

# TESTIRANJE IN IZBOLJŠAVA HORIZONTALNE DATUMSKE TRANSFORMACIJE: ŠTUDIJA PRIMERA V BOSNI IN HERCEGOVINI

# EVALUATION AND IMPROVEMENT OF HORIZONTAL DATUM TRANSFORMATION MODELS: A CASE STUDY OF BOSNIA AND HERZEGOVINA

*Nedim Tuno, Admir Mulahusić, Simona Savšek, Dušan Kogoj*

UDK: 528.23(497.6)

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 6. 11. 2020

Sprejeto: 2. 2. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2021.01.13-26

SCIENTIFIC ARTICLE

Received: 6. 11. 2020

Accepted: 2. 2. 2021

## IZVLEČEK

*V delu je ovrednotena uporabnost različnih modelov transformacije koordinat med lokalnim in globalnim geodetskim datumom. Rezultati raziskave nakazujejo, da je ob zadostni gostoti veznih točk najboljši model transformacije z gridnim modelom pomikov. Transformacija, izvedena z uporabo omejenega števila veznih točk, ki ne odražajo realnega stanja izmeritvene mreže nekega območja, ne omogoča odstranitve različnih in neenakomerno razporejenih geometričnih napak, prisotnih v prostorskih podatkih. Neizogibna posledica tega je slabša natančnost transformiranih podatkov. Rezultati raziskave na testnem območju katastrske občine na območju Sarajeva kažejo, da daje transformacija z gridnim modelom pomikov optimalne gostote veliko boljše rezultate kot transformacija z uporabo gridnega modela pomikov, ki se sedaj uradno uporablja v Federaciji Bosne in Hercegovine.*

## ABSTRACT

*This study evaluates the applicability of different models of coordinate transformation between local and global geodetic datums. The results indicate the grid-based method as the best solution, assuming a sufficient density of tie points. Transformation based on a limited number of tie points, which do not reflect the real state of the survey basis in a particular area, have limited possibilities to reduce nonuniform and unequally distributed distortions that are usually found in the spatial data. This inevitably leads to the degradation of accuracy of transformation results, which is unacceptable. By using the optimal resolution grid model, which includes geodetic points from the area of the cadastral municipality that is being transformed, much better results are achieved compared to the model of distortion shifts used in the Federation of Bosnia and Herzegovina.*

## KLJUČNE BESEDE

geodetski datum, transformacija koordinat, modeliranje grida pomikov, ocena položajne natančnosti

## KEY WORDS

geodetic datum, coordinate transformation, grid look-up table modeling, positional accuracy assessment

## 1 UVOD

Ob uvajanju novih državnih referenčnih koordinatnih sistemov, ki temeljijo na globalnem mednarodnem terestričnem referenčnem sistemu (ITRS), so se geodeti v številnih državah znašli pred izzivom geometrijske transformacije državnih prostorskih podatkov v nove koordinatne sisteme.

Osnovni pogoj za uspešno transformacijo je uporaba transformacijskega modela, s katerim je mogoče prepoznati odstopanja, ki običajno obremenjujejo prostorske podatke, opisane v starih koordinatnih sistemih. Glavna težava pri transformaciji starih klasičnih geodetskih mrež v nove koordinatne sisteme je slaba in nehomogena natančnost (Kashani, 2006). Pogreški koordinat v klasičnih geodetskih mrežah so posledica slabe geometrije mreže, pomanjkljivosti modela geoida za pravilno redukcijo meritev na elipsoid, neustreznih metod za izravnavo mrež in podobnega (Tierra in sod., 2008).

Številni avtorji po svetu že od 60. let prejšnjega stoletja iščejo optimalne načine za transformacijo med starimi, praviloma lokalnimi geodetskimi datumi in novimi, praviloma geocentričnimi geodetskimi datumi. To raziskovalno področje je še vedno zelo aktivno, kar sklepamo po velikem številu objav (Varga in sod., 2017). Obstaja množica načinov za vzpostavitev povezave med geocentričnimi in lokalnimi geodetskimi datumi. V ta namen se najpogosteje uporablja Helmertova podobnostna transformacija, ki pa marsikdaj ne daje dovolj kakovostnih rezultatov (Jun in sod., 2006). Zato se vse bolj uveljavljajo ustreznejši modeli, kot so polinomske transformacije (Soycan in sod., 2017), kolokacija po metodi najmanjših kvadratov (Ampatzidis in Melachroinos, 2017), umetne nevronske mreže (Elshambaky, Kaloop in Hu, 2018; Ansari in sod., 2019), genetski algoritmi (Wu in sod., 2007), metode ploskve najmanjše ukrivljenosti (González-Matesanz in sod., 2006), tehnike strojnega učenja (Ziggah in sod., 2018), radialne osnovne funkcije (Magna Júnior in sod., 2014) itd.

V mnogih državah so sprejeti uradni modeli za transformacijo med geodetskimi datumi, ki s posebnimi programskimi rešitvami omogočajo transformacijo koordinat na ravni države. Takšne državne transformacije omogočajo modeliranje pomikov starega koordinatnega referenčnega sistema z različnimi pristopi. Kot zelo učinkovit se je pokazal gridni transformacijski model, ki vključuje datumski premik (7-parametrično transformacijo) in komponento gridnega pomika. To vrsto transformacije so prvič uporabili v ZDA (Dewhurst, 1990), pozneje pa tudi v Kanadi in Avstraliji (Collier, 2002) in mnogih drugih državah, kot so Avstrija, Nemčija, Nizozemska, Združeno kraljestvo, Grčija itd. (Grgić in sod., 2016; Ampatzidis in Demirtzoglou, 2016). V državah nekdanje Jugoslavije so razvili edinstven gridni model transformacije, ki vključuje 7-parametrično transformacijo z napovedanimi vrednostmi pomikov položajnih koordinat v urejenem rastru, na primer na Hrvaškem (Bašić in sod., 2006; Bašić, 2009; Varga in sod., 2017), v Srbiji (Božinov in sod., 2011; Odalović in sod., 2018), v Črni gori (Femić, 2013) ter v Bosni in Hercegovini (Zimić in Đonlagić, 2017). V Sloveniji je razvita drugačna rešitev, ki temelji na afini transformaciji trikotnikov ter združuje transformacijo in model pomikov (trikotniško zasnovana odsekoma afina transformacija) (Berk in Duhovnik, 2007; Berk in Komadina, 2013).

