

Izvorni znanstveni članak / Original scientific paper

Analiza softverskih rješenja za georektifikaciju rasterskih slika kartografskog prikaza

Nedim TUNO – Sarajevo¹, Ivka KLJAJIĆ – Zagreb², Adna DEMIROVIĆ, Admir MULAHUSIĆ, Jusuf TOPOLJAK – Sarajevo¹

SAŽETAK. Ispravna georektifikacija skeniranih kartografskih prikaza temeljni je preduvjet za dobivanje kvalitetnih prostornih podataka o objektima koji predstavljaju njihov sadržaj. CAD i GIS softveri omogućuju raznovrsna rješenja za korigiranje geometrijskih distorzija rasterskih slika, uzrokovanih deformacijama materijala na kojem je izrađen kartografski prikaz i pogreškama skeniranja. U radu su kritički razmotrena četiri široko rasprostranjena softvera, s ciljem procjene njihovih mogućnosti utvrđivanja i otklanjanja neuniformnih deformacija skeniranih katastarskih planova. Ispitani su i analizirani rezultati praktične primjene različitih globalnih i lokalnih metoda transformacije rasterske slike lista katastarskog plana, kao i različitih metoda preuzorkovanja. Provedenim istraživanjem pokazano je da se upotrebom nekih softverskih rješenja dobivaju rezultati georektifikacije koji znatnije odstupaju od očekivanih vrijednosti, a koje su trebale proizaći iz primijenjenih metoda transformacije.

Cljučne riječi: georeferenciranje, georektifikacija, transformacije, preuzorkovanje, rasterske slike, ocjena točnosti.

¹ izv. prof. dr. sc. Nedim Tuno, Univerzitet u Sarajevu – Građevinski fakultet, Patriotske lige 30, BA-71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, e-mail: nedim_tuno@gf.unsa.ba

Adna Demirović, mr. dipl. ing. geod. i geoinf., BNpro Sarajevo, Buka 6, BA-71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, e-mail: adnaredzic35@gmail.com

prof. dr. sc. Admir Mulahusić, Univerzitet u Sarajevu – Građevinski fakultet, Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, e-mail: admir_mulahusic@gf.unsa.ba

izv. prof. dr. sc. Jusuf Topoljak, Univerzitet u Sarajevu – Građevinski fakultet, Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, e-mail: jusuf.topoljak@gf.unsa.ba

² izv. prof. dr. sc. Ivka Kljajić, Sveučilište u Zagrebu – Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: ivka.kljajic@geof.unizg.hr

1. Uvod

Podaci koji se odnose na pozicioniranje objekata unutar geoinformacijskih sustava često se dobivaju iz zračnih (satelitskih i aerofotogrametrijskih) snimaka i raspoloživih postojećih kartografskih prikaza u analognom obliku. Korigiranje geometrijskih distorzija i georeferenciranje rasterskih digitalnih slika (zračnih snimaka i skeniranih kartografskih prikaza) su osnovni zadaci kojima se osigurava dobivanje kvalitetnih geometrijskih podataka o prostornim objektima. Kreiranje geoprostornih baza podataka digitalizacijom postojećih analognih kartografskih proizvoda, različitih mjerila i detaljnosti prikaza, veoma je često jer je najbrži i najjeftiniji način dobivanja digitalnih karata. Inicijalni korak digitalizacije je pretvaranje karte iz analognog u digitalni format, što se postiže skeniranjem, nakon čega se skenogram karte georektificira, tj. oslobađa geometrijskih distorzija i transformira iz lokalnog slikovnog koordinatnog sustava u izabrani referentni koordinatni sustav. To se postiže određivanjem odgovarajućih parametara transformacije (Gielsdorf i dr. 2003), o kojima izravno ovisi kvaliteta prostornih podataka u bazama nastalim vektorizacijom korigiranih i georeferenciranih rasterskih slika (Manzano-Agugliaro i dr. 2014). Ispitivanje položajne točnosti zračnih snimaka i skeniranih kartografskih prikaza, u svojim studijama primijenili su Mesas-Carrascosa i dr. (2014), Žilić (2015), Tazsakowski i dr. (2018) i mnogi drugi autori. U tim je radovima kvaliteta rasterskih podataka ocjenjivana nakon provođenja postupka georektifikacije.

U Bosni i Hercegovini postoje pravilnici koji propisuju tehničke normative za georektifikaciju katastarskih planova (URL 1, URL 2). Tako je npr. definirana osnova transformacije (točke koordinatne mreže katastarskog plana), kriteriji koje moraju ispuniti katastarski planovi u pogledu točnosti (vrijednost standardnog odstupanja razlika transformiranih koordinata točaka koordinatne mreže i njihovih teorijskih vrijednosti mora biti manja od vrijednosti $0,10 \text{ mm} \cdot M$, gdje je M nazivnik mjerila analognog plana, odstupanja na pojedinim točkama koordinatne mreže ne smiju biti veća od trostruke vrijednosti standardnog odstupanja po koordinatnim osima lista plana i sl.). Model korigiranja geometrijskih distorzija skeniranog plana nije određen, već je samo navedeno da se za georektifikaciju lista plana trebaju koristiti transformacije čiji matematički model odgovara prirodi sustavnih pogrešaka lista analognog plana i prirodi sustavnih pogrešaka nastalih tijekom skeniranja. U praksi se prevodenje katastarskih planova iz rasterskog koordinatnog sustava u referentni koordinatni sustav najčešće provodilo primjenom globalnih metoda transformacije pomoću polinoma viših stupnjeva, po pravilu samo pomoću raspoloživih točaka koordinatne mreže plana. Smatralo se da takav postupak zadovoljava zahtjeve točnosti georektifikacije i ekonomičnosti rada. Međutim, istraživanjem koja su proveli Tuno i dr. (2015) i Tuno i dr. (2017a) pokazano je da transformacije temeljene na koordinatnoj mreži planova imaju ograničene mogućnosti modeliranja i korigiranja neuniformnih i neravnomjerno raspoređenih distorzija, kakve su često prisutne na planovima, kao i da se takve deformacije najefikasnije uklanjaju lokalnim metodama transformacije. Različite metode transformacije, temeljene na istom skupu identičnih točaka

iz kojih se određuju parametri transformacije, daju različite vrijednosti transformiranih koordinata (Vračarić i Marošan 2003), što izaziva velike nedoumice pri izboru i upotrebi ispravnog modela transformacije analognih planova (Ročić i Cetl 2002). Većina CAD i GIS softvera, sadrže transformacije kao što su Helmertova, afina itd., čime je omogućena georektifikacija skenograma različitih kartografskih prikaza. Uzimanje prekobrojnih identičnih (veznih) točaka za određivanje parametara transformacije, pruža mogućnost ocjene točnosti (Ročić i dr. 2002).

U Bosni i Hercegovini (BiH) su se u okviru sustavnog prevođenja katastarskih planova iz analognog u digitalni oblik, za georektifikaciju primjenjivala različita softverska rješenja. Transformacija skeniranih listova katastarskih planova obavljena je pomoću alata koji omogućavaju obradu rasterskih slika u CAD i GIS softverima (Tuno 2007), kao što su AutoCAD Raster Design (ranije CAD Overlay), Progis WinGIS, Geoinformatika GisLandManager (ranije Katozor), MapSoft DigiScan i sl. Premda su te aktivnosti započele prije više od 25 godina, nije poznato da se ispitala stvarna točnost metoda transformacije primijenjenih u navedenim softverima od strane stručnjaka zaposlenih u geodetskim upravama ili uz pomoć neke druge institucije. Rezultate do kojih je došao stručni tim Republičkoga geodetskog zavoda Srbije, testiranjem softvera MapSoft DigiScan provjerom njegove upotrebljivosti s aspekta korisnika, tj. izvršava li softver sve implementirane procese ispravno objavio je Stefanović (2007). Stoga se ovim istraživanjem željela ispitati stvarna točnost georektifikacije primjenom CAD i GIS softvera, u kojima je obrađena rasterska slika skeniranoga lista katastarskog plana. Pri tome su testirani softveri AutoCAD Raster Design, MicroStation Descartes, QGIS i ArcGIS, koji su uspješno upotrebljavani u svrhu georektifikacije rasterskih podataka u prethodnim istraživanjima, poput onih koja su proveli Tanarro i dr. (2005), Zviely i dr. (2009), Liew i dr. (2012), Martínez-Carricondo i dr. (2022), Zhang i dr. (2022), Lampropoulos i dr. (2023).

