

UDK 528.8:528.74:528.93:911.375(497.521.2)
Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

Analiza prostorne točnosti zračnih i satelitskih snimaka grada Zagreba

Mateo GAŠPAROVIĆ, Dino DOBRINIĆ,
Damir MEDAK – Zagreb¹

SAŽETAK. Svrha je ovog istraživanja analiza prostorne točnosti zračnih i satelitskih snimaka. U današnje vrijeme na raspolaganju su mnogobrojne satelitske i zračne snimke putem javno dostupnih i besplatnih servisa i izvora. U ovom radu analizirana je prostorna točnost WorldView-2 (WV2) Ortho Ready Standard snimaka (ORS2A), ortorektificiranih WV2 snimaka pomoću SRTM (engl. Shuttle Radar Topography Mission) digitalnog modela reljefa (DMR), snimaka dostupnih s Google Earth servisa i točnost digitalnih ortofoto karata (DOF), za 2011. i 2012. godinu. Područje istraživanja ovog rada središnji je dio grada Zagreba s dijelom Medvednice na sjeveru te rijeka Sava i nizinski dio na jugu, u veličini od 131 km². WV2 snimke pribavljene su u sklopu projekta GEMINI (Geoprostorno praćenje zelene infrastrukture na temelju terestričkih, zračnih i satelitskih snimaka). Rezultati istraživanja pokazuju kako su ORS2A snimke najlošije točnosti, dok su zračne snimke (DOF) najbolje točnosti. Točnost ortorektificiranih WV2 snimaka pomoću SRTM DMR-a u prosjeku je veća za oko 4,5 puta u odnosu na ORS2A snimke, dok je preciznost ortorektificiranih snimaka u prosjeku veća za oko 13 puta u odnosu na ORS2A snimke. Točnost ortorektificiranih i Google Earth snimaka je podjednaka, dok je preciznost ortorektificiranih snimaka veća za 35% u odnosu na Google Earth snimke. Cjelokupna istraživanja u ovom radu provedena su primjenom programa otvorenoga koda u kombinaciji s besplatno dostupnim i javnim podacima. Na taj se način budućim istraživačima olakšava mogućnost ponovne provedbe postupka analize prostorne točnosti za druga područja u Republici Hrvatskoj i svijetu.

Ključne riječi: daljinska istraživanja, WorldView-2, DOF, ortorektifikacija satelitskih snimaka, SRTM, prostorna točnost, Google Earth.

¹ dr. sc. Mateo Gašparović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mgasparovic@geof.hr,

Dino Dobrinic, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: ddobrinic@geof.hr,

prof. dr. sc. Damir Medak, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: dmedak@geof.hr.

1. Uvod

Danas se za potrebe daljinskih istraživanja najčešće upotrebljavaju snimke srednje i visoke rezolucije dobivene sa satelita kao što su MODIS, Landsat, SPOT5, QuickBird, Sentinel, IKONOS, GeoEye, WorldView-1, WorldView-2. Tako prikupljene satelitske snimke imaju različitu prostornu, spektralnu, vremensku te radiometrijsku rezoluciju. Za područje Republike Hrvatske korisnik putem WMS-a (engl. Web Map Services) može javno pristupiti službenim digitalnim ortofoto kartama (DOF) Državne geodetske uprave (DGU) koje su izrađene temeljem cikličkog aerofotogrametrijskog snimanja. Satelitskim je snimkama moguće slobodno pristupiti putem globalnih servisa kao što su Google Earth, Google Maps, Microsoft Bing Maps, Apple Maps. Podaci prikupljeni pomoću prethodno navedenih izvora upotrebljavaju se za izradu karata, geografskih informacijskih sustava (GIS), klasifikaciju Zemljina pokrova te u navigaciji, poljoprivredi i upravljanju kriznim situacijama.

Iako se satelitskim i zračnim metodama može prikupiti velik broj podataka u kratkom vremenu, za razliku od terestričkih metoda, vrlo je važno odrediti točnost navedenih podataka. To je iznimno važno ako se satelitske ili zračne snimke planiraju upotrebljavati u području geodezije i geoinformatike. Svrha je ovog istraživanja analiza prostorne točnosti WorldView-2 (WV2) izvornih satelitskih snimaka, ortorektificiranih WV2 snimaka pomoću SRTM (engl. Shuttle Radar Topography Mission) digitalnog modela reljefa (DMR) te analiza točnosti DOF-a i snimaka dostupnih s Google Earth servisa. Mohammed i dr. (2013) bavili su se istraživanjem prostorne točnosti snimaka (GE) preuzetih s Google Earth servisa na području Sudana i temeljem 16 kontrolnih točaka dobili srednje kvadratno odstupanje (RMSE) od 1,80 m. Belfiore i Parente (2015) istraživali su točnost izvorne WV2 snimke na području regije Caserta u Italiji i temeljem 20 kontrolnih točaka dobili su RMSE od 15,53 m. S obzirom na to da je navedena točnost izvornih WV2 snimaka nedostatna za mnoge primjene u geodeziji, nužno je provesti proces ortorektifikacije snimaka. Procesom ortorektifikacije izvorna se snimka iz centralne projekcije transformira u ortogonalnu projekciju (URL 1). Na taj se način smanjuje topografski utjecaj terena te se osigurava bolja geometrijska povezanost između točaka na terenu i njihova položaja na pripadajućoj snimci (Campbell i Wynne 2011). Belfiore i Parente (2016) usporedili su različite algoritme za ortorektifikaciju WV2 snimaka. Mnogi autori ističu kako je proces ortorektifikacije jedan od najvažnijih koraka poboljšanja satelitskih snimaka (Tong i dr. 2010, Aguilar i dr. 2013). Za provedbu procesa ortorektifikacije potreban je DMR. Nikolakopoulos i dr. (2007), Widyaningrum i dr. (2016) u svojim su se istraživanjima za ortorektifikaciju koristili besplatno dostupnim globalnim DMR-om.