S sprejetjem Pravilnika o osnovnih geodetskih delih so bili v Federaciji Bosne in Hercegovine uvedeni novi uradni geodetski datumi in kartografske projekcije. Novi prostorski referenčni sistem je geocentrični terestrični referenčni sistem. Po definiciji koordinatnega izhodišča, orientaciji koordinatnih osi, merilu, enoti dolžin in časovni evoluciji sovpada z mednarodnim terestričnim referenčnim sistemom

ITRS za epoho 1989,0 – ITRS89 (poimenovan evropski terestrični referenčni sistem – ETRS89). ETRS89 je realiziran z evropskim terestričnim referenčnim okvirjem ETRF89. Uradna oznaka tega sistema za Federacijo Bosne in Hercegovine je BH\_ETRS89. Novi državni koordinatni sistem federacije je definiran na projekcijski ravnini prečne Mercatorjeve (Gauss- Krügerjeve) projekcije – skrajšano BH\_ETRS89/TM, s srednjim meridianom  $18^\circ$  vzhodne geografske dolžine in linearnim merilom na srednjem meridianu 0,9999. Do končnega prehoda na nov sistem se uporablja dosedanji državni koordinatni sistem BHDKS, definiran na ravnini Gauss-Krügerjeve projekcije, referenčna ploskev je elipsoid Bessel 1841, s tremi meridianskimi conami  $15^\circ$ ,  $18^\circ$  in  $21^\circ$  vzhodno od Greenwicha. Linearno merilo na srednjem meridianu je 0,9999. Povezava med novim in dosedanjim državnim koordinatnim sistemom je vzpostavljena z ustreznimi transformacijami (FGU, 2019). Zvezna uprava za geodetske in premoženjsko-pravne zadeve (FGU) je leta 2013 začela aktivnosti za določitev in uvedbo optimalnega transformacijskega modela. Izbrani transformacijski model mora v večletnem prehodnem obdobju zagotoviti možnost strateških, normativnih in operativnih odločitev, povezanih z določanjem položaja (Tabučić, 2013).

V letih 2014 in 2015 so bile izvedene terenske meritve GNSS na približno 1000 trigonometričnih točkah, definiranih v koordinatnem sistemu BHDKS. Rezultati izmere naj bi omogočili določitev transformacijskih parametrov za celotno federacijo. Izbrane merjene točke enakomerno pokrivajo celotno območje, njihova povprečna medsebojna razdalja znaša približno pet kilometrov. V postopek določanja transformacijskih parametrov med koordinatnim sistemom ETRS89 in koordinatnim sistemom BHDKS je bilo vključenih tudi 350 dodatnih točk, katerih koordinate ETRS89 so bile določene v okviru drugih projektov. Z vključitvijo vseh uporabnih identičnih točk v izračun so bili pridobljeni enotni transformacijski parametri 7-parametrične podobnostne transformacije. Z oceno dosežene notranje natančnosti je bilo ugotovljeno, da navedeni parametri zagotavljajo položajno (2D) transformacijo z natančnostjo 0,45 metra. Odstopanja po transformaciji, torej pomiki v smeri sever–jug in vzhod–vzhod, so modelirana za celotno ozemlje FBiH. Za praktično uporabo te transformacije je bil razvit računalniški program, ki omogoča transformacijo vsake točke na območju FBiH z uporabo bilinearne interpolacije. Od leta 2019 je uporabnikom mreže permanentnih GNSS-postaj BiHPOS na voljo storitev za transformacijo in preračun koordinat iz globalnega sistema v dosedanji državni koordinatni sistem za 5. in 6. cono (FGU, 2015a; FGU, 2015b; Tabučić, 2019).

V preteklosti so bili objavljeni rezultati raziskav o izboljšanju kakovosti katastrskih načrtov v povezavi s transformacijo geodetskih podatkov na območju Federacije BiH (Tuno in sod., 2015; Tuno in sod., 2017, itd.). Objav o problematiki transformacij med geodetskimi datumi nismo zasledili. V pričujočem prispevku obravnavamo vprašanje preverjanja enotnega transformacijskega modela in možnosti za njegovo izboljšanje. Izbira optimalne možnosti pomeni zagotoviti najboljšo podlago za transformacijo vsebine katastrskih načrtov v nov koordinatni sistem BH\_ETRS89. Raziskani so različni načini transformacij koordinat in vpliv gostote identičnih točk na rezultate transformacij.

## 2 METODE IN TESTNI PRIMER

### 2.1 Transformacija z gridnim modelom pomikov

Ko sta koordinatna sistema (geodetska datuma) A in B definirana s 3D-kartezičnimi koordinatami

$(X, Y, Z)$ , je transformacija točke  $j$  iz sistema A v sistem B s 7-parametrično Helmertovo podobnostno transformacijo (model Burša-Wolf) definirana z izrazom (Mulahušić in sod., 2017):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(jB)} = \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix}_{A \rightarrow B} + \begin{bmatrix} 1+m & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1+m & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1+m \end{bmatrix}_{A \rightarrow B} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(jA)},$$

kjer so:

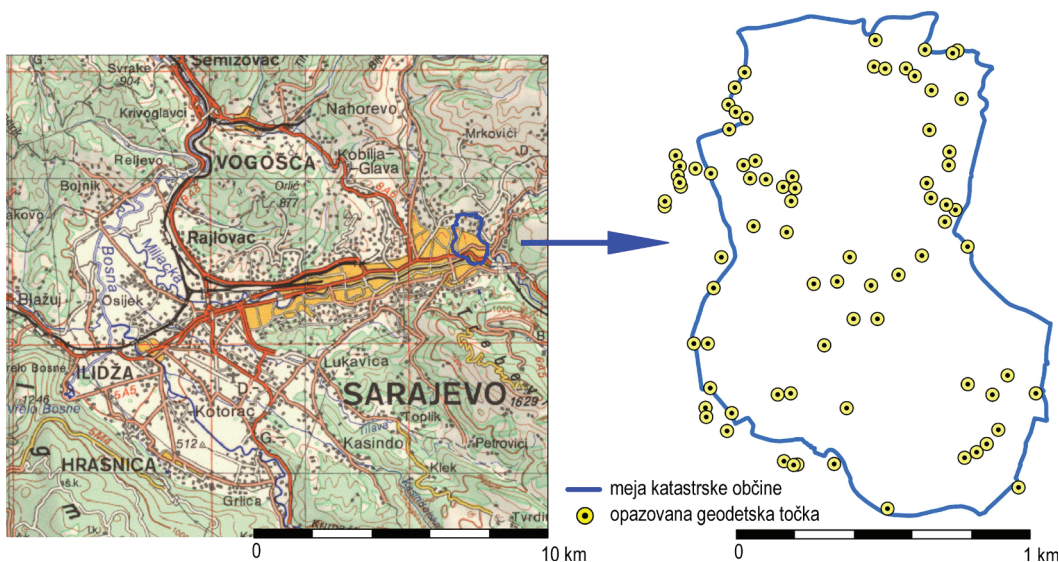
- (B) – ciljni datum,
- (A) – izvorni datum,
- $t_X, t_Y, t_Z$  – parametri translacije med izvornim in ciljnim koordinatnim sistemom,
- $\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$  – parametri rotacije okrog osi  $X, Y$  in  $Z$ ,
- $m$  – sprememba merila.

Za korektno uporabo Helmertove podobnostne transformacije predpostavimo, da pomiki niso prisotni ali da so njihove vrednosti zanemarljivo majhne (Collier, 2002). Natančnost koordinat točk, določenih z geodetskimi satelitskimi tehnikami (novi geocentrični datumi), je v primerjavi s koordinatami točk, določenimi v lokalnih datumih, zelo visoka. Zgornja predpostavka pri obravnavi transformacije med datumi različnih lastnosti nima podlage. V tem primeru s podobnostno transformacijo ne dosežemo optimalnih rezultatov (Soycan, 2005; Even-Tzur, 2020). Zato so bili razviti različni modeli datumske transformacije, ki vključujejo modelirane pomike. Ena takšnih rešitev je transformacija na podlagi grida pomikov, ki se uporablja v FBiH. Ta transformacija temelji na konformnem premiku datuma in uporabi modela pomikov. Na vsaki točki grida pomikov oddaljenosti enega kilometra so bile komponente pomikov izračunane kot splošna aritmetična sredina pomikov na identičnih točkah, ki so blizu točke grida. Utež pomika identične točke je obratnosorazmerna kvadratu oddaljenosti te točke od točke grida. Komponente pomika v poljubni točki, ki se transformira, izračunamo z znanimi transformacijskimi parametri najbližjih točk grida z uporabo bilinearne interpolacije. Podrobnosti te transformacije so opisane v navedeni literaturi (Božinov in sod., 2011; FGU, 2015a; FGU, 2015b).