2. Materijali i metode

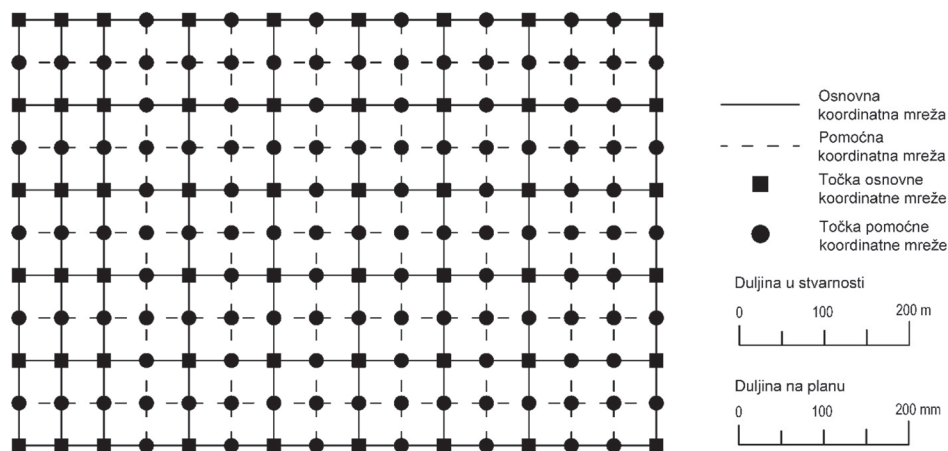
2.1. Kartografski prikaz – skenirani list katastarskog plana mjerila 1:1000

U cilju provjere i analize softverskih rješenja za korigiranje geometrijskih distorzija i georeferenciranje rasterskih slika kartografskog prikaza, skeniran je list radnog izvornika katastarskog plana mjerila 1:1000, sa standardnom rezolucijom od 400 dpi i spremljen u format *.TIFF (slika 1). List plana izrađen je 1968. godine na korektostatu na temelju izmjere zemljišta provedene aerofotogrametrijskom metodom koju je obavio Geodetski zavod iz Sarajeva.



Slika 1. Skenirani list katastarskog plana 6H15-Fd9 SARAJEVO – 212, mjerilo 1:1000, izdala Republička geodetska uprava – Sarajevo, Općina Stari Grad Sarajevo, Služba za imovinsko-pravne, geodetske poslove, katastar i stambene poslove.

Korisni prostor lista katastarskog plana (dimenzija 750×500 mm) ispunjen je, u skladu s tadašnjim propisima za izradu planova, točkama osnovne koordinatne mreže (54 točke koje predstavljaju vrhove kvadrata sa stranicom duljine 100 mm, dok su sa zapadne strane lista plana to vrhovi pravokutnika dimenzija 50×100 mm) – na marginama lista plana ispisane su pravokutne koordinate. Dodatno, unutar osnovne koordinatne mreže, na listu plana nalazi se i pomoćna koordinatna mreža, čiji su vrhovi kvadrata na razmaku 50 mm (slika 2). Ukupno su velikim koordinatografom kartirane 122 točke pomoćne mreže, što je obavljano istodobno s kartiranjem točaka osnovne koordinatne mreže. Točke osnovne koordinatne mreže korištene su u postupku korekcije geometrijske distorzije rasterske slike skeniranog lista plana kao identične odnosno vezne točke (engl. GCP – *Ground Control Points*), iz kojih su određeni parametri transformacije. Točke pomoćne koordinatne mreže, za koje na analognom planu nisu ispisane koordinate, korištene su kao kontrolne točke (engl. CP – *Check Points*). Budući da je kompletna koordinatna mreža iskartirana s istom točnošću i pri istom postavu nosioca lista plana na koordinatografu, pomoćne točke pružaju izvrsnu mogućnost za sagledavanje stvarnih efekata primjene različitih metoda transformacije oslonjenih na 54 točke osnovne koordinatne mreže (Tuno i dr. 2017b).



Slika 2. Osnovna i pomoćna koordinatna mreža na ispitivanom listu katastarskog plana mjerila 1:1000.

2.2. Testirani softveri

Korigiranje geometrijskih distorzija i georeferenciranje rasterske slike skeniranog lista katastarskog plana provedeni su u dva CAD softvera (AutoCAD Raster Design i MicroStation Descartes) te dva GIS softvera (ArcGIS i QGIS), pri čemu su testirane različite metode transformacije i preuzorkovanja.

2.2.1. AutoCAD Raster Design

Raster Design je Autodeskova aplikacija razvijena sa svrhom pružanja mogućnosti za rad s rasterskim slikama u AutoCAD-ovu programskom okruženju. Aplikacija je razvijena 1988. godine pod nazivom CAD Overlay, a 2002. godine preimenovana je u Raster Design (URL 3). S obzirom na raširenost primjene softvera AutoCAD, ne iznenađuje što je najviše skeniranih kartografskih prikaza u BiH (posebno katastarskih planova) georektificirano upravo korištenjem te aplikacije.

U Raster Designu su dostupne globalne metode transformacije pomoću polinoma i lokalna linearna transformacija po trokutima. S obzirom na to da aplikacija omogućava izbor visokih stupnjeva polinoma, bosanskohercegovački katastarski planovi su uobičajeno transformirani polinomnim transformacijama 4., 5., 6. i 7. stupnja. Npr. kod planova mjerila 1:5000 sa 130 identičnih točaka definiranih vrhovima kvadrata koordinatne mreže, mogu se zadati stupnjevi polinoma od 1 do 14. Nakon definiranja identičnih točaka, u dijaloškom okviru alata *Rubbersheet* prikazuje se vrijednost standardnog odstupanja transformacije (engl. *Root Mean Square Error – RMSE*), ali ne i

preostala odstupanja po koordinatnim osima. Za svaku identičnu točku prikazane su samo vrijednosti ukupnog preostalog položajnog odstupanja nakon transformacije (engl. *Error*), bez odstupanja po koordinatnim osima. Iz tih razloga Raster Design ne može poslužiti za testiranje grubih pogrešaka prema *Pravilniku o bazi podataka katastra nekretnina* (URL 1), gdje je propisano da odstupanja na pojedinim točkama koordinatne mreže ne smiju biti veća od trostruke vrijednosti standardnog odstupanja po koordinatnim osima lista katastarskog plana. Nedostatak Raster Designa je i nemogućnost spremanja podataka o odstupanjima koordinata identičnih točaka nakon transformacije. Transformacija po trokutima nije primjenjivana kod georektifikacije planova u BiH zbog toga što identične točke nakon transformacije zadržavaju svoje teorijske koordinate (nema popravaka), pa nije moguće provesti ocjenu točnosti prema odredbama pravilnika (URL 1, URL 2).

2.2.2. MicroStation Descartes

Descartes je aplikacija za obradu rasterskih slika unutar softverskog paketa MicroStation. Za Bentley ga je 1996. godine razvila tvrtka HMR Inc. (Kanada), po kojoj je i rasterski format prilagođen Descartesu dobio ime (Goodman 1996). U aplikaciji su implementirane sljedeće metode transformacije rasterskih slika: Helmertova, afina, projektivna, polinomna 2. i 3. stupnja te TPS (engl. *Thin Plate Spline* – tankoslojni splajn) transformacija, a rasterska slika može se preuzorkovati (engl. *resampling*) metodama najbližeg susjeda, bilinearne interpolacije i kubne konvolucije.

Korisničko okruženje alata za georektifikaciju *Register* slično je Autodeskovom rješenju, ali je definiranje identičnih točaka nepraktičnije. Naime, i Descartes omogućuje zadavanja teorijskih koordinata identičnih točaka unosom pomoću tipkovnice ili grafički odabirom točaka u radnom prostoru crteža koji su na pozicijama identičnih točaka u ciljnome koordinatnom sustavu (npr. presjecišta linija koordinatne mreže), ali nije podržano automatsko postavljanje kursora miša na približne pozicije identičnih točaka, nakon čega operater treba precizno očitati koordinate piksela. Osim toga, nije moguće automatsko formiranje mreže s referentnim točkama za georektifikaciju, temeljem zadanih parametara kartografskog prikaza koji se georektificira (opcija koju podržava Raster Design).

