofota zagotoviti aerofotografiranje z dovolj velikim prekrivanjem fotografij v vzdolžni in prečni smeri. Strošek letenja je sorazmeren času letenja. Čas letenja se izračuna na podlagi hitrosti letenja, dolžine linij ter potrebnih obratov med linijami. Za enako veliko območje smo primerjali čas letenja za klasično aerofotografiranje in čas letenja za aerofotografiranje za namen izdelave popolnega ortofota (preglednica 1). Za isto območje se čas fotografiranja za namen izdelave popolnega ortofota poveča za količnik 1,24.

Preglednica 1: Čas letenja za klasično aerofotografiranje in aerofotografiranje za izdelavo popolnega ortofota

	Klasično aerofotografiranje	Aerofotografiranje za izdelavo popolnega ortofota
Hitrost letenja	148 km/h	148 km/h
Vzdolžni preklap	70 %	80 %
Prečni preklap	50 %	60 %
Število snemalnih linij	48	62
Čas obračanja med linijami	1 h 36 min	2 h 4 min
Skupna dolžina snem. linij	508 km	618 km
Čas snemanja	3 h 26 min	4 h 11 min
Skupni čas letenja	5 h 2 min	6 h 15 min
Količnik	1	1,24

Ocenili smo tudi trajanje posameznih korakov pri izdelavi ortofota. Predvsem nas je zanimalo, koliko ročnega dela v posameznem koraku je treba opraviti, saj porabljeni čas predstavlja strošek dela. V preglednici 2 je prikazan čas ročne obdelave za posamezne korake, ki smo ga izmerili na predstavljenem študijskem primeru (skupno za območji A in B). Izdelava popolnega ortofota, izdelanega na podlagi DMR in DMZ, v vseh korakih zahteva vsaj nekaj ročne obdelave, zato je najkompleksnejši postopek. Najzamudnejši korak je vektorizacija obrisov streh zgradb. Na območju enodružinskih hiš je ta razmeroma enostavna, pri strnjeni gradnji v starem delu mesta pa je zaradi kompleksnosti zgradb zelo zahtevna. Pri samodejni izdelavi popolnega ortofota je količina ročnega dela zelo majhna.

Časovno primerjavo med postopkom izdelave klasičnega ortofota in obema postopkoma izdelave popolnega ortofota predstavlja izračunani količnik. Popolni ortofoto, izdelan na podlagi DMR in DMZ, ima v primerjavi s klasičnim ortofotom časovni količnik 2,75, samodejno izdelan popolni ortofoto pa ima v primerjavi s klasičnim ortofotom časovni količnik 0,27. To pomeni, da za samodejno izdelavo popolnega ortofota porabimo le približno tretjino časa za ročno delo kot pri izdelavi klasičnega ortofota. Za izdelavo popolnega ortofota, izdelanega na podlagi DMR in DMZ, potrebujemo skoraj trikrat več časa za ročno delo kot pri izdelavi klasičnega ortofota. Te časovne ocene se nanašajo le na naš študijski primer, vendar so ugotovitve vseeno relevantne.

Preglednica 2: Čas ročne obdelave za posamezne korake za obe testni območji skupaj; kjer ni podatka, je izvedba samodejna.

	Klasični ortofoto	Popolni ortofoto, izdelan na podlagi DMR in DMZ	Samodejno izdelan popolni ortofoto
Priprava fotografij	30 min	30 min	30 min
Orientacija fotografij	3 h	3 h	3 h
Klasifikacija točk – DMR	30 min	30 min	–
Poprava šivnih linij	30 min	30 min	–
Radiometrična poprava	10 min	10 min	–
Vektorizacija mostov	10 min	10 min	–
Klasifikacija streh	–	1 h	–
Vektorizacija streh zgradb	–	6 h	–
Grafične izboljšave	30 min	30 min	30 min
Skupaj	1 h 50 min	8 h	30 min
Količnik	1	2,75	0,27

Če strnemo, je prednosti samodejno izdelanega ortofota precej. Njegova izdelava je visoko avtomatiziran postopek, ki za dober vsebinski in estetski rezultat potrebuje le manjši vložek ročne obdelave. Dodaten izdelek, ki ga dobimo v okviru samega procesa, je fotogrametrični oblak točk oziroma iz njega izdelan DMP v obliki nepravilne trikotniške mreže. Na samodejno izdelanem ortofotu je tako rekoč celotna vsebina vidna in prikazana na pravilnem ravninskem položaju. Seveda so v zvezi s tem izdelkom povezane tudi nekatere slabosti. Potrebujemo zmogljivo strojno in programsko opremo, zelo dobro moramo poznati vse tehnične dele postopkov, ki so precej kompleksni, tudi strojna obdelava je dolgotrajnejša kot pri izdelavi klasičnega ortofota. Potrebujemo višje prekrivanje aerofotografij, kar pomeni daljši čas aerofotografiranja in s tem višje fiksne stroške projekta. Na območjih steklenih objektov in pri zelo strnjeni gradnji so rezultati slikovnega ujemanja lahko slabši, zato moramo DMP na teh mestih popraviti ročno. Kljub vsemu, če pretehtamo vse pred-

nosti in slabosti, je s sodobnimi orodji samodejno izdelan popolni ortofoto vsebinsko in estetsko kakovosten ter konkurenčen izdelek.