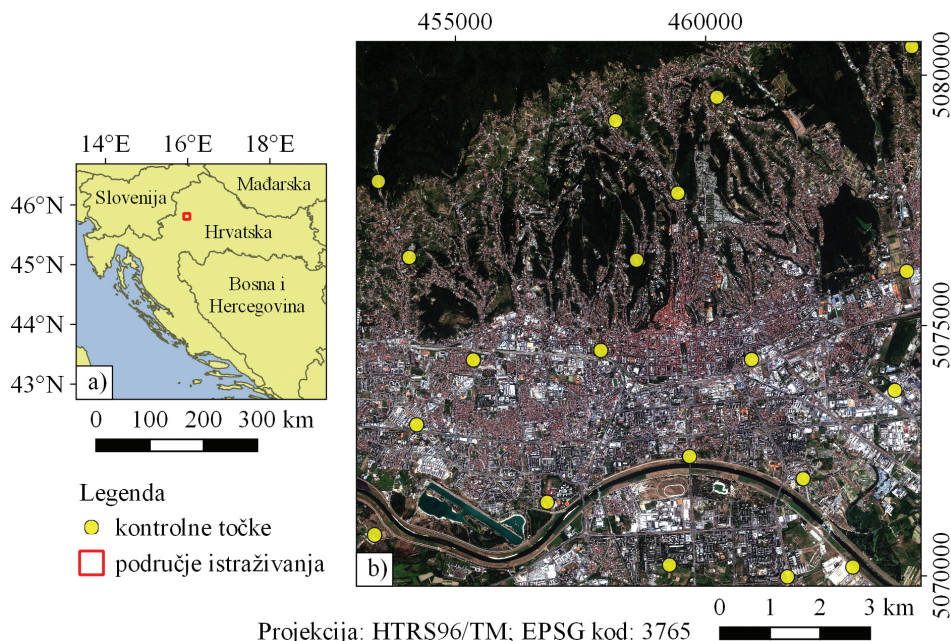
Snimke WV2 pribavljene su u sklopu GEMINI projekta (engl. Geospatial Monitoring of Green Infrastructure by Means of Terrestrial, Airborne and Satellite Imagery). Taj projekt vezan je uz praćenje zelene infrastrukture u gradu Zagrebu temeljem satelitskih, zračnih i terestričkih snimaka. Cilj je projekta stvoriti jedinstvenu prostorno-vremensku bazu podataka o zelenim površinama na području grada Zagreba za potrebe istraživanja i praćenja zelene infrastrukture (Gašparović i dr. 2017). S obzirom na to da se za projekt GEMINI upotrebljavaju satelitske i zračne snimke različitih izvornika te različite prostorne rezolucije, izrazito je važno odrediti, analizirati te ako je moguće povećati njihovu prostornu točnost.

Glavni je cilj ovog rada analiza prostorne točnosti satelitskih i zračnih snimaka, pritom su se zračne snimke i dodatni podaci prikupili putem javno dostupnih i

besplatnih izvora i servisa. Za proces ortorektifikacije korišten je besplatno dostupni globalni SRTM DMR. Cjelokupna istraživanja u ovom radu provedena su primjenom programa otvorenoga koda u kombinaciji s besplatno dostupnim i javnim podacima kako bi olakšali budućim istraživačima mogućnost ponovne provedbe postupka analize prostorne točnosti za druga područja u Republici Hrvatskoj i svijetu.

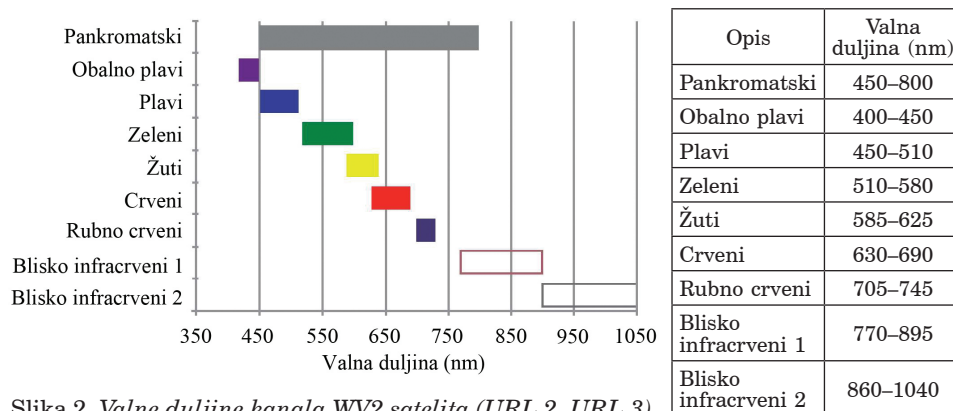
2. Područje istraživanja i korišteni podaci

U ovom radu istražuje se analiza prostorne točnosti zračnih i satelitskih snimaka na području grada Zagreba. Zagreb se nalazi u kontinentalnoj središnjoj Hrvatskoj, sa sjeverne strane okružen gorom Medvednicom, a prema ostalim stranama svijeta smješten je na ravninskom području i uz obale rijeke Save. Prosječna nadmorska visina grada iznosi 122 m. Grad Zagreb ima prema posljednjem popisu stanovništva iz 2011. godine 790 017 stanovnika i prostire se na površini od 641 km². Za potrebe projekta GEMINI odabrano je središnje područje grada u veličini od oko 131 km² (11,6 km x 11,3 km), koje je obuhvatilo dio Medvednice na sjeveru, rijeku Savu te nizinski dio na jugu (slika 1). U sklopu navedenog projekta prikupljene su WV2 satelitske snimke. Glavni je cilj projekta GEMINI ispitivanje i uspostava višedimenzionalnog sustava praćenja urbane zelene infrastrukture, koji integrira najnovije mogućnosti dobivanja statičkih i dinamičkih multispektralnih informacija.