Prikaz rezultata georektifikacije rasterske slike obavlja se u dijaloškom okviru alata *Register*, gdje su prikazane vrijednosti standardnog odstupanja transformacije (*RMSE*), kao i njene komponente po koordinatnim osima. Za svaku identičnu točku prikazane su vrijednosti ukupnog preostalog položajnog odstupanja kao i reziduali (odstupanja) po koordinatnim osima (engl. *Residuals*), što znači da Descartes može poslužiti za testiranje grubih pogrešaka. Nedostatak Descartesa je što nema mogućnost automatiziranog testiranja grubih pogrešaka, pa operater mora sam ocijeniti vrijednosti na pojedinačnim točkama u modelu. Svi podaci o preostalim odstupanjima nakon transformacije na identičnim točkama mogu se spremati u tekstualnu datoteku, čime je olakšano kreiranje izvješća o georektifikaciji lista katastarskog plana.

2.2.3. QGIS

Za georektifikaciju u QGIS-u, GIS softveru otvorenog koda, u starijim verzijama tog softvera koristi se dodatak (engl. *plugin*) *GDAL Georeferencer* (URL 4). Spomenuti dodatak nalazio se već u prvim verzijama Quantum GIS-a. U novijim verzijama QGIS-a integriran je alat *Georeferencer* koji podržava georektifikaciju rasterskih i vektorskih podataka. Omogućuje izbor od sedam metoda transformacije: linearna, Helmertova, polinomna 1., 2. i 3. stupnja, TPS i projektivna, a na raspolaganju je pet metoda preuzorkovanja: najbližeg susjeda, bilinearna interpolacija, kubna konvolucija, kubni splajn i Lanczosova interpolacija (URL 5).

Definiranje identičnih točaka slično je kao u Descartesu, kao i pojedinosti vezane uz prikaz rezultata georektifikacije rasterske slike. Naime, prikazano je ukupno standardno odstupanje transformacije (*Mean error*), a za svaku identičnu točku su u tablici identičnih točaka *GCP table* dane vrijednosti preostalih položajnih odstupanja (*Residuals*), kao i odstupanja u smjerovima koordinatnih osi (dx i dy). Kao u Descartesu, i u QGIS-u se svi podaci o preostalim odstupanjima na identičnim točkama nakon transformacije mogu izravno spremirati u tekstualnu datoteku.

2.2.4. ArcGIS

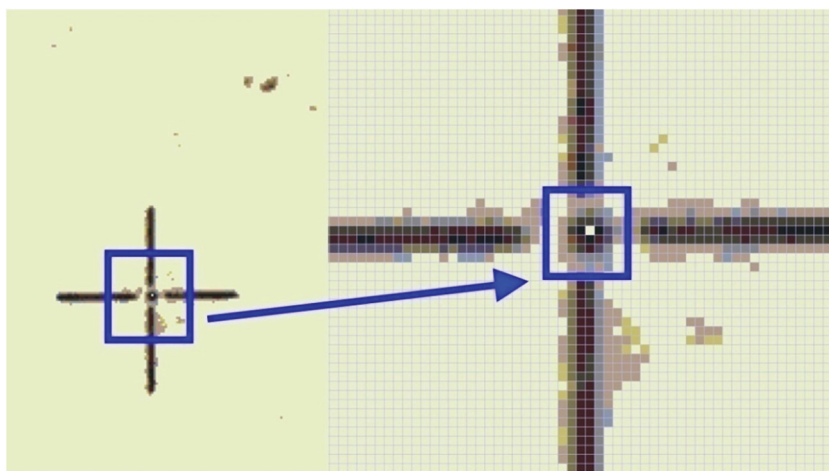
U ArcGIS-u je inkorporiran alat za georektifikaciju i predstavlja njegov standardni sastavni dio. Sve potrebne naredbe nalaze se na kartici *Georeference* (URL 6). ArcGIS podržava osam metoda transformacije, a to su: transformacija po sličnosti (Helmertova), transformacija pomoću polinoma nultog, prvog (afina transformacija), drugog i trećeg stupnja, transformacija metodom izjednačenja, projektivna i TPS transformacija. Nakon odabira metode transformacije, potrebno je definirati jednu od tri metode preuzorkovanja: najbližeg susjeda, bilinearna interpolacija ili kubna konvolucija.

Sve što je navedeno o QGIS-u u vezi definiranja identičnih točaka i prikaza rezultata georektifikacije, vrijedi i za Esrijev softver ArcGIS. U dijaloškom okviru *Link*, reziduali (odstupanja) su označeni s *Residual_x*, *Residual_y* i *Residual*, dok je ukupna točnost transformacije označena kao *Total RMS Error*. Kao što u Raster Designu tako i u ArcGIS-u nije moguće spremanje podataka o odstupanjima koordinata identičnih točaka nakon transformacije.

3. Rezultati i rasprava

Rasterska slika skeniranog lista katastarskog plana pripremljena je za testiranje tako što je unutar svakog pikira (uboda igle koordinatografa zasićenog tušem), kojima su definirana presjecišta linija koordinatne mreže, odabran središnji piksel i promijenjena mu boja, u cilju jasne uočljivosti središta pikira. U originalnoj slikovnoj matrici skenograma lista katastarskog plana, pikiri imaju dimenzije oko 5×5 piksela, što može izazvati pogreške u pozicioniranju kursora miša na pikir, čak i ako se to obavlja u prozoru s odgovarajućim povećanjem (dimenzije piksela preračunate u stvarne mjere iznose približno 6×6 cm) (slika

3). Markiranjem središnjeg piksela eliminirana je položajna pogreška, jer se koordinate točaka uvijek očitavaju na istim mjestima (prije i nakon transformacije), tj. omogućeno je da se u svim testiranim softverima uvijek odabere ista točka. U cilju dokazivanja istinitosti ovih tvrdnji, provedeno je dodatno testiranje gdje su očitavane vrijednosti koordinata točaka osnovne koordinatne mreže u optimalnom povećanju, kako bi se smanjile moguće pogreške. Iz pet serija očitavanja, koja je obavio isti operater, ocijenjena je točnost očitavanja koordinata presjecišta linija koordinatne mreže. Za svaku točku izračunane su vrijednosti standardnih odstupanja navođenja kursora miša na piksel koji definira središte piksela, a ukupna točnost očitavanja koordinata je $\sigma_y = \sigma_x = 0,001 \text{ mm} \cdot M$ (M je nazivnik mjerila analognog plana). To znači da se u ovom istraživanju pogreška pozicioniranja kursora miša može potpuno zanemariti.



Slika 3. Priprema točaka koordinatne mreže u rasterskoj slici skeniranog lista katastarskog plana.

U cilju ispitivanja mogućnosti različitih softvera, rasterska slika skeniranog lista katastarskog plana je približno georeferencirana pomoću dvije točke na okviru korisnog prostora plana, a parametri transformacije zapisani su u pripadajućoj datoteci formata *.TFW. Na taj je način osigurano da u svakom od softvera, čija se rješenja provjeravaju, budu iste koordinate identičnih točaka, kako bi se mogli usporediti dobiveni rezultati. Nakon toga su za sve točke osnovne i pomoćne koordinatne mreže očitane koordinate na ekrana računala (rasterski sustav) i pridružene im odgovarajuće teorijske koordinate. Spomenute koordinate unesene su u tekstualnu datoteku te su dalje obrađene u vlastitom softverskom rješenju za računanje parametara transformacije i ocjenu točnosti. Na taj se način došlo do vrijednosti koordinata tih točaka u ciljnom referentnom koordinatnom sustavu (sustav Gauss-Krügerove projekcije), a koje rezultiraju iz primjene različitih metoda transformacije. Stoga je bilo moguće utvrditi stupanj podudaranja koordinata i ocjene točnosti koji teoretski proizlaze iz primijenjenih metoda transformacije (referentni podaci – očekivane vrijednosti) s vrijednostima koje su dobivene primjenom testiranih softvera.

Standardna metoda ocjene točnosti korigiranja geometrijskih distorzija rasterskih kartografskih prikaza podrazumijeva određivanje vrijednosti *RMSE* na temelju reziduala (preostalih odstupanja transformacije – popravaka) identičnih točaka koje su korištene za transformaciju. Reziduali po koordinatnim osima (r_y i r_x) rezultiraju iz izjednačenja po metodi najmanjih kvadrata, koje se provodi u cilju određivanja parametara transformacije, a na temelju prekobrojnih identičnih točaka. Dakle, *RMSE* predstavlja mjeru odstupanja transformiranih vrijednosti koordinata identičnih točaka od njihovih teorijskih vrijednosti:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{xy_i}^2}; r_{xy_i} = \sqrt{r_{x_i}^2 + r_{y_i}^2},$$
 pri čemu je n ukupan broj identičnih točaka.