## 2.2 Testno območje: katastrska občina Sarajevo II

Katastrska občina Sarajevo II (slika 1) leži v zahodnem delu občine Stari Grad Sarajevo in meri 146 hektarjev, kar predstavlja približno 3 % površine občine. Večina območja katastrske občine se razteza po položnih pobočjih sarajevske kotline med višinami od 550 do 800 metrov. Osrednji del katastrske občine predstavlja gosto pozidano območje več mestnih četrti, najstarejšega dela mesta Sarajevo, pozidanih že v začetku 16. stoletja. Na območju stojijo številni pomembni zgodovinski spomeniki.

Leta 1968 je Geodetski zavod Sarajevo izvedel izmero k. o. Sarajevo II. Uporabili so ortogonalno metodo detajlne izmere, detajlni nivelman in aerofotogrametrijo. Katastrska občina je takrat obsegala 3453 parcel, rezultat izmere pa je bilo 12 listov načrta v merilu 1 : 1000. Podlaga za izmero je bila poligonska mreža I., II., in III. reda , ki je povezala približno 450 točk. V obdobju 1968–1992 je bilo na tem območju vzpostavljenih dodatnih 330 poligonskih točk, največ v okviru ponovne izmere leta 1986. Po letu 1995 je bila geodetska mreža še zgoščena z dodatnimi 215 poligonskimi točkami, večina v okviru reambulacije leta 2004 (podjetje Geoprof Sarajevo).



Slika 1: Katastrska občina Sarajevo II in razporeditev geodetskih merskih točk.

## 2.2 Določitev koordinat poligonskih točk v sistemu ETRS89

Vhodni podatki za analizo koordinat geodetske osnovne mreže k. o. Sarajevo II so koordinate identičnih in kontrolnih točk v sistemih BHDKS in ETRS89. Koordinate obstoječih poligonskih točk v sistemu BHDKS, določenih s terestričnimi metodami v obdobju 1968–2006, so bile privzete iz razpoložljivih seznamov koordinat točk. Izmed točk, ki so bile opazovane v kampanji GPS SARAREF06, so le tri poligonske točke na območju k. o. Sarajevo II določene v sistemu ETRS89. Ker to ne zadostuje za resnejše analize, smo za namen raziskave izvedli obsežno izmero GNSS, s katero smo določili koordinate v sistemu ETRS89 za vse razpoložljive poligonske točke.

Rekognosciranje geodetskih točk na območju k. o. Sarajevo II in v njeni neposredni bližini (sto metrov od meje katastrske občine) je vključevalo ugotovitev stanja in uporabnosti 812 točk poligonske mreže iz obdobja 1968–2006. Ugotovljeno je bilo:

- 695 ali 86 % točk je popolnoma uničenih. Razlogi so gradnja mestne infrastrukture in objektov, sanacija in obnova ulic ter izgradnja lokalnih cest, zlasti v obdobju po vojni.
- Na 15 ali približno 2 % točk so bile talne označbe med sanacijo in obnovo ulic predstavljene.
- 22 ali 3 % točk je na popolnoma neprimernih mestih za izmero GNSS.
- Le 80 ali približno 10 % točk je popolnoma ali delno primernih za izmero GNSS (slika 1).

Za raziskavo je torej od evidentiranih 812 točk uporabnih le 80 točk poligonske mreže. Teh 80 točk smo izmerili ponovno. Izbrali smo hitro statično izmero GNSS. Uporabili smo dvofrekvenčne sprejemnike GNSS Topcon HiPer II. Obdelavo surovih merskih podatkov GNSS smo izvedli s programom Topcon Tools. Ocena natančnosti po izravnavi je pokazala, da je srednje standardno odstopanje horizontalnega položaja točk 10 milimetrov. Ugotovili smo, da je dosežena natančnost za potrebe naše raziskave povsem zadovoljiva.

### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

Po prehodu na nov referenčni koordinatni sistem, geodetski datum in kartografsko projekcijo bo v BiH treba transformirati veliko količino obstoječih katastrskih in drugih prostorskih podatkov. Osnovna zahteva, ki jo mora izpolniti metoda transformacije, je, da se po transformaciji kakovost vhodnih podatkov ohrani. Oceno kakovosti izvedenih postopkov transformacije lahko vrednotimo na podlagi sprememb koordinat transformiranih točk z znanimi koordinatami v obeh obravnavanih referenčnih sistemih. V analizi je bil kot osnovni kazalnik natančnosti uporabljen koren srednjega kvadratnega pogreška (angl. *root mean squared error – RMSE*). Njegovo vrednost izračunamo na podlagi razlik transformiranih in referenčnih koordinat kontrolnih točk  $d_y$  in  $d_x$  (Tuno in sod., 2017):

$$RMSE_{yx} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{yx_i}^2}; d_{yx} = \sqrt{d_y^2 + d_x^2}.$$

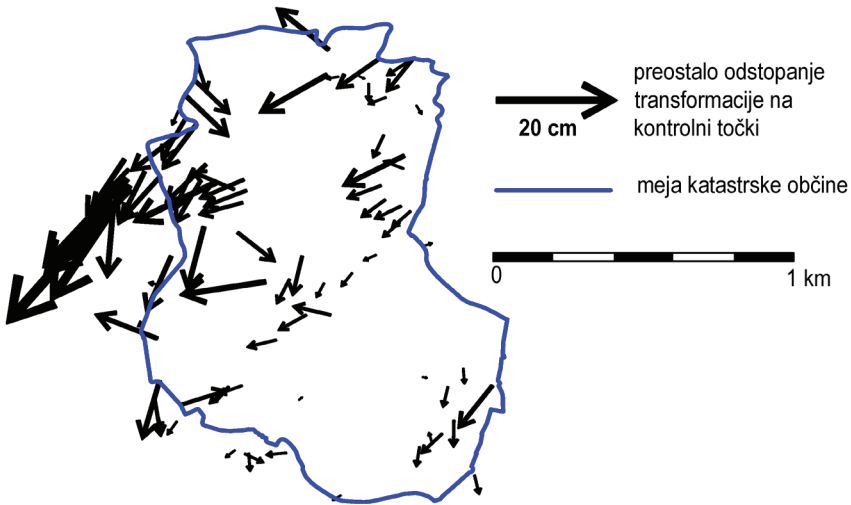
#### 3.1 Analiza rezultatov transformacije glede na enotni transformacijski model FGU

Transformacijski model z gridom pomikov, ki je implementiran v sistem BiHPOS, je še vedno v fazi testiranja. Zato rezultati tega modela transformacije še niso uradno veljavni. Ali je ta transformacijski model prava izbira? Na to vprašanje poskušamo odgovoriti na testnem primeru katastrske občine Sarajevo II. Kakovost izvedene transformacije, ocenjene na podlagi primerjave transformacije koordinat vseh 80 poligonskih točk, opisujejo statistični kazalniki, prikazani v preglednici 1 (stolpec Vse točke).