Slika 1. a) Lokacija područja istraživanja, b) područje istraživanja.

DigitalGlobe je lansirao WV2 satelit u listopadu 2009. godine; bio je to prvi komercijalni satelit koji prikuplja podatke s visokom prostornom rezolucijom u 8 spektralnih kanala (slika 2). Na WV2 satelitu nalaze se 2 senzora: jedan za prikupljanje pankromatskih snimaka s prostornom rezolucijom od 0,46 m u nadiru, a drugi za prikupljanje multispektralnih snimaka s prostornom rezolucijom od 1,84 m u nadiru (Belfiore i Parente 2015). Za komercijalnu upotrebu, prethodno navedenim snimkama smanjena je prostorna rezolucija na 0,50 m za pankromatski, odnosno 2,00 m za multispektralne kanale. Treba naglasiti kako se procesom fuzije prostorna rezolucija multispektralnih kanala može poboljšati i svesti na prostornu rezoluciju pankromatskoga kanala (Gašparović i Jogun 2018). WV2 satelit giba se oko Zemlje na visini od 770 km s kutom inklinacije od $97,2^\circ$ i vremenskom rezolucijom od 1,1 dana. WV2 satelit ima mogućnost prikupljanja podataka za površinu od oko 1 milijun km^2 dnevno. Radiometrijska rezolucija za pankromatske i multispektralne snimke je 11 bita (URL 2). Visoka prostorna rezolucija WV2 snimaka omogućuje detektiranje mnogih detalja, kao što su vozila, stabla, pokrovi zemljišta. U specifikaciji proizvođača točnost je izražena pomoću srednjega kvadratnog odstupanja i iznosi 2,3 m za izvorne snimke sa satelita bez dodatne obrade. Slijedom navedenoga, iznimno je važno odrediti položajnu točnost satelitskih snimaka. WV2 uključuje 4 prethodno nova kanala, koji omogućuju široku primjenu u klasifikaciji zemljišnog pokrova, i to: obalno plavi (engl. coastal blue), žuti (engl. yellow), rubno crveni (engl. red edge) i blisko infracrveni 2 (engl. near-infrared 2) (slika 2).



Slika 2. Valne duljine kanala WV2 satelita (URL 2, URL 3).

WV2 snimke dostupne su u više razina obrade: Basic (1B), Standard (2A) i Ortho-Ready Standard (ORS2A). U ovom radu analizirana je točnost pankromatskoga kanala ORS2A snimaka za 2011. i 2012. godinu. ORS2A snimke nisu korigirane za utjecaj reljefa, što ih čini pogodnima za ortorektifikaciju. ORS2A snimka nastaje projiciranjem izvorne 1B snimke na horizontalnu plohu položenu kroz prosječnu visinu terena traženog područja, izračunatu iz DMR-a te georeferenciranu u WGS 84 UTM 33N koordinatnom sustavu.

U ovom radu usporedit će se točnost DOF-a u mjerilu 1:5000 iz 2011. godine koji je izrađen za područje cijele Republike Hrvatske i točnost DOF-a u mjerilu 1:5000 iz 2012. godine koji je izrađen za administrativno područje grada Zagreba.

DOF iz 2011. godine nastao je temeljem cikličnog aerofotogrametrijskog snimanja Republike Hrvatske iz izvornih zračnih snimaka prostorne rezolucije $\leq 0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$ (DGU, Specifikacije 301D150). DOF je izrađen prevođenjem aerofotogrametrijske snimke temeljem poznatih elemenata unutarnje i vanjske orijentacije iz centralne u ortogonalnu projekciju uz upotrebu DMR-a odgovarajuće točnosti (URL 4).

Google Earth je besplatno i javno dostupan globalni servis koji omogućuje prikaz satelitskih snimaka srednje i visoke rezolucije dobivenih od različitih proizvođača. Vrsta satelitske snimke koja se prikazuje ovisi o razini prikaza određenog područja, pa se za kontinentalna područja prikazuju SPOT5 i Landsat snimke, dok se za urbanizirana područja na višim razinama prikaza prikazuju IKONOS, QuickBird, GeoEye-1, WV1, WV2 i zračne ortofoto snimke (Pulighe i dr. 2016). Google Earth prikazuje snimke u geografskom koordinatnom sustavu na World Geodetic System 1984 (WGS 84) referentnom elipsoidu. Unatoč mnogobrojnim prednostima koje pruža Google Earth, položajna točnost dostupnih snimaka do sada nije službeno objavljena (Goudarzi i Landry 2017). Od Google Earth verzije 5 pa nadalje, omogućeno je pretraživanje arhivskih snimaka, što omogućuje detekciju i određivanje prostorno-vremenskih promjena u okolišu. U ovom radu korištene su WV2 snimke koje su pribavljene u sklopu GEMINI projekta za datume 3. kolovoza 2011. i 29. kolovoza 2012. godine. U arhivi Google Eartha također se nalaze snimke koje su opažane WV2 satelitom, tako da je za 2011. godinu bila dostupna snimka za isti datum kao i izvorna WV2 snimka, dok je za 2012. godinu na raspolaganju bila snimka od 9. rujna 2012. godine.