U tablici 1 prikazani su osnovni statistički pokazatelji za različite metode transformacije, izračunane vlastitim softverskim rješenjem na temelju očitanih koordinata identičnih točaka u rasterskom koordinatnom sustavu i njihovih teorijskih vrijednosti. U svrhu međusobne usporedbe rezultata, u svim softverima ispitana je polinomna transformacija 3. stupnja, a osim toga u pojedinim softverima testirane su i:

- Polinomna transformacija 5. stupnja (AutoCAD Raster Design)
- TPS transformacija (Microstation Descartes)
- Afina transformacija (polinomna transformacija 1. stupnja) (ArcGIS)
- Helmertova transformacija (QGIS).

Detaljni opisi spomenutih metoda transformacije mogu se pronaći u relevantnoj literaturi, npr. Goshtasby (2005), Yadav, P. i Yadav, A. (2009), Burger i Burge (2009) i dr.

Na temelju očitanih koordinata n identičnih točaka u lokalnom slikovnom koordinatnom sustavu plana (X, Y) i izabranom ciljnom referentnom koordinatnom sustavu (x, y) , definiraju se transformacijske funkcije $f(x, y)$:

- Helmertova transformacija:

$$X = S(x \cos \theta + y \sin \theta) + h,$$

$$Y = S(-x \sin \theta + y \cos \theta) + k,$$

gdje S, θ, h i k predstavljaju parametre transformacije.

- Afina transformacija:

$$X = ax + by + c,$$

$$Y = dx + ey + f,$$

gdje su a, b, c, d, e i f parametri transformacije.

- Polinomne transformacije:

$$X = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{m-i} a_{ij} x^i y^j, \quad Y = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{m-i} b_{ij} x^i y^j,$$

pri čemu je m stupanj polinoma, a a_{ij} i b_{ij} su parametri transformacije.

- TPS transformacija:

$$f(x, y) = a + bx + cy + \sum_{i=1}^n w_i U(r_i),$$

gdje su $U(r_i) = r_i^2 \log r_i^2$ – radijalna osnovna funkcija,

$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + d^2}$ – udaljenost promatrane točke od ostalih točaka (d^2 je parametar krutosti), a, b, c i w_i – parametri transformacije koji se određuju iz n jednadžbi $f(x_i, y_i) = v_i$ i tri dodatna uvjeta:

$$\sum_{i=1}^n w_i = \sum_{i=1}^n x_i w_i = \sum_{i=1}^n y_i w_i = 0.$$

Nakon provedenih transformacija s pomoću točaka osnovne koordinatne mreže, rasterska slika georeferenciranog lista katastarskog plana učitana je u okruženje ispitivanih softvera. Koordinate točaka pomoćne koordinatne mreže očitane su u optimalnom ekranskom povećanju, kako bi se pogreške navođenja kursora miša svele na što manju mjeru. Usporedbom koordinata tih točaka dobivenih georektifikacijom lista katastarskog plana u testiranim softverima (y_i^g, x_i^g) s koordinatama koje su trebale rezultirati iz izabranih metoda transformacije (y_i, x_i), utvrđeno je da postoje razlike. Odstupanja georektificiranog lista katastarskog plana, određena na temelju razlika transformiranih koordinata 122 točke pomoćne koordinatne mreže, po koordinatnim osima su: $d_{y_i} = y_i - y_i^g$ i $d_{x_i} = x_i - x_i^g$, dok je ukupno položajno

odstupanje: $d_{yx_i} = \sqrt{d_{y_i}^2 + d_{x_i}^2}$. Pomoću tih odstupanja izračunane su vrijednosti $RMSE_d$, kao ukupnog pokazatelja odstupanja pozicija piksela georektificiranog lista katastarskog plana od njihovih referentnih vrijednosti.

Tablica 1. Pregled statističkih pokazatelja preostalih odstupanja za list katastarskog plana dobiveni primjenom različitih globalnih metoda transformacije.

Pokazatelj	Afina transformacija			Helmertova transformacija			Polinomna transformacija 3. stupnja			Polinomna transformacija 5. stupnja			
	r_y	r_x	r_{xy}	r_y	r_x	r_{xy}	r_y	r_x	r_{xy}	r_y	r_x	r_{xy}	
Minimum [cm]	-16,7	-12,2	1,4	-16,0	-12,8	1,7	-17,5	-13,5	1,0	-8,3	-6,8	0,3	
Sredina [cm]	0,0	0,0	8,6	0,0	0,0	8,6	0,0	0,0	8,2	0,0	0,0	4,1	
Maksimum [cm]	13,0	15,0	17,8	13,1	14,5	18,3	12,6	14,4	18,1	7,6	6,7	8,7	
Raspon [cm]	29,7	27,2	16,4	29,1	27,3	16,6	30,2	28,0	17,0	15,9	13,5	8,5	
RMSE [cm]	7,0	6,3	9,4	7,0	6,2	9,4	6,9	6,1	9,2	3,7	2,9	4,7	
Raspored odstupanja %	0–5 cm	48,1	48,1	13,0	46,3	46,3	13,0	46,3	59,3	24,1	85,2	87,0	61,1
	5–10 cm	27,8	44,4	51,9	31,5	46,3	57,4	37,0	29,6	44,4	14,8	13,0	38,9
	10–15 cm	22,2	7,4	25,9	20,4	7,4	20,4	14,8	11,1	24,1	0,0	0,0	0,0
	15–20 cm	1,9	0,0	9,3	1,9	0,0	9,3	1,9	0,0	7,4	0,0	0,0	0,0
	20–25 cm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	> 25 cm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

3.1. Točnost georektifikacije u softveru AutoCAD Raster Design

Prilikom georektifikacije skeniranog lista katastarskog plana, utvrđeno je da Raster Design u izvješću o georektifikaciji daje ispravne rezultate kada je riječ o standardnom odstupanju transformacije (*Total RMS error*) i vrijednostima ukupnog preostalog položajnog odstupanja nakon transformacije r_{yx} na identičnim točkama (*Error*), što znači da su unutar softvera ispravno implementirani matematički modeli transformacija (slika 4).

ID	Error	Source Point	Destination Point
1	0.0319	6535300.1053, 4855499.9869	6535300.0000, 4855500.0000
2	0.0955	6535400.1722, 4855499.9901	6535400.0000, 4855500.0000
3	0.0397	6535500.0468, 4855499.9268	6535500.0000, 4855500.0000
4	0.1293	6535599.9235, 4855499.9292	6535600.0000, 4855500.0000
5	0.0461	6535699.9914, 4855499.9304	6535700.0000, 4855500.0000
6	0.1223	6535800.1219, 4855499.9309	6535800.0000, 4855500.0000
7	0.0614	6535899.9325, 4855499.9959	6535900.0000, 4855500.0000
8	0.0105	6536000.0009, 4855499.9995	6536000.0000, 4855500.0000
9	0.0591	6535300.1038, 4855599.9909	6535300.0000, 4855600.0000
10	0.1174	6535400.1687, 4855599.9914	6535400.0000, 4855600.0000
11	0.0212	6535500.0438, 4855599.9305	6535500.0000, 4855600.0000
12	0.1154	6535599.9230, 4855599.9967	6535600.0000, 4855600.0000
13	0.1109	6535700.0520, 4855600.0581	6535700.0000, 4855600.0000
14	0.1329	6535800.1189, 4855600.0006	6535800.0000, 4855600.0000

Total RMS error: 0.0918

Slika 4. Dijaloški okvir alata Rubbersheet s prikazanim vrijednostima RMSE i preostalim odstupanjima na identičnim točkama primjenom polinomne transformacije 3. stupnja (AutoCAD Raster Design).

Pogreške položaja rasterske slike, nakon njenoga georektificiranja primjenom polinomnih transformacija u Raster Designu, izražene odstupanjima (d_y i d_x) očitanih koordinata na georeferenciranom listu plana od očekivanih vrijednosti koordinata, su primjetne i znatno prelaze točnost očitavanja koordinata. Osnovni statistički pokazatelji razlika koordinata y i x točaka pomoćne koordinatne mreže razmatranog lista katastarskog plana, obrađenog Raster Designom, sadržani su u tablici 2. Vidljivo je da razlike koordinata točaka dosežu velike iznose (gotovo $0,1 \text{ mm} \cdot M$, a kod polinomne transformacije 3. stupnja gotovo 40% točaka nalazi se na pozicijama koje su od očekivanih udaljene više od $0,05 \text{ mm} \cdot M$). Karakteristično je da su razlike po x osi za skoro sve razmatrane točke negativnog predznaka. Položajna odstupanja imaju osjetne iznose, posebice uzevši u obzir stvarnu točnost kartiranja koordinatne mreže na katastarskim planovima mjerila 1:1000, a koja iznosi $0,09 \text{ mm} \cdot M$ (Tuno i dr. 2015, Tuno i dr. 2017b).