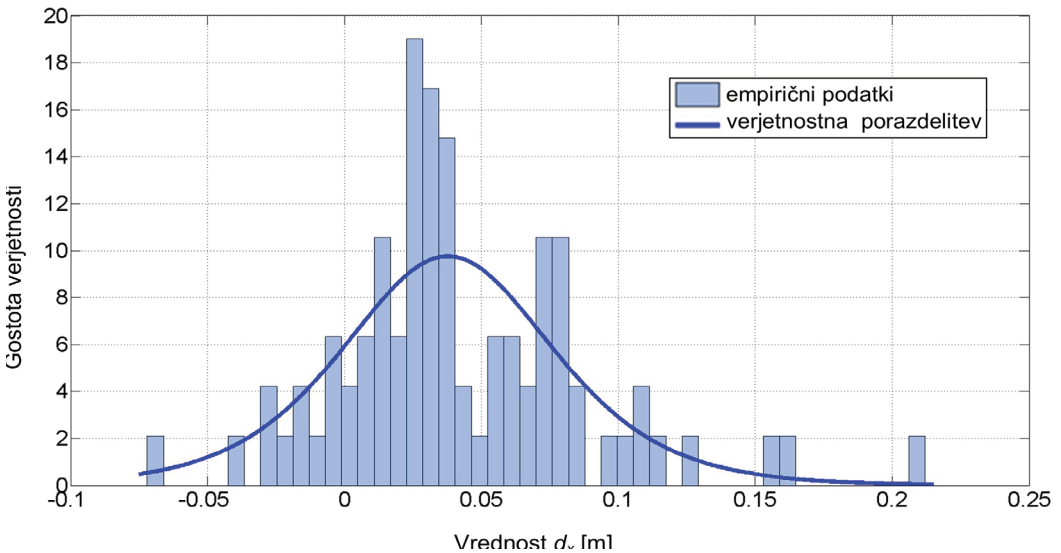
Preglednica 1: Pregled statistike pomikov za k. o. Sarajevo II, pridobljenih z metodo FGU.

Kazalnik	Vse točke			Točke iz leta 1968			Točke v letih 1968–1992			Točke po letu 1995			
	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	
<b>Minimum [m]</b>	-0,075	-0,075	0,007	-0,031	-0,016	0,007	-0,075	-0,075	0,007	-0,058	-0,031	0,009	
<b>Sredina [m]</b>	0,035	0,042	0,070	0,022	0,028	0,046	0,025	0,036	0,067	0,055	0,057	0,089	
<b>Maksimum [m]</b>	0,177	0,215	0,279	0,080	0,080	0,104	0,113	0,124	0,132	0,177	0,215	0,279	
<b>Razpon [m]</b>	0,252	0,290	0,272	0,112	0,096	0,097	0,188	0,199	0,125	0,236	0,247	0,270	
<b>RMSE [m]</b>	0,059	0,064	0,088	0,039	0,039	<b>0,055</b>	0,050	0,058	<b>0,077</b>	0,077	0,082	<b>0,112</b>	
Porazdelitev pomikov %	<b> 0–5 cm </b>	65,4	61,7	48,1	72,2	83,3	72,2	70,6	55,9	47,1	55,2	55,2	34,5
	<b> 5–10 cm </b>	23,5	28,4	28,4	27,8	16,7	16,7	20,6	32,4	23,5	24,1	31,0	41,4
	<b> 10–15 cm </b>	9,9	4,9	17,3	0,0	0,0	11,1	8,8	11,8	29,4	17,2	0,0	6,9
	<b> 15–20 cm </b>	1,2	2,5	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	6,9	3,4
	<b> 20–25 cm </b>	0,0	2,5	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9	10,3
	<b>&gt; 25 cm </b>	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4

Odstopanja na nekaterih točkah dosežejo vrednosti do 28 centimetrov. Vrednosti *RMSE* so relativno velike. Pomiki točk so sistematični, večina v smeri jugozahod. To je še posebej opazno v severozahodnem delu obravnavanega območja (slika 2). S transformacijo se očitno ne odpravijo sistematični vplivi. To potrjuje tudi histogram preostalih odstopanj v smeri osi  $x$  s pripadajočo krivuljo verjetnostne porazdelitve (slika 3). Krivulja je močno zamaknjena v desno.



Slika 2: Pomiki poligonskih točk na območju k. o. Sarajevo II, model transformacije FGU.



Slika 3: Histogram in krivulja verjetnostne porazdelitve razlik teoretičnih in transformiranih x-koordinat točk, metoda FGU.

Pomiki so bili dodatno analizirani glede na časovno obdobje, v katerem so bile prvotno določene koordinate točk (18 točk iz leta 1968, 34 točk iz obdobja 1968–1992 in 29 točk, določenih po letu 1995). Rezultati so prikazani v ustreznih stolpcih preglednice 1. Izkaže se, da so najmanjši pomiki prisotni na točkah poligonske mreže iz leta 1968. To potrjuje kakovost prve izmere mreže Sarajeva in njeno ujemanje s transformacijo FGU. Mestna mreža iz leta 1968 je bila namreč navezana na točke trigonometrične mreže in izračunana s skupno izravnavo, model transformacije pa temelji prav na tej trigonometrični mreži. Rezultati so občutno slabši, če v transformacijo vključimo točke iz obdobja po letu 1968. Največji pomiki so prisotni na točkah, ki so določene po letu 1995. *RMSE* točk, določenih po letu 1995, je v povprečju dvakrat večji glede na točke iz leta 1968, medtem ko je največje odstopanje skoraj trikrat večje. Na skoraj

četrtini točk, določenih po letu 1995, so pomiki večji od 10 centimetrov, na 14 % točk pa so izrazito veliki (več kot 20 centimetrov). Ker so bile te točke pogosto uporabljene za detajlno topografsko in katastrsko izmero, bodo po transformaciji pomiki izmerjenih detajlnih točk (mejniki, vogali stavb idr.) veliki.

### 3.2 Analiza rezultatov transformacije glede na različne transformacijske modele

Model transformacije FGU temelji na približno 1300 trigonometričnih točkah, enakomerno razporejenih po ozemlju Federacije BIH. To pomeni približno eno vezno točko na 20 km<sup>2</sup>. Ali lahko s povečanjem gostote veznih točk zagotovimo boljše rezultate transformacije? Da bi odgovorili na to vprašanje, smo zbrali podatke za večje število trigonometričnih, poligonskih in fotogrametričnih veznih točk, na katerih so bile v preteklih petnajstih letih v okviru različnih projektov izvedene satelitske meritve, za vse te točke so bile tudi določene koordinate ETRS89. Za območje kantona Sarajevo je bilo za izračun transformacijskega modela uporabljenih 120 točk z znanimi koordinatami v referenčnih sistemih BHDKS in ETRS89. Povprečna gostota je tako ena vezna točka na 10 km<sup>2</sup>, torej dvakrat večja glede na model FGU.

Preglednica 2: Pregled statistike pomikov za k. o. Sarajevo II za različne postopke transformacije.