Za provedbu procesa procjene točnosti satelitskih snimaka te proces ortorektifikacije korištene su kontrolne točke, odnosno besplatno dostupni globalni DMR. Za analizu prostorne točnosti zračnih i satelitskih snimaka snimljeno je 20 kontrolnih točaka na području grada Zagreba. Uvjet odabira točaka je vidljivost točaka na svim snimkama i izvorima u 2011. i 2012. godini. Kontrolne točke nasumice su raspoređene i jednolično prekrivaju cijelo područje istraživanja. Terenska mjerenja izvedena su pomoću GNSS (globalni navigacijski satelitski sustav) Topcon HiPer SR prijamnika i korištenjem CROPOS (engl. Croatian Positioning System) visokopreciznog servisa pozicioniranja (VPPS), koji omogućuje određivanje položaja u realnom vremenu s horizontalnom točnošću od 2 cm te vertikalnom od 4 cm na čitavom području Republike Hrvatske (URL 5). Ukupno je snimljeno 20 točaka u 3 sesije po 11 sekundi. Navedene točke snimane su u službenom geodetskom datumu Hrvatskom terestričkom referentnom sustavu 1996 (HTRS96) i prikazane u službenoj poprečnoj Mercatorovoj projekciji (HTRS96/TM).

Za potrebe istraživanja zračne snimke i dodatni podaci pribavljeni su javno dostupnim i besplatnim izvorima i servisima. Za ortorektifikaciju korišten je besplatno dostupan globalni SRTM DMR. SRTM DMR zajednički je projekt U.S. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) i U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Podaci SRTM misije prikupljeni su metodom radarske interferometrije te su od 2014. godine dostupni podaci s prostornom rezolucijom od 1 lučne sekunde ($\sim 30 \text{ m}$).

U sljedećem poglavlju opisane su metode korištene u ovom radu s posebnim naglaskom na proces ortorektificiranja te procjene točnosti satelitskih i zračnih snimaka.

3. Metode

U prethodnom poglavlju spomenute su WV2 ORS2A satelitske snimke koje nisu korigirane za utjecaj reljefa. Navedena činjenica omogućuje korisniku da provede proces ortorektifikacije. Ortorektifikacija je proces transformacije snimke iz centralne u ortogonalnu projekciju s jedinstvenim mjerilom, pri čemu se smanjuju unutarnji i vanjski deformacijski utjecaji snimke (Junfeng i Jingfeng 2006).

Unutarnji deformacijski utjecaji snimke uzrokovani su elementima unutarnje i vanjske orijentacije senzora, tj. parametrima kamere te položajem i orijentacijom kamere u trenutku snimanja. Vanjski deformacijski utjecaji vezani su uz konfiguraciju reljefa, atmosfersku refrakciju te zakrivljenost Zemlje. Proces ortorektifikacije može se provoditi rigoroznom (Toutin 2004, Crespi i dr. 2012) i empirijskom metodom (Tao i Hu 2002, Fraser i dr. 2006, Oh i Lee 2015). Rigorozna metoda temelji se na fotogrametrijskom pristupu, u kojem su slikovne koordinate na senzoru i referentne koordinate na terenu međusobno povezane pomoću jednadžbi kolinearnosti (Capaldo i dr. 2012). Nasuprot tome, u empirijskoj metodi generalizirani modeli baziraju se na racionalnim polinomnim funkcijama, koje povezuju slikovne i terenske koordinate pomoću racionalnih polinomnih koeficijenata (engl. rational polynomial coefficients – RPC) (Capaldo i dr. 2012). Empirijskom metodom autori se više koriste zbog jednostavnosti i brzine procesa te za razliku od rigorozne metode, nije potrebno poznavati orbitalne parametre (Maglione 2016, Belfiore i Parente 2016). U ovom radu ispitana je točnost procesa ortorektifikacije po empirijskoj metodi. Za uspješno provođenje ortorektifikacije empirijskom metodom potrebni su DMR i RPC. RPC je generička forma modela senzora i sastoji se od dviju jednadžbi koje povezuju snimku odnosno svaki piksel snimke s koordinatom u referentnom koordinatnom sustavu. Izrazom (1) definirana je koordinata x osi (redak), a izrazom (2) koordinata y osi (stupac) slikovnoga koordinatnog sustava, pri čemu je ishodište koordinatnog sustava u gornjem lijevom kutu snimke:

$$x = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} \quad (1)$$

$$y = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} \quad (2)$$

$$P_i = c_{1i} + c_{2i}X + c_{3i}Y + c_{4i}Z + \dots + c_{17i}YZ^2 + c_{18i}X^2Z + c_{19i}Y^2Z + c_{20i}Z^3. \quad (3)$$

U izrazima (1), (2) i (3) X , Y i Z označavaju koordinate u referentnom koordinatnom sustavu, P_i ($i=1-4$) je polinomna funkcija trećeg reda, a c_{ii} su RPC. Proizvođači satelitskih snimaka računaju navedene koeficijente (RPC) i dostavljaju u metapodacima snimke (Maglione i dr. 2013). Ortorektifikacija za potrebe ovog istraživanja provedena je pomoću programa otvorenoga koda Orfeo ToolBox (OTB) verzije 6.0.0 (Grizonnet i dr. 2017). Algoritam za ortorektifikaciju nalazi se u OTB-u unutar modula Monteverdi. Snimke su ortorektificirane temeljem SRTM DMR-a i prije spomenutog RPC-a koji je dostavljen uz snimke. Radi točnijeg finalnog rezultata, tj. ortorektificirane satelitske snimke, u procesu ortorektifikacije korišten je i globalni model geoida 1996 (EGM96).