5 SKLEPNE UGOTOVITVE

Čeprav popolni ortofoto ni novost, se zaradi različnih razlogov še vedno izdeluje redkeje kot klasični ortofoto. Naročniki in uporabniki verjetno ne poznajo vseh njegovih prednosti, predvsem pa je uveljavljeno prepričanje, da je izdelava popolnega ortofota precej dražja od klasičnega ortofota. V zadnjih nekaj letih so algoritmi in računalniški programi za izdelavo popolnega ortofota zelo napredovali, vendar so dobri programi razmeroma dragi, zato njihova uporaba še ni razširjena. Z raziskavo smo želeli objektivno preveriti, kako zahtevni so postopki izdelave popolnega ortofota v primerjavi s klasičnim ortofotom, kakšna je vsebinska in estetska kakovost samodejno izdelanega popolnega ortofota, in različne postopke tudi časovno ovrednotiti. V nam dostopni znanstveni literaturi namreč nismo našli ustreznih odgovorov na ta vprašanja.

Raziskavo smo izvedli na dveh študijskih območjih v mestni občini Ljubljana. Za vsako smo izdelali po tri vrste ortofota: klasični ortofoto, popolni ortofoto, izdelan na podlagi DMR in DMZ, in samodejno izdelani popolni ortofoto. Postopke obdelave in izdelke smo med seboj primerjali. Za izdelavo popolnega ortofota potrebujemo aerofotografije z večjim prekrivanjem kot za izdelavo klasičnega ortofota, kar pomeni približno 25 % več časa pri snemanju. Samodejni postopki nedvomno zahtevajo visoke procesorske zmogljivosti in daljši čas računalniške obdelave, potrebujemo tudi ustrezno programsko opremo. Po drugi strani s postopkom samodejne izdelave popolnega ortofota veliko prihranimo pri času ročne obdelave, ki pomeni konkreten strošek dela v posameznem projektu. Na samodejno izdelanem popolnem ortofotu je na pravilnem ravninskem položaju, kot ga lahko ocenimo vizualno, upodobljena tudi vsebina nad reliefom, kot na primer drevesa, ograje ipd., kar ne velja za klasični ortofoto niti za popolni ortofoto, ki je izdelan na podlagi DMR in DMZ. Z vizualno analizo izdelkov smo ugotovili, da je estetski videz samodejno izdelanega popolnega ortofota, v primerjavi s popolnim ortofotom, izdelanim na podlagi DMR in DMZ, nekoliko slabši le na robovih streh zgradb, ki so rahlo nazobčane. Če strnemo vse ugotovitve, ima samodejno izdelan popolni ortofoto tako v primerjavi s klasičnim ortofotom kot v primerjavi s popolnim ortofotom, izdelanim na podlagi DMR in DMZ, več prednosti kot slabosti.

Vsebinsko je popolni ortofoto nepogrešljiv izdelek na gosto poseljenih območjih, predvsem na območjih visokih zgradb in strnjene pozidave, kar velja za vsa večja mesta. Na njem ni zakrite vsebine v bližini zgradb, kot je to na klasičnem ortofotu, zato menimo, da bi na urbanih območjih takšen izdelek pravzaprav moral postati standarden. Popolni ortofoto se lahko v povezavi z obdelavo prostorskih podatkov v GIS-orodjih in načrtovanjem posegov v prostoru uporabi tudi za fotorealistično vizualizacijo 3D-modelov mest, kar je v nekaterih državah že precej uveljavljeno.

Zahvala

Raziskovalno delo je bilo opravljeno v okviru raziskovalnega programa P2-0406: Opazovanje Zemlje in geoinformatika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Raziskava študijskega primera je bila izvedena na aerofotografijah in lidarskih podatkih, ki jih je financirala Mestna občina Ljubljana, snemanje je izvedlo podjetje Flycom Technologies d.o.o. Mestni občini Ljubljana se zahvaljujemo za dovoljenje za uporabo teh podatkov. Zahvaljujemo se tudi podjetju Flycom Technologies d.o.o., ki je s tehnološko opremo omogočilo izvedbo študije.