Kazalnik	Helmert			Afina			Projektivna			Polinom 2. stopnje			
	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	
<b>Minimum [m]</b>	-0,054	-0,107	0,020	-0,038	-0,111	0,016	-0,079	-0,069	0,009	-0,098	-0,080	0,004	
<b>Sredina [m]</b>	0,074	0,006	0,091	0,089	0,002	0,103	0,048	0,045	0,081	0,029	0,035	0,066	
<b>Maksimum [m]</b>	0,198	0,184	0,271	0,213	0,180	0,279	0,173	0,222	0,281	0,153	0,213	0,263	
<b>Razpon [m]</b>	0,252	0,291	0,251	0,251	0,291	0,263	0,252	0,291	0,272	0,252	0,294	0,258	
<b>RMSE [m]</b>	0,087	0,051	0,101	0,101	0,051	0,113	0,067	0,068	0,095	0,055	0,062	0,082	
Porazdelitev pomikov %	0–5 cm	22,5	77,5	13,8	17,5	76,3	10,0	50,0	60,0	26,3	68,8	66,3	46,3
	5–10 cm	53,8	16,3	57,5	48,8	17,5	45,0	37,5	27,5	46,3	22,5	23,8	32,5
	10–15 cm	17,5	3,8	20,0	23,8	3,8	33,8	10,0	7,5	20,0	7,5	5,0	16,3
	15–20 cm	6,3	2,5	3,8	7,5	2,5	5,0	2,5	2,5	2,5	1,3	2,5	2,5
	20–25 cm	0,0	0,0	3,8	2,5	0,0	5,0	0,0	2,5	3,8	0,0	2,5	1,3
	> 25 cm	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,3	68,8	66,3	46,3

Kazalnik	Polinom 3. stopnje			Polinom 4. stopnje			Trougaona			Mreža			
	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	
<b>Minimum [m]</b>	-0,119	-0,065	0,009	-0,081	-0,070	0,007	-0,098	-0,067	0,005	-0,084	-0,085	0,005	
<b>Sredina [m]</b>	0,007	0,051	0,070	0,048	0,039	0,079	-0,002	0,038	0,066	0,039	0,029	0,068	
<b>Maksimum [m]</b>	0,132	0,228	0,264	0,168	0,216	0,274	0,152	0,203	0,253	0,167	0,206	0,265	
<b>Razpon [m]</b>	0,251	0,293	0,255	0,250	0,286	0,267	0,249	0,270	0,248	0,251	0,291	0,259	
<b>RMSE [m]</b>	0,047	0,071	0,086	0,067	0,064	0,093	0,051	0,059	0,078	0,061	0,058	0,084	
Porazdelitev pomikov %	0–5 cm	80,0	60,0	50,0	48,8	62,5	27,5	72,5	65,0	36,3	60,0	68,8	42,5
	5–10 cm	12,5	27,5	28,8	38,8	28,8	47,5	21,3	28,8	52,5	30,0	25,0	38,8
	10–15 cm	7,5	7,5	16,3	10,0	3,8	17,5	5,0	3,8	6,3	7,5	3,8	12,5
	15–20 cm	0,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,3	1,3	2,5	2,5	1,3	3,8
	20–25 cm	0,0	2,5	1,3	0,0	2,5	3,8	0,0	1,3	1,3	0,0	1,3	1,3
	> 25 cm	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,3



Učinki uporabe različnih transformacijskih modelov na obravnavanem vzorcu z 80 kontrolnimi poligonskimi točkami iz k. o. Sarajevo II so prikazani v preglednici 2. Vse prej prikazano velja tudi tu. Po transformaciji z veznimi točkami, ki niso na območju k. o. Sarajevo II, ostaja prisotna nehomogenost pomikov transformiranih poligonskih točk. Pri tem je mogoče opaziti območja z večjimi in območja z manjšimi pomiki. To velja tako za metodo transformacije, kjer je uporabljeni grid pomikov en kilometer, kot tudi za lokalno afino trikotniško transformacijo. Med globalnimi modeli deformacij so najboljši rezultati doseženi z uporabo polinoma 2. in 3. stopnje, vendar so tudi v tem primeru največji položajni pomiki ostali veliki. Očitno je, da z globalnimi transformacijami, izvedenimi z omejenim številom veznih točk, na območju transformacije ni mogoče pravilno modelirati in odpraviti neuniformiranih in neenakomerno razporejenih lokalnih položajnih pogreškov. Večje število transformacijskih parametrov v transformacijskih modelih zato ne pomeni boljšega prilagajanja transformacije in učinkovitejšega upoštevanja lokalne sistematičnosti, kot je ugotovljeno v teoriji. V našem primeru se je tako 12-parametrična polinomska transformacija 2. stopnje izkazala bolje kot polinomska transformacija 3. in 4. stopnje (20 in 30 parametrov). Tudi 4-parametrična Helmertova transformacija je dala nekoliko boljše rezultate kot 6-parametrična afina transformacija. Ugotovimo lahko, da z uporabo dvakrat večje gostote veznih točk in različnih modelov transformacij rezultatov glede na metodo FGU ni mogoče izboljšati.

### 3.3 Transformacije na podlagi veznih poligonskih točk k. o. Sarajevo II

Predhodne analize kažejo, da ob gostoti ena vezna točka na 20 km<sup>2</sup> ali ena vezna točka na 10 km<sup>2</sup> ne moremo zagotoviti zahtev za uspešno transformacijo katastrskih podatkov med različnimi referenčnimi sistemi. Gostoto veznih točk smo zato še povečali, tako da njihova gostota na območju transformacije znaša ena točka na 10 hektarjev. Izmed vseh 80 točk smo izbrali 15 poligonskih točk, enakomerno razporejenih po območju k. o. Sarajevo II. Preostalih 65 poligonskih točk smo obravnavali kot kontrolne točke za oceno kakovosti transformacij.

Izbranih 15 poligonskih točk smo dodali v mrežo, ki se uporablja v okviru transformacijskega modela FGU. Tako je bila pridobljena podlaga za nove transformacijske modele, kar ob uporabi Helmertove, afine, projektivne in polinomske transformacije 2. stopnje pomeni tudi določitev grida pomikov 1000 metrov, 750 metrov, 500 metrov, 250 metrov in 100 metrov, določitev grida pomikov z metodo splošne aritmetične sredine, določitev uteži pomikov glede na oddaljenost  $d$  ( $1/d$  in  $1/d^2$ ) ter interpolacijo v okviru grida pomikov s postopkom bilinearne interpolacije.

Helmertov globalni model transformacije z upoštevanjem grida pomikov je dal v primerjavi z drugimi uporabljenimi modeli najboljše rezultate. Vpliv tega modela na koordinate 65 kontrolnih poligonskih točk na območju k. o. Sarajevo II je prikazan v preglednicah 3 (uteži  $1/d$ ) in 4 (uteži  $1/d^2$ ).

Razčistimo najprej, kateri izraz za izračun uteži naj uporabimo. Primerjava rezultatov v preglednicah 3 in 4 pokaže, da so za grida pomikov 1000 metrov in 750 metrov rezultati transformacij pri obeh načinih izračuna uteži tako rekoč enaki. Pri gridu pomikov 500 metrov je mogoče prepoznati izboljšanje statističnih kazalnikov, ko je utež obratnosorazmerna kvadratu oddaljenosti od točke grida  $1/d^2$ . Z nadaljnjim zmanjševanjem oddaljenosti točk grida je upravičenost uporabe tega izraza za izračun uteži še večja. To še posebej velja za transformacijo z uporabo grida pomikov 250 metrov, kjer je vrednost *RMSE* manjša za 30 %, največja položajna odstopanja pa so dvakrat manjša, kot če bi uteži definirali kot obratne vred-

nosti oddaljenosti od točk grida  $1/d$  (preglednica 3). Če uporabimo grid pomikov 100 metrov, razlike v rezultatih transformacij niso tako velike, je pa mogoče tudi tu opaziti boljše statistične kazalnike. Pri transformaciji z gridom pomikov bomo torej uteži definirali z izrazom  $1/d^2$ .