Za provedbu analize točnosti koordinate zračnih (DOF) i satelitskih snimaka (WV2 i GE) očitane su u programu otvorenoga koda Quantum GIS (QGIS) verzije 2.18.14 (URL 6). Koordinate su očitane u službenoj kartografskoj projekciji za Republiku Hrvatsku, HTRS96/TM. Koordinate s GE snimaka očitane su pomoću programa Google Earth pro u WGS84 datumu. Za transformaciju GE snimaka WGS84 koordinata u HTRS96/TM projekciju korišten je program T7D (Premužić i Šljivarić 2010). Za analizu prostorne točnosti satelitskih i zračnih snimaka računati su sljedeći elementi deskriptivne statistike: srednje odstupanje (ME), standardno odstupanje (SD), srednje kvadratno odstupanje ($RMSE$) te su prikazane minimalne (Min) i maksimalne (Max) vrijednosti odstupanja. Navedeni statistički pokazatelji računati su temeljem 20 kontrolnih točaka mjerenih na terenu. Analiza točnosti koordinata očitanih na satelitskim i zračnim snimkama izrađena je korištenjem programskog jezika R, verzija 3.4.1 (R Core Team 2017), u programu otvorenoga koda *Rstudio*, verzija 1.0.153:

$$\Delta_i = \sqrt{\left(E_{\text{GNSS},i} - E_{\text{snimka},i}\right)^2 + \left(N_{\text{GNSS},i} - N_{\text{snimka},i}\right)^2} \quad (4)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} \quad (5)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - ME)^2}{n - 1}} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2}{n}} \quad (7)$$

U izrazima (4), (5), (6) i (7) Δ je razlika između koordinata točke i snimljenih na terenu pomoću GNSS prijamnika te očitanih sa satelitskih ili zračnih snimaka, a n je ukupan broj točaka.

4. Rezultati

U ovom poglavlju dani su rezultati i analize prostorne točnosti satelitskih i zračnih snimaka. Analiza točnosti zračnih snimaka provedena je temeljem DOF-a dostupnog preko WMS-a. Točnost satelitskih snimaka testirana je na tri različita izvora: originalne WV2 snimke (ORS2A), ortorektificirane WV2 satelitske snimke temeljem SRTM DMR-a (SRTM) po metodi prikazanoj u ovom radu i satelitskim snimkama WV2 dostupnim kroz Google Earth sustav. Radi neovisnosti rezultata istraživanja, provedena je analiza snimaka za dvije godine (2011. i 2012.).

Analiza prostorne točnosti snimaka dana je temeljem 20 kontrolnih točaka snimljenih na terenu. Statistički pokazatelji prostorne točnosti u istraživanju su

sljedeći: *RMSE*, *SD*, *ME*, *Min* i *Max* i definirani su izrazima (5), (6) i (7). U tablicama 1 i 2 prikazani su rezultati procjene prostorne točnosti svih prethodno navedenih snimaka za 2011. i 2012. godinu.

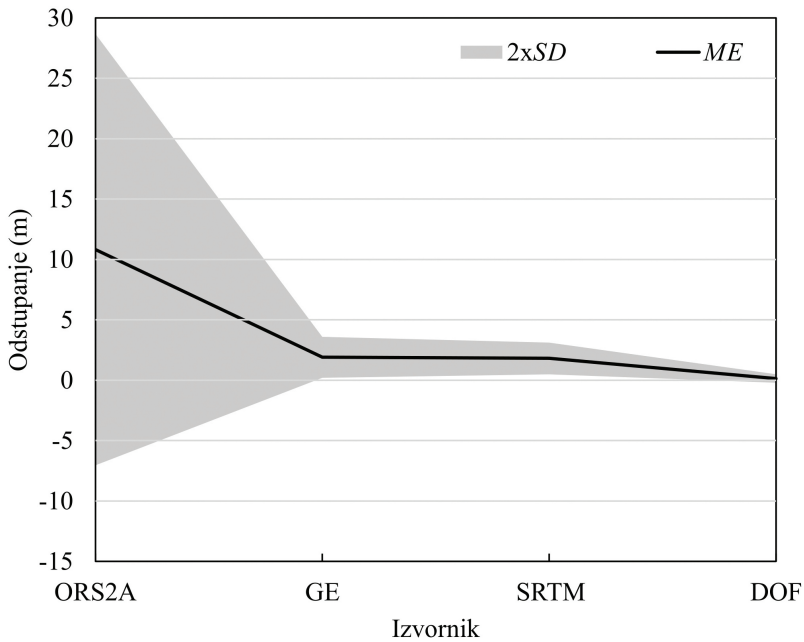
Tablica 1. *Statistički pokazatelji prostorne točnosti zračnih i satelitskih snimaka za 2011. godinu.*

| Izvornik | ORS2A | GE | SRTM | DOF |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|
| <i>ME</i> (m) | 10,82 | 1,90 | 1,80 | 0,13 |
| <i>SD</i> (m) | 17,85 | 1,69 | 1,32 | 0,35 |
| <i>Min</i> (m) | -38,89 | -4,50 | -4,01 | -0,60 |
| <i>Max</i> (m) | 26,32 | 4,40 | 2,55 | 0,66 |
| <i>RMSE</i> (m) | 20,49 | 2,51 | 2,22 | 0,37 |

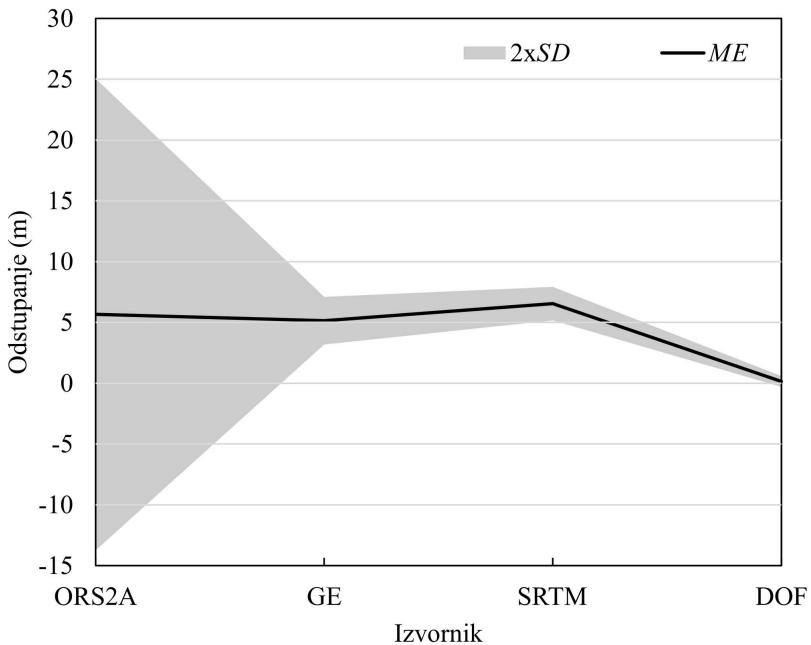
Tablica 2. *Statistički pokazatelji prostorne točnosti zračnih i satelitskih snimaka za 2012. godinu.*