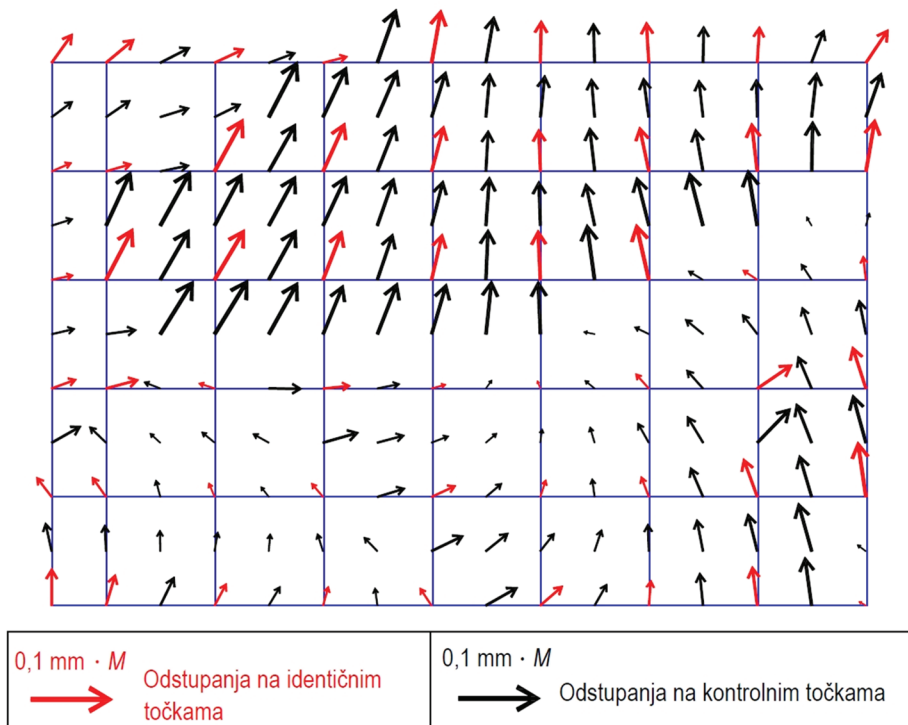
Tablica 2. Razlike koordinata točaka dobivene primjenom polinomnih transformacija 3. i 5. stupnja (AutoCAD Raster Design).

Pokazatelj	Polinomna transformacija 3. stupnja			Polinomna transformacija 5. stupnja			
	d_y	d_x	d_{xy}	d_y	d_x	d_{xy}	
Minimum [cm]	-4,4	-6,8	1,2	-2,5	-6,3	0,2	
Sredina [cm]	-0,8	-3,6	4,3	0,8	-2,6	3,5	
Maksimum [cm]	2,2	0,0	7,8	4,1	0,7	7,1	
Raspon [cm]	6,5	6,9	6,6	6,6	7,0	6,9	
RMSE _d [cm]	2,1	4,2	4,7	2,1	3,2	3,8	
Raspored odstupanja %	0–1 cm	33,6	10,7	0,0	34,4	26,2	6,6
	1–2 cm	31,1	19,7	9,0	24,6	17,2	13,9
	2–3 cm	14,8	14,8	20,5	23,0	16,4	23,0
	3–4 cm	16,4	8,2	17,2	16,4	11,5	19,7
	4–5 cm	4,1	9,0	13,9	1,6	11,5	17,2
	> 5 cm	0,0	37,7	39,3	0,0	17,2	19,7

Uz prethodno navedene statističke pokazatelje, značajan uvid u položajni raspored razlika koordinata identičnih i kontrolnih točaka pružaju vektori pomaka razlika d_y i d_x prikazani na slici 5. Jasno su uočljiva polja homogenih vektora s istom orijentacijom i intenzitetom, što ukazuje na lokalnu sustavnost. Razlike koordinata na identičnim i kontrolnim točkama posebno su izražene u gornjem dijelu lista katastarskog plana.

Navedeni pokazatelji jasno ukazuju da se koordinate točaka očitanih na listu plana georektificiranim s pomoću Raster Designa i izračunanih primjenom odgovarajućih metoda transformacije, međusobno signifikantno razlikuju, kao i da su vrijednosti njihovih razlika velikog iznosa i konstantnog predznaka (po

x osi). Razlog opisanih neslaganja najvjerojatnije je vezan uz primjenu transformacije na izvornu rastersku sliku, kako bi se dobila geometrijski korigirana slika u referentnom koordinatnom sustavu. Treba uzeti u obzir da geometrijska korekcija izvorne rasterske slike dovodi do preuzorkovanja sadržaja slike (piksela), kada se izrađuje nova korigirana slika. To dovodi do određenog narušavanja sadržaja izvorne slike, tj. do gubitka ili promjene ulaznih podataka. Način na koji su izračunane vrijednosti novih piksela georektificiranog rasterskog plana u Raster Designu je nepoznat i na njega nije moguće djelovati, jer taj softver nema mogućnost izbora metode preuzorkovanja u postupku georektifikacije.



Slika 5. Odstupanja na identičnim i kontrolnim točkama nakon geometrijskog korigiranja skeniranog lista katastarskog plana dobivena primjenom polinomne transformacije 3. stupnja u AutoCAD Raster Designu.

3.2. Točnost georektifikacije u softveru Microstation Descartes

Kako bi se ispitala stvarna točnost georektifikacije u Descartesu, provedeno je testiranje i analiza rezultata georektifikacije istog skeniranog lista katastarskog plana mjerila 1:1000, koji je obrađivan i u Raster Designu. U svrhu usporedbe dobivenih rezultata, geometrijsko korigiranje lista plana u Descartesu provedeno je na temelju istih očitanih i teorijskih koordinata identičnih točaka,

koje su korištene u Raster Designu. Na taj je način eliminirana položajna pogreška, a odabir parova točaka proveden je na istim mjestima kao u softverima koji se uspoređuju. Analizom rezultata prikazanih u dijaloškom okviru *Register* (slika 6) utvrđeno je da se prikazana točnost georektifikacije podudara s podacima koje daje Raster Design, što znači da su u oba softvera implementirani isti algoritmi pa se dobivaju skoro identični rezultati.

Nakon definiranja identičnih točaka, u Descartesu je georektifikacija rasterske slike provedena polinomnom transformacijom 3. stupnja i TPS transformacijom, uz zadržavanje iste rezolucije, tj. veličine piksela. Pri tome je prvo preuzorkovanje piksela obavljeno metodom najbližeg susjeda (engl. *Nearest Neighbor*), kod koje se pridružuje vrijednost svakom "popravljenom" pikselu i to od najbližeg susjednog "nepopravljenog" piksela. Nakon provedene transformacije, očitane su koordinate točaka koordinatne mreže na georeferenciranom skenogramu lista katastarskog plana. Usporedbom tako dobivenih koordinata s koordinatama koje su trebale rezultirati iz izabranih metoda transformacije, utvrđeno je da postoje znatne razlike (tablica 3), slično kao u Raster Designu. Stoga je ponovno obavljeno preuzorkovanje piksela, primjenom algoritma kubne konvolucije (engl. *Cubic Convolution*). Neslaganja rezultata dobivenih georektifikacijom u Descartesu, uz preuzorkovanje kubnom konvolucijom, i očekivanih vrijednosti koordinata (d_x i d_y) su zanemariva, što se može vidjeti iz tablice 3. Primjenom TPS transformacije, čak 77% položajnih odstupanja ima manju vrijednost od $0,01 \text{ mm} \cdot M$.

Navedena razmatranja jasno pokazuju da Descartes može korektno pozicionirati piksele georeferenciranog skenograma lista katastarskog plana prema izabranoj metodi transformacije, ukoliko se preuzorkovanje obavlja metodom kubne konvolucije. Glavni nedostatak te metode očituje se u njenoj vremenskoj zahtjevnosti, što utječe na brzinu geometrijskog korigiranja rasterske slike (Ghostasby 2005).