Preglednica 3: Pregled statistike odstopanj za k. o. Sarajevo II s transformacijo z gridom pomikov (uteži  $1/d$ ).

Kazalnik	1000 m			750 m			500 m			250 m			100 m			
	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	
Minimum [m]	-0,075	-0,032	0,010	-0,106	-0,063	0,004	-0,104	-0,059	0,005	-0,094	-0,068	0,003	-0,101	-0,066	0,003	
Sredina [m]	0,037	0,045	0,073	0,020	0,020	0,055	0,024	0,023	0,057	0,017	0,015	0,049	0,015	0,012	0,047	
Maksimum [m]	0,177	0,215	0,279	0,143	0,182	0,231	0,158	0,194	0,251	0,126	0,141	0,188	0,126	0,142	0,188	
Razpon [m]	0,252	0,247	0,269	0,249	0,245	0,227	0,262	0,253	0,246	0,221	0,209	0,185	0,227	0,208	0,185	
RMSE [m]	0,061	0,064	0,089	0,050	0,047	0,069	0,053	0,049	0,072	0,047	0,038	0,060	0,045	0,036	0,058	
Porazdelitev pomikov %	0–5 cm	63,1	60,0	44,6	78,5	81,5	60,0	75,4	83,1	58,5	78,5	86,2	66,2	80,0	89,2	67,7
	5–10 cm	24,6	29,2	30,8	12,3	13,8	30,8	15,4	10,8	27,7	16,9	12,3	24,6	13,8	9,2	26,2
	10–15 cm	10,8	6,2	18,5	9,2	3,1	4,6	7,7	4,6	9,2	4,6	1,5	7,7	6,2	1,5	4,6
	15–20 cm	1,5	3,1	1,5	0,0	1,5	3,1	1,5	1,5	3,1	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	1,5
	20–25 cm	0,0	1,5	3,1	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	> 25 cm	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

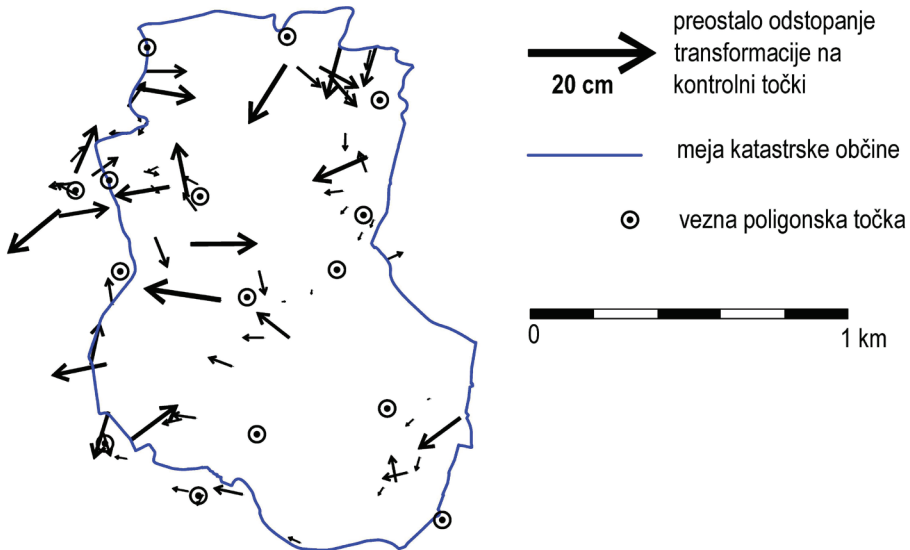
Preglednica 4: Pregled statistike odstopanj za k. o. Sarajevo II s transformacijo z gridom pomikov (uteži  $1/d^2$ ).

Kazalnik	1000 m			750 m			500 m			250 m			100 m			
	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	$d_y$	$d_x$	$d_{yx}$	
Minimum [m]	-0,075	-0,032	0,010	-0,119	-0,069	0,001	-0,117	-0,074	0,001	-0,104	-0,082	0,003	-0,106	-0,088	0,003	
Sredina [m]	0,038	0,045	0,073	0,020	0,017	0,052	0,010	0,017	0,050	0,007	0,005	0,046	0,007	0,004	0,046	
Maksimum [m]	0,177	0,215	0,279	0,148	0,175	0,229	0,122	0,154	0,197	0,120	0,092	0,121	0,119	0,108	0,120	
Razpon [m]	0,253	0,247	0,269	0,267	0,244	0,228	0,239	0,228	0,196	0,224	0,174	0,118	0,225	0,196	0,117	
RMSE [m]	0,062	0,064	0,089	0,051	0,042	0,066	0,046	0,042	0,062	0,043	0,034	0,055	0,042	0,036	0,055	
Porazdelitev pomikov %	0–5 cm	63,1	60,0	44,6	76,9	86,2	67,7	78,5	83,1	66,2	78,5	86,2	66,2	80,0	84,6	63,1
	5–10 cm	24,6	29,2	30,8	12,3	9,2	16,9	13,8	13,8	23,1	18,5	13,8	27,7	16,9	13,8	30,8
	10–15 cm	10,8	6,2	18,5	10,8	3,1	13,8	7,7	1,5	9,2	3,1	0,0	6,2	3,1	1,5	6,2
	15–20 cm	1,5	3,1	1,5	0,0	1,5	0,0	0,0	1,5	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	20–25 cm	0,0	1,5	3,1	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	> 25 cm	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