| Izvornik | ORS2A | GE | SRTM | DOF |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|
| <i>ME</i> (m) | 5,66 | 5,15 | 6,54 | 0,14 |
| <i>SD</i> (m) | 19,40 | 1,96 | 1,38 | 0,45 |
| <i>Min</i> (m) | -20,17 | -1,74 | -5,72 | -0,91 |
| <i>Max</i> (m) | 51,91 | 8,23 | 7,48 | 0,92 |
| <i>RMSE</i> (m) | 19,73 | 5,49 | 6,68 | 0,46 |

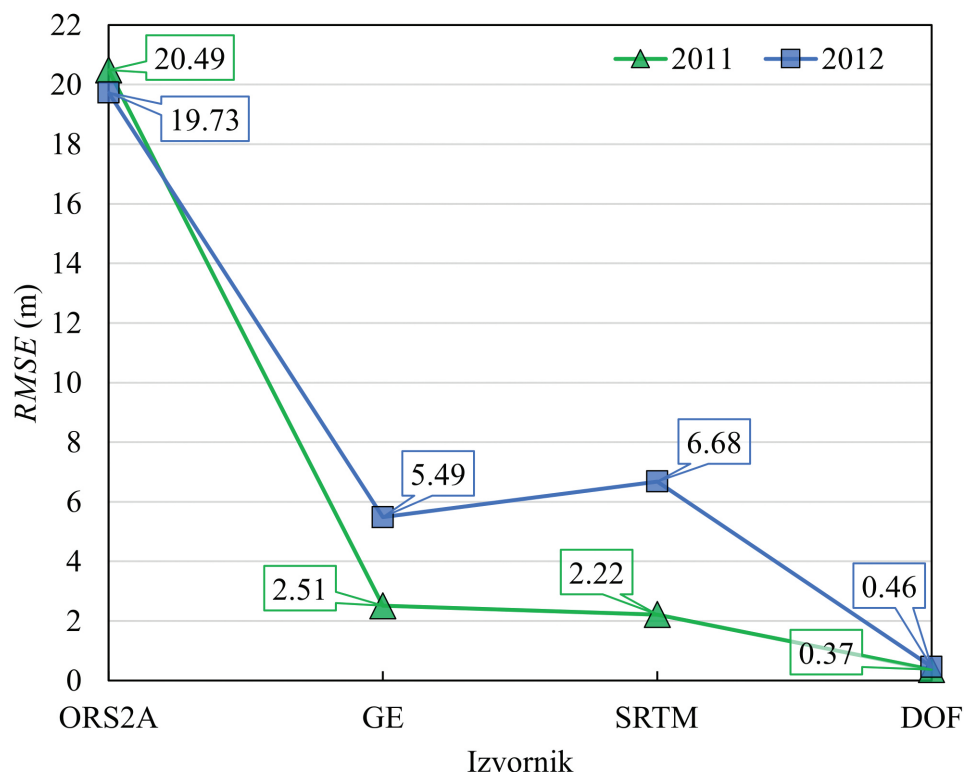
Iz tablica 1 i 2 jasno se vidi kako su izvorne satelitske snimke (ORS2A) najlošije točnosti za obje godine istraživanja, tj. za 2011. godinu $RMSE = 20,49$ m i $SD = 17,85$ m te za 2012. godinu $RMSE = 19,73$ m i $SD = 19,40$ m. S druge strane zračne su se snimke (DOF) za obje godine pokazale najtočnijima te je za 2011. godinu $RMSE = 0,37$ m i $SD = 0,35$ m, dok je za 2012. godinu $RMSE = 0,46$ m i $SD = 0,45$ m. Ako se analiziraju postignute točnosti SRTM i GE snimaka jasno se uočava kako su postignute točnosti podjednake. $RMSE$ za SRTM snimke za 2011. iznosi 2,22 m, a za 2012. 6,68 m, dok $RMSE$ za GE snimke za 2011. iznosi 2,51 m, a za 2012. 5,49 m. Vrijednost SD pokazuje veću preciznost SRTM-a (za 2011. $SD = 1,32$ m, za 2012. $SD = 1,38$ m) u odnosu na GE snimke (za 2011. $SD = 1,69$ m, za 2012. $SD = 1,96$ m). Razlika $RMSE$ i SD vrijednosti za SRTM i GE snimke pokazuje postojanje sustavnog utjecaja, što potvrđuje i povećana vrijednost ME (tablice 1 i 2). Možemo pretpostaviti kako bi se uvođenjem dodatne geometrijske korekcije na SRTM ili GE snimkama mogla u velikoj mjeri povećati točnost odnosno $RMSE$ vrijednost. Radi jasnijeg prikaza povećanja točnosti i preciznosti satelitskih snimaka izrađeni su grafički prikazi statističkih pokazatelja za 2011. godinu (slika 3) i za 2012. godinu (slika 4).



Slika 3. Grafički prikaz statističkih pokazatelja (ME i $2xSD$) satelitskih i zračnih snimaka za 2011. godinu.