Point #	Control	Base System		Uncorrected System		Residuals:		
		X	Y	X	Y	X	Y	XY
1	X	6535300.0000	4855500.0000	6535300.1050	4855499.9870	0.0296	0.0117	0.0318
2	X	6535400.0000	4855500.0000	6535400.1720	4855499.9900	0.0922	0.0244	0.0954
3	X	6535500.0000	4855500.0000	6535500.0470	4855499.9270	-0.0223	-0.0324	0.0393
4	X	6535600.0000	4855500.0000	6535599.9230	4855499.9290	-0.1267	-0.0283	0.1298
5	X	6535700.0000	4855500.0000	6535699.9910	4855499.9300	-0.0356	-0.0301	0.0466
6	X	6535800.0000	4855500.0000	6535800.1220	4855499.9310	0.1164	-0.0378	0.1224
On/Total:		54 / 54		Root Mean Square Error		0.0688	0.0609	0.0918

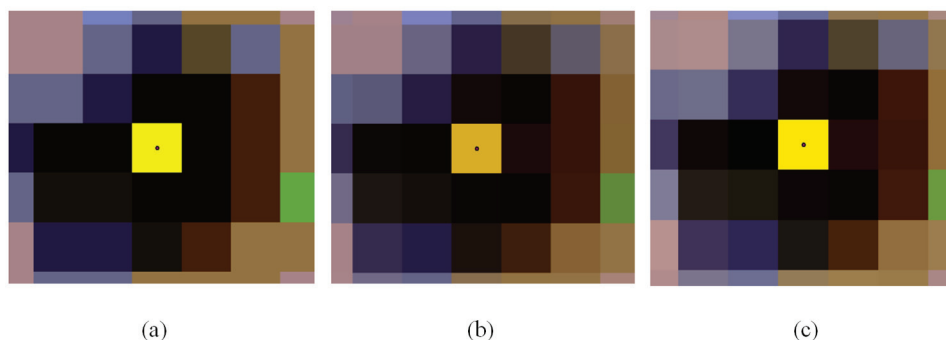
Slika 6. Dialoški okvir alata *Register* s prikazanim vrijednostima RMSE i preostalim odstupanjima na identičnim točkama nakon polinomne transformacije 3. stupnja (*Microstation Descartes*).

Tablica 3. Razlike koordinata točaka dobivene primjenom polinomne transformacije 3. stupnja i TPS transformacije (Microstation Descartes).

Pokazatelj		Metoda najbližeg susjeda			Kubna konvolucija					
		Polinomna transformacija 3. stupnja			Polinomna transformacija 3. stupnja			TPS transformacija		
		d_y	d_x	d_{xy}	d_y	d_x	d_{xy}	d_y	d_x	d_{xy}
Minimum [cm]		-5,0	-7,0	0,4	-1,4	-1,3	0,1	-1,2	-1,2	0,1
Sredina [cm]		2,4	2,6	4,4	0,1	0,0	0,9	0,1	0,0	0,8
Maksimum [cm]		6,9	6,3	9,0	1,7	1,3	1,8	1,4	1,2	1,7
Raspon [cm]		11,9	13,3	8,6	3,1	2,6	1,7	2,6	2,4	1,6
RMSE _d [cm]		3,4	3,4	4,8	0,7	0,6	1,0	0,6	0,6	0,8
Raspored odstupanja %	0–1 cm	25,0	29,5	6,8	83,6	87,7	64,8	89,3	93,4	77,0
	1–2 cm	14,2	19,9	11,9	16,4	12,3	35,2	10,7	6,6	23,0
	2–3 cm	10,2	11,9	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3–4 cm	16,5	7,4	8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	4–5 cm	15,3	8,0	20,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	> 5 cm	18,8	23,3	44,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

3.3. Točnost georektifikacije u softveru ArcGIS

Ista metodologija testiranja alata za georektifikaciju, primijenjena u Raster Designu i Descartesu, primijenjena je i u ArcGIS-u. Prilikom učitavanja rasterske slike u softver, ona nije preuzorkovana kako ne bi došlo do narušavanja njezine geometrije. Za transformaciju poslužile su iste koordinate identičnih točaka osnovne koordinatne mreže. Utvrđeno je da u ArcGIS-u izbor metoda preuzorkovanja nije povezan s geometrijskim položajem piksela nakon transformacije, tj. za sve metode položaj piksela je isti, a dolazi do malih promjena njihove boje (slika 7). Nakon definiranja identičnih točaka, u dijaloškom okviru *Link* (slika 8) mogu se pregledati preostala odstupanja transformacije i ukupna točnost, koji imaju skoro iste vrijednosti kao u prethodno razmatranim softverima. Zanimljivo je da su odstupanja d_x i d_y dana s drugačijim predznakom u odnosu na stvarne vrijednosti.



Slika 7. *Primjer istog središnjeg piksela za istu metodu transformacije s različitim metodom preuzorkovanja: (a) najbliži susjed, (b) bilinearna interpolacija i (c) kubna konvolucija (ArcGIS).*

Link								
Total RMS Error: Forward:0,0918466								
	Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/>	1	6535300,1050...	4855499,9870...	6535300,0000...	4855500,0000...	-0,02941132	-0,01148987	0,03157598
<input checked="" type="checkbox"/>	2	6535400,1720...	4855499,9900...	6535400,0000...	4855500,0000...	-0,09215546	-0,02420044	0,09528006
<input checked="" type="checkbox"/>	3	6535500,0470...	4855499,9270...	6535500,0000...	4855500,0000...	0,02217102	0,03254700	0,03938097
<input checked="" type="checkbox"/>	4	6535599,9230...	4855499,9290...	6535600,0000...	4855500,0000...	0,12660980	0,02845764	0,12976856
<input checked="" type="checkbox"/>	5	6535699,9910...	4855499,9300...	6535700,0000...	4855500,0000...	0,03540802	0,03013611	0,04649638
<input checked="" type="checkbox"/>	6	6535800,1220...	4855499,9310...	6535800,0000...	4855500,0000...	-0,11650085	0,03785706	0,12249737
<input checked="" type="checkbox"/>	7	6535899,9320...	4855499,9960...	6535900,0000...	4855500,0000...	0,06066132	-0,01184082	0,06180615
<input checked="" type="checkbox"/>	8	6536000,0010...	4855499,9990...	6536000,0000...	4855500,0000...	-0,00750732	0,00796509	0,01094543
<input checked="" type="checkbox"/>	9	6535300,1040...	4855599,9910...	6535300,0000...	4855600,0000...	-0,05080414	-0,03044128	0,05922611
<input checked="" type="checkbox"/>	10	6535400,1690...	4855599,9910...	6535400,0000...	4855600,0000...	-0,11173248	-0,03628540	0,11747671
<input checked="" type="checkbox"/>	11	6535500,0440...	4855599,9300...	6535500,0000...	4855600,0000...	0,00350952	0,02148438	0,02176913
<input checked="" type="checkbox"/>	12	6535599,9230...	4855599,9970...	6535600,0000...	4855600,0000...	0,10622406	-0,04536438	0,11550532
<input checked="" type="checkbox"/>	13	6535700,0520...	4855600,0580...	6535700,0000...	4855600,0000...	-0,04367065	-0,10192871	0,11088998
<input checked="" type="checkbox"/>	14	6535800,1190...	4855600,0010...	6535800,0000...	4855600,0000...	-0,12853241	-0,03520358	0,13328997

Auto Adjust Transformation: 3rd Order Polynomial
 Degrees Minutes Seconds Forward Residual Unit : Unknown

Slika 8. *Dijaloški okvir alata Link s prikazanim vrijednostima RMSE i preostalim odstupanjima na identičnim točkama nakon polinomne transformacije 3. stupnja (ArcGIS).*

Analizom koordinata očitanih na georeferenciranom listu plana nakon primjene različitih metoda transformacije (tablica 4), uočava se da su bolji rezultati ostvareni primjenom metode transformacije temeljene na manjem broju nepoznatih parametara, tj. primjenom affine transformacije.

Tablica 4. Razlike koordinata točaka dobivene primjenom afine i polinomne transformacije 3. stupnja (ArcGIS).