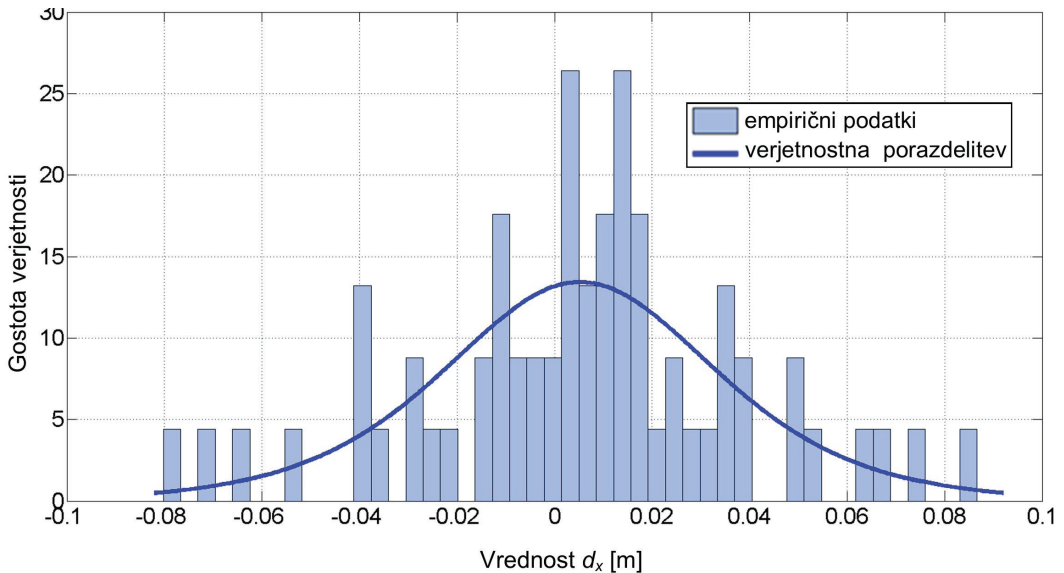
Iz preglednic 3 in 4 je razvidno, da uporaba grida pomikov ločljivosti en kilometer daje tako rekoč iste rezultate kot transformacija z modelom FGU (primerjajte s podatki v preglednici 1). Zmanjšanje velikosti grida vodi do povečanja kakovosti transformacije, kar še posebej velja za model, kjer se uteži računajo kot obratne vrednosti kvadratov razdalj. Zaradi nepravilne razporeditve geometričnih deformacij po območju obravnavane katastrske občine dajejo izračunane komponente vektorjev pomikov pri gridu visoke ločljivosti veliko podrobnejšo oceno lokalnih sistematičnih pogreškov koordinat. S povečanjem rastra se zmanjša kakovost transformacije, saj to povzroči prerazporeditev oziroma generalizacijo deformacij in izgubo informacije o lokalnih pomikih. Iz preglednice 4 je razvidno, da je pri transformaciji z upoštevanjem grida pomikov 100 metrov največji pomik 12 centimetrov. To je več kot dvakrat boljši rezultat v primerjavi s transformacijo FGU, pri tem pa je vrednost  $RMSE_{yx}$  izboljšana za skoraj 40 %. Vrednosti

sredin za koordinatne komponente odstopanj po osi  $y$  in  $x$  so tako rekoč enake nič. Čeprav sistematični pogreški niso povsem odpravljeni, se je razpon pomikov zmanjšal za več kot dvakrat.

Dosežene trende izboljšanja podatkov s transformacijskimi modeli, določenimi na podlagi identičnih poligonskih točk na območju obravnavane katastrske občine, prikažemo še grafično. S primerjavo vektorjev pomikov, prikazanih na slikah 4 in 2, ter s primerjavo obeh histogramov s krivuljo verjetnostne porazdelitve na slikah 3 in 5 potrjujemo zgoraj zapisane ugotovitve.

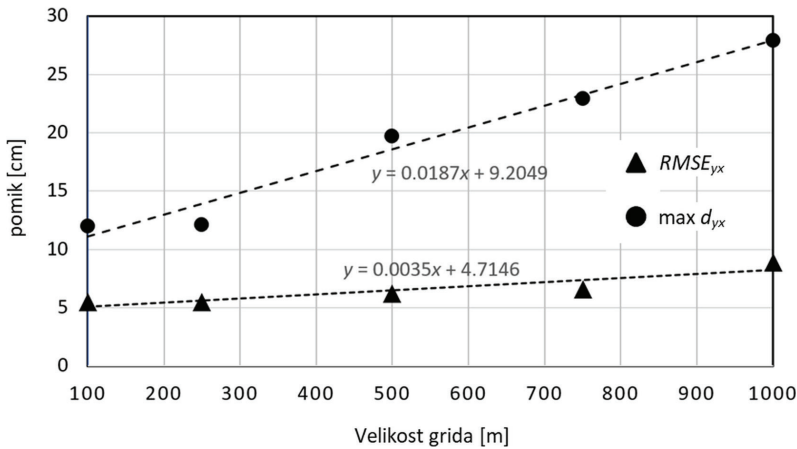


Slika 4: Pomiki poligonskih točk na območju k. o. Sarajevo II, transformacija z gridom pomikov (uteži  $1/d^2$ ).



Slika 5: Histogram in krivulja verjetnostne porazdelitve razlik teoretičnih in transformiranih  $x$ -koordinat točk, transformacija z gridom pomikov (uteži  $1/d^2$ ).

Slika 6 prikazuje vrednosti  $RMSE_{yx}$  in vrednosti največjih položajnih odstopanj  $\max d_{yx}$  v odvisnosti od velikosti grida pomikov, dodan je trend (linearna regresija).  $RMSE_{yx}$  je pri gridu pomikov 100 metrov le še 62 % vrednosti  $RMSE_{yx}$  grida pomikov 1000 metrov. Povečanje natančnosti transformacije je očitno. Največji pomiki  $\max d_{yx}$  so pri gridu pomikov 100 metrov 3,3-krat manjši.



Slika 6: Trend gibanja in prikaz največjih pomikov kontrolnih točk v odvisnosti od izbrane gostote točk grida (uteži  $1/d^2$ ).

Z večjo gostoto veznih točk zagotovimo natančnejše in bolj homogene rezultate transformacije. Natančnost geometrijskih podatkov katastrske občine bo zato pri gostejšem gridu pomikov boljša. Izbira večjega števila identičnih točk je torej smiselna. Dosežene vrednosti parametrov kakovosti transformacij so značilne in jih lahko pričakujemo tudi v katastrskih občinah na drugih mestnih območjih. Uporaba transformacijskega modela, ki vključuje poligonske točke v okviru katastrske občine, ki so predmet transformacije, daje občutno boljše rezultate v primerjavi z modelom FGU, ki temelji na uporabi grida pomikov, definiranega na podlagi trigonometričnih točk.

#### 4 ZAKLJUČEK

Analiza transformacije kontrolnih poligonskih točk obravnavane katastrske občine Sarajevo po modelu FGU, ki temelji na točkah trigonometrične mreže (ena vezna tačka na  $20 \text{ km}^2$ ), kaže, da so v razlikah med teoretičnimi in transformiranimi koordinatami prisotne napake kot posledica slabe natančnosti koordinat poligonskih točk v sistemu BHDKS. Največja odstopanja so prisotna na točkah, določenih po letu 1968. To še posebej velja za točke poligonske mreže, ki so bile vzpostavljene po letu 1995. Napake v poligonskih mrežah se prenašajo na koordinate transformiranih točk, saj jih ni mogoče zajeti in odstraniti z drugimi postopki transformacije ali s povečanjem gostote veznih točk. S takšno izbiro vrste in gostote veznih točk je mogoče pričakovati ugodne rezultate transformacije le za tiste geometrijske podatke katastrske občine (katastrskega načrta), ki so nastali v prvi izmeri pred letom 1968 (arhivski izvornik katastrskega načrta). S takšno transformacijo vseh katastrskih podatkov v nov referenčni sistem ne bo odpravljena težava notranje nehomogene natančnosti geometrijskih podatkov. Čeprav so koordinate detajlnih točk v splošnem določene s precej nižjo točnostjo kot točke geodetske mreže, odstopanja koordinat poligonskih točk (tudi do 30 centimetrov) kažejo, da pri transformaciji detajlnih točk ni dovoljeno zanemariti he-

terogene natančnosti točk izmeritvene geodetske mreže. Notranja natančnost koordinat detaljnih točk izmere območja Sarajeva s klasično ortogonalno izmero, na fotogrametrični način in kasneje v okviru dopolnilne sodobne tahimetrične izmere in izmere RTK GNSS, močno presega navedeno nehomogeno natančnost koordinat točk poligonske mreže.