Slika 4. Grafički prikaz statističkih pokazatelja (ME i $2xSD$) satelitskih i zračnih snimaka za 2012. godinu.



Slika 5. Grafički prikaz statističkih pokazatelja (RMSE) satelitskih i zračnih snimaka za 2011. i 2012. godinu.

Na svim grafičkim prikazima (slike 3, 4 i 5) jasno se vidi povećanje točnosti ortorektificiranih (SRTM) snimaka u odnosu na izvorne (ORS2A) snimke. Točnost SRTM snimaka u prosjeku se povećala oko 4,5 puta u odnosu na ORS2A snimke (slika 5, tablice 1 i 2). Promatramo li vrijednost *SD*, možemo zaključiti kako se preciznost SRTM snimaka povećala više od 13 puta u odnosu na ORS2A snimke (slike 3 i 4, tablice 1 i 2). Usporedbom DOF-a i SRTM snimaka može se zaključiti kako su zračne snimke testirane u ovom radu (DOF) u prosjeku preciznije više od 3 puta u odnosu na ortorektificirane WV2 satelitske snimke (SRTM).

5. Zaključak

U ovom istraživanju analizirana je prostorna točnost zračnih i satelitskih snimaka. Za analizu zračnih snimaka korišten je DOF dostupan putem WMS-a za 2011. i 2012. godinu. Od satelitskih snimaka korištene su besplatno dostupne GE snimke, izvorne WV2 satelitske snimke (ORS2A) te ortorektificirane WV2 satelitske snimke (SRTM). Metoda ortorektifikacije WV2 satelitskih snimaka detaljno je prikazana u radu i temelji se na programu otvorenoga koda (OTB) i besplatno dostupnom SRTM DMR-u.

Iz prethodno prikazanih rezultata te pokazatelja prostorne točnosti jasno se uočava kako su izvorne ORS2A satelitske snimke najmanje točnosti. S druge strane, zračne snimke (DOF) imaju najveću točnost za sve godine istraživanja, što je očekivano s obzirom na to da je DOF nastao procesom ortorektifikacije aerofotogrametrijskih snimaka veće prostorne rezolucije od ostalih testiranih snimaka i temeljem DMR-a veće točnosti i detaljnosti od ostalih testiranih u radu, nastalog aerofotogrametrijskom izmjerom. Analizom točnosti SRTM (za 2011. $RMSE = 2,22$ m, za 2012. $RMSE = 6,68$ m) i GE (za 2011. $RMSE = 2,51$ m, za 2012. $RMSE = 5,49$ m) snimaka jasno se uočava kako su postignute točnosti podjednake uz primjetno variranje $RMSE$ vrijednosti za različite godine istraživanja. Vrijednost SD pokazuje prosječno 35% povećanje preciznosti SRTM snimaka (za 2011. $SD = 1,32$ m, za 2012. $SD = 1,38$ m) u odnosu na GE snimke (za 2011. $SD = 1,69$ m, za 2012. $SD = 1,96$ m). Jasno vidljiva razlika $RMSE$ i SD vrijednosti na SRTM i GE snimkama pokazuje postojanje sustavnog utjecaja. Određeni sustavni utjecaj odnosno možebitni pomak vidljiv je i iz vrijednosti ME . U budućim istraživanjima potrebno je istražiti mogućnost geometrijske korekcije na SRTM ili GE snimkama jer bi se na taj način u velikoj mjeri povećala točnost satelitskih snimaka i mjerenja nastalih temeljem njih. Važno je naglasiti kako je točnost ortorektificiranih satelitskih snimaka (SRTM) po metodi prikazanoj u ovom radu u prosjeku veća za oko 4,5 puta u odnosu na izvorne ORS2A snimke. Također treba reći kako je preciznost ortorektificiranih (SRTM) snimaka u prosjeku veća za oko 13 puta u odnosu na izvorne ORS2A snimke.

Radi jednostavnoga korištenja metode prezentirane u ovom radu, odnosno omogućavanja brzog i efikasnog povećavanja prostorne točnosti satelitskih snimaka cjelokupno istraživanje temelji se na programima otvorenoga koda (OTB, QGIS i dr.) u kombinaciji s besplatno dostupnim javnim podacima (SRTM DMR). Na taj se način budućim istraživačima olakšava mogućnost ponovne provedbe postupka analize prostorne točnosti za druga područja u Republici Hrvatskoj i svijetu.

ZAHVALA. Ovo istraživanje provedeno je u sklopu istraživačkog projekta GEMINI (Geoprostorno praćenje zelene infrastrukture na temelju terestričkih, zračnih i satelitskih snimaka, IP-2016-06-5621) što ga financira Hrvatska zaklada za znanosti.