Pokazatelj		Polinomna transformacija 3. stupnja			Afina transformacija		
		d_y	d_x	d_{xy}	d_y	d_x	d_{xy}
Minimum [cm]		-3,2	-3,1	0,1	-1,9	-1,1	0,0
Sredina [cm]		0,1	-0,6	2,4	-0,4	-0,1	0,9
Maksimum [cm]		3,2	3,2	3,9	1,1	1,0	2,1
Raspon [cm]		6,4	6,3	3,8	3,0	2,1	2,0
$RMSE_d$ [cm]		1,4	2,1	2,5	0,8	0,5	1,0
Raspored odstupanja %	0–1 cm	58,2	17,2	4,1	78,7	95,1	68,0
	1–2 cm	24,6	29,5	22,1	21,3	4,9	31,1
	2–3 cm	15,6	44,3	48,4	0,0	0,0	0,8
	3–4 cm	1,6	9,0	25,4	0,0	0,0	0,0
	4–5 cm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	> 5 cm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

3.4. Točnost georektifikacije u softveru QGIS

Sve što je prethodno navedeno u vezi načina testiranja prethodna tri softvera vrijedi i za QGIS pa se ovdje neće ponavljati. Numerički pokazatelji transformacije prikazani u tablici *GCP table*, kada je riječ o apsolutnim vrijednostima odstupanja koordinata identičnih točaka, skoro jednaki su vrijednostima dobivenim pomoću drugih softvera. Zanimljivo je da su reziduali d_x dani s drugačijim predznakom u odnosu na stvarne vrijednosti. Treba napomenuti da je u zaglavlju tablice navedeno kako su vrijednosti reziduala izražene u pikselima, a one su zapravo dane u jedinicama karte (u ovom slučaju metrima). Također je uočljivo da QGIS daje drukčiju vrijednost ukupnog odstupanja transformacije. Tako npr. za polinomnu transformaciju 3. stupnja, stvarna vrijednost $RMSE$ iznosi 9,18 cm, a identičnu vrijednost tog pokazatelja daju Raster Design, Descartes i ArcGIS. Međutim, ta vrijednost (*Mean error*) u QGIS-u iznosi 10,17 cm (slika 9). Naime, u QGIS-u ukupna točnost transformacije računa se prema formuli:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-u} \sum_{i=1}^n r_{xy}^2}$$

pri čemu je n ukupan broj identičnih točaka, a u najmanji broj točaka potreban za definiranje upotrijebljene metode transformacije.

GCP table								
Enabled	ID	Source X	Source Y	Dest. X	Dest. Y	dX (pixels)	dY (pixels)	Residual (pixels)
✓	0	6535300.11	4855499.99	6535300.00	4855500.00	-0.029466	0.011663	0.031690
✓	1	6535400.17	4855499.99	6535400.00	4855500.00	-0.092197	0.024336	0.095354
✓	2	6535500.05	4855499.93	6535500.00	4855500.00	0.022229	-0.032381	0.039277
✓	3	6535599.92	4855499.93	6535600.00	4855500.00	0.126512	-0.028283	0.129635
✓	4	6535699.99	4855499.93	6535700.00	4855500.00	0.035354	-0.030166	0.046475
✓	5	6535800.12	4855499.93	6535800.00	4855500.00	-0.116545	-0.037826	0.122530
✓	6	6535899.93	4855500.00	6535900.00	4855500.00	0.060518	0.011942	0.061685
✓	7	6536000.00	4855500.00	6536000.00	4855500.00	-0.007757	-0.007658	0.010900
✓	8	6535300.10	4855599.99	6535300.00	4855600.00	-0.050821	0.030569	0.059306
✓	9	6535400.17	4855599.99	6535400.00	4855600.00	-0.111760	0.036483	0.117564
✓	10	6535500.04	4855599.93	6535500.00	4855600.00	0.003298	-0.021292	0.021546

Rotation: 0.0 ° Transform: Polynomial 3 Mean error: 0.101746 1473,-433 EPSG:

Slika 9. Dio tablice GCP table s prikazanim vrijednostima RMSE i preostalim odstupanjima na identičnim točkama nakon polinomne transformacije 3. stupnja (QGIS).

Sve metode preuzorkovanja u QGIS-u daju iste pozicije piksela nakon transformacije lista katastarskog plana kao što je i u ArcGIS-u. Preuzorkovanje u QGIS-u dovodi do znatnijih razlika u boji piksela u odnosu na boju izvorne skenirane rasterske slike. I za ovaj softver vrijede slični rezultati kao u slučaju Esrijeva softvera, kada su u pitanju pozicije točaka plana nakon transformacije. Iz tablice 5 je vidljivo kako jednostavnija metoda transformacije proizvodi manja odstupanja u odnosu na kompleksniju metodu transformacije, koja je temeljena na većem broju parametara transformacije. Posebno su zanimljivi rezultati Helmertove transformacije, koji pokazuju da su y koordinate georeferenciranog skeniranog lista katastarskog plana identične očekivanim, dok po x osi postoji identičan mali pomak na svim točkama.

Tablica 5. Razlike koordinata točaka dobivene primjenom Helmertove i polinomne transformacije 3. stupnja (QGIS).

Pokazatelj		Polinomna transformacija 3. stupnja			Helmertova transformacija		
		d_y	d_x	d_{xy}	d_y	d_x	d_{xy}
Minimum [cm]		-3,2	-4,5	0,2	-0,1	-1,4	1,1
Sredina [cm]		0,0	-1,6	3,0	0,0	1,3	1,3
Maksimum [cm]		3,1	1,9	5,3	0,1	-1,1	1,4
Raspon [cm]		6,3	6,4	5,0	0,2	0,3	0,3
$RMSE_d$ [cm]		1,8	2,7	3,2	0,1	1,3	1,3
Raspored odstupanja %	0–1 cm	39,3	21,3	10,7	100,0	0,0	0,0
	1–2 cm	18,0	27,0	16,4	0,0	100,0	100,0
	2–3 cm	34,4	12,3	19,7	0,0	0,0	0,0
	3–4 cm	8,2	27,9	25,4	0,0	0,0	0,0
	4–5 cm	0,0	11,5	23,8	0,0	0,0	0,0
	> 5 cm	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0

4. Zaključak

Provedenim istraživanjem evaluirane su stvarne mogućnosti primjene različitih CAD i GIS softvera za korigiranje geometrijskih distorzija i georeferenciranje katastarskih planova, analizom rezultata georektifikacije rasterske slike dobivene skeniranjem. Vidljivo je da točnost georektificiranih kartografskih skenograma umnogome ovisi o izboru softvera, upotrijebljenoj metodi transformacije i metodi preuzorkovanja.

Analizom točnosti primijenjenih metoda transformacije u testiranim softverima (AutoCAD Raster Design, MicroStation Descartes, QGIS i ArcGIS), ustanovljeno je da će kod uobičajenih zahtjeva točnosti georektifikacije rasterskih slika, bilo koji od tih softvera dati zadovoljavajuće rezultate. Međutim, ukoliko postoji potreba za najkvalitetnijom geometrijskom korekcijom skeniranih kartografskih prikaza, u cilju prikupljanja što točnijih informacija o geometriji prostornih podataka s rasterskih slika kartografskog prikaza, zaključuje se da kod nekih softverskih rješenja postoje znatnija neslaganja očekivanih rezultata georektifikacije i rezultata dobivenih primjenom softvera. Premda vrijednosti preostalih odstupanja transformacije na identičnim (veznim) točkama u izvješću o georektifikaciji imaju kod svih softvera iste vrijednosti, a koje se poklapaju s teorijskim, nakon georektifikacije rasterske slike dolazi do manjih ili većih odstupanja pozicija piksela u odnosu na pozicije koje su trebale rezultirati iz primijenjene metode transformacije. Primjerice, u AutoCAD Raster Designu razlike koordinata očitanih na georeferenciranome planu i očekivanih koordinata u pojedinim dijelovima plana dosežu iznose koji su jednaki točnosti

kartiranja točaka koordinatne mreže. U MicroStation Descartesu se isto tako dobivaju loši rezultati ukoliko se koriste predefimirane postavke, a koje podrazumijevaju preuzorkovanje metodom najbližeg susjeda. Nakon promjene metode preuzorkovanja, rezultati georektifikacije rasterske slike lista katastarskog plana obrađene u tom softveru su jednaki očekivanim na većem dijelu lista katastarskog plana. U QGIS-u i ArcGIS-u dobivaju se zanemariva odstupanja koordinata piksela transformirane rasterske slike u odnosu na očekivane koordinate, ali samo u slučaju upotrebe jednostavnih metoda transformacije. Kompleksnije metode transformacije, kako globalne tako i lokalne, temeljene na većem broju parametara transformacije, uzrokuju veća položajna odstupanja nakon geometrijske korekcije rasterskih slika u spomenutim GIS softverima. U ranijim studijama dokazano je da se primjenom složene lokalno osjetljive TPS transformacije najuspješnije korigiraju distorzije uzrokovane deformacijama nosioca katastarskih planova i pogreškama skeniranja. Međutim, njena upotreba u QGIS-u i ArcGIS-u daje rezultate koji se ne slažu s onima koji su trebali proizaći iz te transformacije.