Literatura in viri:

- Amhar, F., Jansa, J., Ries, C. (1998). The Generation of True Orthophotos Using a 3D Building Model in Conjunction with Conventional DTM. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (4), 16–22. DOI: 10.1.1.462.6150
- Andresen, H. (2004). Efficient and Well-documented Digital Orthophoto Production from Airborne Photogrammetry. V *3rd FIG Regional Conference*, 3.–7. oktober 2004, Džakarta, Indonezija. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/jakarta/papers/ts_22/ts_22_7_andresen.pdf, pridobljeno: 2. 11. 2020.
- Baltrusch, S. (2017). TrueDOP – A new quality step for official orthophotos. V *European Spatial Data Research, Official Publication* (str. 11–27). Leuven, EuroSDR.
- Biasion, A., Dequal, S., Lingua, A. (2004). A new procedure for the automatic production of true orthophotos. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. https://www.researchgate.net/publication/228555318_A_new_procedure_for_the_automatic_production_of_true_orthophotos, pridobljeno 30. 10. 2020.
- Disa, M. N., Maarof, I., Latif, Z. A., Samad, A. M. (2011). LiDAR: A review on generating digital true orthophoto. V *IEEE, 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*. 4.–6. marec 2011, Penang, Malezija. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSPA.2011.5759899>
- Geodetska uprava Republike Slovenije, portal Ortofoto. <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/topografski-in-kartografski-podatki/ortofoto/>, pridobljeno: 2. 11. 2020.
- Gharibi, H., Habib, A. (2018). True Orthophoto Generation from Aerial Frame Images and LiDAR Data: An Update. *Remote Sensing*, 10 (581), 1–28. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040581>
- Habib, A., Kim, C. (2006). LIDAR-Aided True Orthophoto and DBM Generation System. V A. Abdul-Rahman (ur.), S. Zlatanova (ur.), V. Coors (ur.). *Innovations in 3D Information Systems* (str. 47–66). Berlin Heidelberg: Springer.
- Haggag, M., Zahran, M., Salah, M. (2018). Towards Automated Generation of True Orthoimages for Urban Areas. *American Journal of Geographic Information System*, 7 (2), 67–74. DOI: 10.5923/j.ajgis.20180702.03
- Kosmatin Fras, M. (2004). Vpliv kakovosti vhodnih podatkov na kakovost ortofota. *Geodetski vestnik*, 48 (2), 167–178. http://www.geodetski-vestnik.com/48/2/gv48-2_168-178.pdf, pridobljeno 2. 11. 2020.
- Kosmatin Fras, M., Fabiani, N., Triglav Čekada, M. (2014). Kakovost državnega ortofota v različnih letnikih njegove izdelave. *Geodetski vestnik*, 58 (4), 695–709. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2014.04.695-709>
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*. 2nd Edition. Berlin/New York; Walter de Gruyter.
- Li, T., Jiang, C., Bian, Z., Wang, M., Niu, X. (2020). A Review of True Orthophoto Rectification Algorithms. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/780/2/022035>
- Marsetič, A., Oštir, K., Kosmatin Fras, M. (2015). Automatic orthorectification of high-resolution optical satellite images using vector roads. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 53 (11), 6035–6047. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2431434>
- Marsetič, A., Pehani, P. (2019). Towards sub-pixel automatic geometric corrections of very-high resolution panchromatic satellite data of urban areas. *Remote sensing*, 11 (9), 1–21. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11091097>
- Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6 (1), 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Nielsen, M. O. (2004). True orthophoto generation. Master Thesis. Lyngby: Technical University of Denmark, Informatics and Mathematical Modelling. http://www.close-range.com/docs/True_Orthophoto_Generation.pdf, pridobljeno 2. 11. 2020.
- Schickler, W., Thorpe, A. (1998). Operational Procedure for Automatic True Orthophoto Generation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (4), 527–532. <https://www.isprs.org/proceedings/XXXII/part4/schickler58.pdf>, pridobljeno 2. 11. 2020.
- SURE aerial, nFrames. <https://www.nframes.com/products/sure-aerial/>, pridobljeno 20. 4. 2020.
- Šašič Kežul, A. (2020). Primerjava klasičnega in popolnega ortofota z vidika kakovosti in ekonomičnosti izdelave [Quality and cost-efficiency assessment of classical and true orthophoto]. Magistrsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. <https://repozitorij.uni-lj.si>, pridobljeno 30. 10. 2020.
- Triglav Čekada, M. (2016). Navidezna zvrženost objektov na državnem ortofotu ali kaj moramo vedeti, ko uporabljamo državni ortofoto?. *Geografski vestnik*, 88 (1), 121–135. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV88107>



Kosmatin Fras M., Šušteršič K., Šašič Kežul A. (2021). Popolni ortofoto v urbanih okoljih. Geodetski vestnik, 65 (1), 27-45. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.01.27-45>

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: mojca.kosmatin-fras@fgg.uni-lj.si

Aleksandar Šašič Kežul, mag. inž. geod. geoinf.
Flycom Technologies d.o.o.
Ljubljanska cesta 24a, SI-4000 Kranj, Slovenija
e-naslov: sandi.sasic@flycom.si

Katja Šušteršič, univ. dipl. inž. geod.
Flycom Technologies d.o.o.
Ljubljanska cesta 24a, SI-4000 Kranj, Slovenija
e-naslov: katja.sustersic@flycom.si