Literatura

- Aguilar, M. A., del Mar Saldana, M., Aguilar, F. J. (2013): Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 427–435.
- Belfiore, O. R., Parente, C. (2015): Orthorectification and Pan-Sharpening of WorldView-2 Satellite Imagery to Produce High Resolution Coloured Ortho-Photos, *Modern Applied Science*, 9(9), 122–130.
- Belfiore, O. R., Parente, C. (2016): Comparison of Different Algorithms to Orthorectify WorldView-2 Satellite Imagery, *Algorithms*, 9(4), 67.
- Campbell, J. B., Wynne, R. H. (2011): *Introduction to remote sensing*, 5th Edn., Guilford Press, New York, USA.
- Capaldo, P., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Nascetti, A., Pieralice, F. (2012): DSM generation from high resolution imagery: applications with WorldView-1 and Geoeye-1, *Italian Journal of Remote Sensing/Rivista Italiana di Telerilevamento*, 44(1).
- Crespi, M., Fratarcangeli, F., Giannone, F., Pieralice, F. (2012): A new rigorous model for high-resolution satellite imagery orientation: Application to EROS A and QuickBird, *International journal of remote sensing*, 33(8), 2321–2354.
- Fraser, C. S., Dial, G., Grodecki, J. (2006): Sensor orientation via RPCs, *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(3), 182–194.
- Gašparović, M., Jogun, T. (2018): The effect of fusing Sentinel-2 bands on land-cover classification, *International Journal of Remote Sensing*, 39(3), 822–841.
- Gašparović, M., Medak, D., Miler, M. (2017): Geospatial monitoring of green infrastructure – case study Zagreb, Croatia, *SGEM Vienna Green*, Vienna, Austria.
- Goudarzi, M. A., Landry, R. J. (2017): Assessing horizontal positional accuracy of Google Earth imagery in the city of Montreal, Canada, *Geodesy and Cartography*, 43(2), 56–65.
- Grizonnet, M., Michel, J., Poughon, V., Inglada, J., Savinaud, M., Cresson, R. (2017): Orfeo ToolBox: open source processing of remote sensing images, *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(1), 15.
- Junfeng, X., Jingfeng, H. (2006): Orthorectification of IKONOS and impact of different resolution DEM, *Geo-spatial Information Science*, 9(2), 108–111.
- Maglione, P. (2016): Very High Resolution Optical Satellites: An Overview of the Most Commonly used, *American Journal of Applied Sciences*, 13(1), 91.
- Maglione, P., Parente, C., Vallario, A. (2013): Using rational polynomial functions for rectification of GeoEye-1 imagery, *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*, 1(6), 12–17.
- Mohammed, N. Z., Ghazi, A., Mustafa, H. E. (2013): Positional accuracy testing of Google Earth, *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 4(6), 6–9.
- Nikolakopoulos, K. G., Tsombos, P. I., Zervakou, A. (2007): Evaluating SRTM and ASTER DEM accuracy for the broader area of Sparti, Greece, In *Proc. of SPIE*, Vol. 6746, pp. 67460F1-12.
- Oh, J., Lee, C. (2015): Automated bias-compensation of rational polynomial coefficients of high resolution satellite imagery based on topographic maps, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100, 14–22.
- Premužić, M., Šljivarčić, M. (2010): T7D korisnička aplikacija, *Zbornik radova 2. CROPOS konferencije, Državna geodetska uprava, Zagreb*, 87–100.

- Pulighe, G., Baiocchi, V., Lupia, F. (2016): Horizontal accuracy assessment of very high resolution Google Earth images in the city of Rome, Italy, *International Journal of Digital Earth*, 9(4), 342–362.
- R Core Team (2017): R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Tao, C. V., Hu, Y. (2002): 3D Reconstruction Methods, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(7), 705–714.
- Tong, X., Liu, S., Weng, Q. (2010): Bias-corrected rational polynomial coefficients for high accuracy geo-positioning of QuickBird stereo imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(2), 218–226.
- Toutin, T. (2004): Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods, *International journal of remote sensing*, 25(10), 1893–1924.
- Widyaningrum, E., Fajari, M., Octariady, J. (2016): Accuracy Comparison of Vhr Systematic-Ortho Satellite Imageries against Vhr Orthorectified Imageries Using Gcp, *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 305–309.

Mrežne adrese

- URL 1: Apollo Mapping Office,
<https://apollomapping.com/blog/g-faq-orthorectification-part>, (15. 11. 2017.).
- URL 2: DigitalGlobe Whitepaper,
https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/35/DG-8SPECTRAL-WP_0.pdf, (3. 10. 2017.).
- URL 3: WorldView-2 Overview,
<https://content.satimagingcorp.com.s3.amazonaws.com/static/satellite-sensor-specification/WorldView-2-PDF-Download.pdf>, (3. 10. 2017.).
- URL 4: Katalog proizvoda Državne geodetske uprave,
<https://esavjetovanja.gov.hr/Documents/Download?documentId=6432>, (13. 12. 2017.).
- URL 5: CROPOS – korisnički priručnik,
http://www.cropos.hr/files/docs/cropos_users-manual.pdf, (10. 12. 2017.).
- URL 6: QGIS Geographic Information System,
<https://www.qgis.org/>, (15. 10. 2017.).

Spatial Accuracy Analysis of Aerial and Satellite Imagery of Zagreb

ABSTRACT. The main objective of this research is spatial accuracy analysis of aerial and satellite imagery. Nowadays, many satellite and aerial imagery are available through publicly and freely accessible sources and services. In this paper spatial accuracy for WorldView-2 (WV2) Ortho Ready Standard imagery (ORS2A), orthorectified WV2 imagery with Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model (DEM), imagery accessed through Google Earth service and accuracy for digital orthophoto (DOF) from 2011 and 2012 will be analysed. The study area is located in the central part of Zagreb, and covers the area of 131 square km part of the mountain Medvednica in the north, along with river Sava and lowland areas in the south. WV2 imagery were purchased within project GEMINI (Geospatial monitoring of green infrastructure using terrestrial, airborne and satellite imagery). Results of this research show that the ORS2A imagery achieved the worst accuracy, while aerial imagery (DOF) gained the best accuracy. The accuracy of the orthorectified WV2 imagery with SRTM DEM is on average 4.5 times higher than the ORS2A imagery, while the precision of the orthorectified imagery is on average 13 times higher than the ORS2A imagery. The accuracy of the orthorectified and Google Earth imagery is similar, while the precision of the orthorectified imagery is 35% higher than the Google Earth imagery. Entire research was conducted with using open-source software in combination with freely available and public data. In this way, future research can be easily conducted and reproduced for spatial accuracy analysis on other areas in Croatia and other locations.

Keywords: remote sensing, WorldView-2, DOF, satellite imagery orthorectification, SRTM, spatial accuracy, Google Earth.

Primljeno / Received: 2017-12-20

Prihvaćeno / Accepted: 2018-02-26