Rezultati provedenih istraživanja ukazuju da bi bilo poželjno unaprijediti dosadašnju praksu, temeljenu na korištenju softverskih paketa koji omogućuju korigiranje geometrijskih distorzija i georeferenciranje rasterskih slika kartografskog prikaza, bez saznanja kako oni funkcioniraju. Uvođenje ozbiljnijeg tehničkog pristupa u ovoj problematici rezultiralo bi točnijom geometrijskom korekcijom rasterskih slika kartografskog prikaza.

ZAHVALA. Autori zahvaljuju na potpori Federalnom ministarstvu obrazovanja i nauke i Ministarstvu za nauku, visoko obrazovanje i mlade Kantona Sarajevo.

Literatura

- Burger, W., Burge, M. (2009): Principles of Digital Image Processing Core Algorithms, Springer-Verlag, London.
- Gielsdorf, F., Gruendig, L., Aschoff, B. (2003): Geo-Referencing of Analogue Maps with Special Emphasis on Positional Accuracy Improvements Updates, FIG Working Week 2003, Paris, France, April 13–17, 2003, 8 pp.
- Goodman, J. E. (1996): Hands On: MicroStation GeoGraphics & MicroStation Descartes, Professional Surveyor Magazine – October 1996.
- Goshtasby, A. (2005): 2-D and 3-D Image Registration for Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- Lampropoulos, G., Panagiotopoulos, G., Giannakoula, C., Kokkalas, A. (2023): Geovisualization of Historical Geospatial Data: A Web Mapping Application for the 19th-Century Kaupert's Maps of Attica, Geographies, 3, 398–415, DOI: <https://doi.org/10.3390/geographies3020021>.
- Liew, L. H., Wang, Y. C., Cheah, W. S. (2012): Evaluation of Control Points' Distribution on Distortions and Geometric Transformations for Aerial Images Rectification, Procedia Engineering, 41, 1002–1008, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.275>.
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., San-Antonio-Gómez, C., López-Márquez, S., Aguilera, M. J., Gil, C. (2014): The assessment of evolutionary algorithms for analyzing the positional accuracy and uncertainty of maps, Expert Systems with Applications, 41 (14), 6346–6360, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.04.025>.
- Martínez-Carricondo, P., Carvajal-Ramírez, F., Agüera-Vega, F. (2022): Co-registration of multi-sensor UAV imagery, Case study: Boreal forest areas, Scandinavian Journal of Forest Research, 37 (4), 227–240, DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2084563>.
- Mesas-Carrascosa, F. J., Rumbao, I. C., Berrocal, J. A. B., Porras, A. G.-F. (2014): Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms, Sensors, 14 (12), 22394–22407, DOI: <http://doi.org/10.3390/s141222394>.
- Roić, M., Cetl, V. (2002): Transformacije geometrijskih podataka u katastru, Geodetski list, 56 (79), 3, 155–169.
- Roić, M., Cetl, V., Matijević, H., Kapović, Z., Mastelić Ivić, S., Ivšić, I. (2002): Prevođenje katastarskih planova izrađenih u Gauss-Kruegerovoj projekciji u digitalni vektorski oblik – postupci i procedure, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Državna geodetska uprava, Zagreb.
- Stefanović, S. (2007): Komparativna analiza postojećih programa za georeferenciranje, Geodetska služba, 107–108, 5–11.

- Tanarro, L. M., Zamorano, J. J., Palacios, D. (2005): Glacier degradation and lahar formation on the Popocatepetl volcano (Mexico) during the last eruptive period (1994–2003), *Zeitschrift für Geomorphologie*, 140, 73–92.
- Taszakowski, J., Litwin, U., Doróż, A. (2018): Transformation of the Former Austrian Cadastre Map, *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 1, 55–67, DOI: <http://dx.doi.org/10.15576/GLL/2018.1.55>.
- Tuno, N. (2007): Polinomska transformacija u georeferenciranju, *Geodetski glasnik*, 39, 38–46.
- Tuno, N., Mulahusić, A., Kogoj, D. (2015): Vrednotenje modelov transformacije geodetskih načrtov, *Geodetski vestnik*, 59 (4), 736–751, DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.736-751>.
- Tuno, N., Mulahusić, A., Kogoj, D. (2017a): Improving the Positional Accuracy of Digital Cadastral Maps through Optimal Geometric Transformation, *Journal of Surveying Engineering*, 143 (3), 05017002, DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000217](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000217).
- Tuno, N., Mulahusić, A., Topoljak, J., Kogoj, D. (2017b): Vrednotenje postopkov za ocenjevanje točnosti georeferenciranja geodetskih načrtov, *Geodetski vestnik*, 61 (3), 373–386, DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2017.03.373-386>.
- Vračarić, K., Maroščan, S. (2003): Podela duži u datoj srazmeri primenjena na digitalizaciju koordinata tačaka, *Geodetska služba*, 32 (3), 9–15.
- Yadav, P., Yadav, A. (2009): *Digital Image Processing*, University Science Press, New Delhi, Boston.
- Zhang, S., Barrett, H. A., Baros, S. V., Neville, P. R. H., Talasila, S., Sinclair, L. L. (2022): Georeferencing Accuracy Assessment of Historical Aerial Photos Using a Custom-Built Online Georeferencing Tool, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11, 582, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi11120582>.
- Zviely, D., Kit, E., Rosen, B., Galili, E., Klein, M. (2009): Shoreline migration and beach-nearshore sand balance over the last 200 years in Haifa Bay (SE Mediterranean), *Geo-Marine Letters*, 29, 93–110, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00367-008-0126-2>.
- Žilić, A. (2015): Primjena bespilotnih letjelica u geodeziji na primjeru aerofotogrametrijskog sistema SenseFly eBee, *Geodetski glasnik*, 46, 18–27, DOI: <https://doi.org/10.58817/2233-1786.2015.49.46.18>.

Mrežne adrese

- URL 1: Pravilnik o bazi podataka katastra nekretnina,
<https://www.fgu.com.ba/hr/pravilnici.html?file=files/Stranice/PDF%20files/Pravilnici/PRAVILNIK%20o%20bazi%20podataka%20katastra%20nekretnina%20%28bs%29.pdf>, (10. 2. 2024.).
- URL 2: Pravilnik o digitalnom geodetskom planu,
https://www.rgurs.org/uploads/laws/148_1.%20Правилник%20o%20дигиталном%20геодетском%20плану.pdf, (10. 2. 2024.).
- URL 3: AutoCAD Raster Design 2012, User Guide,
http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_raster_design_2012_user_s_guide.pdf, (13. 2. 2024.).
- URL 4: Georeferencer Plugin,
https://docs.qgis.org/2.18/en/docs/user_manual/plugins/plugins_georeferencer.html, (13. 2. 2024.).
- URL 5: Georeferencer,
https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/user_manual/working_with_raster/georeferencer.html, (13. 2. 2024.).
- URL 6: Georeferencing tools,
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.1/help/data/imagery/georeferencing-tools.htm>, (13. 2. 2024.).

Analysis of Software Solutions for Georectification Raster Images of Cartographic Representation

ABSTRACT. Proper georectification of scanned cartographic representations is an essential requirement for obtaining high-quality spatial data about objects that represent their content. CAD and GIS software provide a variety of solutions for correcting geometric distortions of raster images, caused by deformations of the map supporting materials and scanning errors. The paper critically evaluated four widely distributed software, with the aim of examining their capabilities for determining and eliminating non-uniform deformations of scanned cadastral plans. The results of the practical application of different global and local transformation methods of the raster image of the cadastral plan sheet, as well as different resampling methods were examined and analysed. The research revealed that certain software solutions produce georectification results that significantly differ from the expected values that should have resulted from the applied transformation methods.

Keywords: georeferencing, georectification, transformations, resampling, raster images, accuracy assessment.

Primljeno / Received: 2024-05-21

Prihvaćeno / Accepted: 2024-06-24