Izvedena raziskava na izbranem območju k. o. Sarajevo II potrjuje, da je notranjo nehomogeno natančnost geometrijskih podatkov mogoče izboljšati z interpolacijskim modelom transformacije z gridom pomikov, v katerega so kot vezne točke vključene tudi poligonske točke s povprečno gostoto ena točka na 10 hektarjev. S takšnim pristopom in z uporabo transformacije z gridom pomikov ločljivosti 100 metrov je bila dosežena horizontalna natančnost transformiranih točk 5,5 centimetra. Le 6 % točk je obremenjenih z odstopanji, večjimi od 10 centimetrov (največje odstopanje znaša 12 centimetrov). Glede na to, da je bila izmera te katastrske občine izvedena v merilu 1 : 1000, so dobljeni rezultati povsem zadovoljivi. Kakovost transformacije je očitno odvisna od števila, razporeditve in gostote veznih točk na nekem območju, kakor tudi od uporabe ustreznega postopka modeliranja spremenljivih geometrijskih pomikov.

Članek potrjuje, da je treba pri datumskih transformacijah na podlagi grida pomikov zagotoviti zadostno število kontrolnih točk, ki omogočajo določitev dejanske natančnosti transformacijskega modela. Če so razlike med danimi in transformiranimi koordinatami večje, je treba transformacijski model dopolniti z dodajanjem novih točk.

**Literatura in viri:**

Ampatzidis, D., Demirtzoglou, N. (2017). The evaluation of the transformation model of the 3-D information between HTRS07 (Hellenic Terrestrial Reference System 2007) and HGRS87 (Hellenic Geodetic Reference System 1987) at the area of Drama. *Acta Montanistica Slovaca*, 22 (2), 172–179.

Ampatzidis, D., Melachroinos, S. A. (2017). The connection of an old geodetic datum with a new one using Least Squares Collocation: The Greek case. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 47 (1), 39–51. <https://doi.org/10.1515/congeo-2017-0003>

Ansari, K., Gyawali, P., Pradhan, P. M., Park, K. (2019). Coordinate transformation parameters in Nepal by using neural network and SVD methods. *Journal of Geodetic Science*, 9 (1), 22–28. DOI: <https://doi.org/10.1515/jogs-2019-0003>

Bašić, T. (2009). Jedinstveni transformacijski model i novi model geoida Republike Hrvatske. V M. Bosiljevac (ur.), *Izviješća o znanstveno-stručnim projektima 2006.–2008.* (str. 5–21). Zagreb: Državna geodetska uprava.

Bašić, T., Šljivarčić, M., Buble, G. (2006). Jedinstveni transformacijski model HTRS96/ HDKS. V M. Bosiljevac (ur.), *Izviješća o znanstveno-stručnim projektima 2004./2005. godine* (str. 121–135). Zagreb: Državna geodetska uprava.

Berk, S., Duhovnik, M. (2007). Transformacija podatkov Geodetske uprave Republike Slovenije v novi državni koordinatni sistem. *Geodetski vestnik*, 51 (4), 803–826.

Berk, S., Komadina, Ž. (2013). Local to ETRS89 datum transformation for Slovenia: triangle-based transformation using virtual tie points. *Survey Review*, 45 (328), 25–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1752270611Y.0000000020>

Božinov, V., Matović, A., Ognjanović, K. (2011). Transformacija GK7 u ETRF2000 i određivanje transformacionog modela. *Geodetska služba*, 114, 5–11.

Collier, P. (2002). Development Of Australia's National GDA94 Transformation Grids. Consultant's Report to the Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping. Melbourne: Department of Geomatics, The University of Melbourne.

Dewhurst, W. T. (1990). The application of minimum-curvature-derived surfaces in the transformation of positional data from the North American Datum of 1927 to the North American Datum of 1983. Rockville, MD: NOAA Technical Memorandum NOS NGS 50.

Elsambaky, H. T., Kaloop, M. R., Hu, J. W. (2018). A novel three-direction datum transformation of geodetic coordinates for Egypt using artificial neural network approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 110. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3441-6>

Even-Tzur, G. (2020). Coordinate transformation with variable number of parameters. *Survey Review*, 52 (370), 62–68. DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1517477>

Federalna uprava za geodetske i imovinsko pravne poslove – FGU (2015a). Plan rada za 2016. godinu. <http://fgu.com.ba/files/Novosti/2016/PDF/bs/Plan%20rada%20za%202016.%20godinu.pdf>, pridobljeno 3. 9. 2020.

Federalna uprava za geodetske i imovinsko pravne poslove – FGU (2015b). Tenderska dokumentacija za nabavku usluga određivanja parametara transformacije koordinata iz koordinatnog sistema ETRS89 u državni koordinatni sistem. Sarajevo: FGU.

Federalna uprava za geodetske i imovinsko pravne poslove – FGU (2019). Pravilnik o osnovnim geodetskim radovima. Sarajevo: FGU.

Femić, P. (2013). Montepos i jedinstveni model horizontalne transformacije. V T. Bašić in M. Marjanović (ur.), *Zbornik radova 3. CROPOS konferencije* (str. 63–63). Opatija: Državna geodetska uprava, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu in Hrvatska komora ovlaštenih inženjera geodezije.

- González-Matesanz, J., Dalda, A., Malpica, J. A. (2006). A range of ED50-ETRS89 datum transformation models tested on the Spanish geodetic network. *Survey Review*, 38 (302), 654–667. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.2006.38.302.654>
- Grgić, M., Varga, M., Bašić, T. (2016). Empirical research of interpolation methods in distortion modeling for the coordinate transformation between local and global geodetic datums. *Journal of Surveying Engineering*, 142 (2), 05015004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000154)
- Kashani, I. (2006) Application of Generalized approach to Datum Transformation between Local Classical and Satellite-based Geodetic Networks, *Survey Review*, 38 (299), 412–422. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.2006.38.299.412>
- Magna Júnior, J. P., Camargo, P. O., Galo, M. (2014). Coordinate transformation with distortion modeling between SAD69 and SIRGAS2000 by using Thin-Plate Splines. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 20 (1), 19–38. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702014000100002>
- Mulahusić, A., Topoljak, J., Tuno, N. (2017). Geodezija za građevinske inženjere. Univerzitet u Zenici: Zenica.
- Odalović, O., Todorović Drakul, M., Grekulović, S., Popović, J., Joksimović, D. (2018). Chronology of the development of geodetic reference networks in Serbia. *Survey Review*, 50 (359), 163–173, DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1249998>
- Soycan, M., Soycan, A., Tunalioglu, N. (2017). Transformacija deformiranih geodetskih mrež u nove referenčne koordinatne sisteme: studija primera transformacije ED50-ITRFXX u Turčiji. *Geodetski vestnik*, 61 (1), 58–75. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2017.01.58-75>
- Soycan, M. (2005). Polynomial versus similarity transformations between GPS and Turkish reference systems. *Survey Review*, 38 (295), 58–69. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.2005.38.295.58>
- Tabučić, D. (2013): FBIHPOS mreža permanentnih GNSS stanica i status njene primjene. V T. Bašić in M. Marjanović (ur.), *Zbornik radova 3. CROPOS konferencije* (str. 64–69). Opatija: Državna geodetska uprava, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu in Hrvatska komora ovlaštenih inženjera geodezije.
- Tabučić, D. (2019). Podaci i usluge Federalne uprave, pregled i trenutni status. [https://www.gdhh.ba/component/phocadownload/category/5-4\\_kongres.html?download=235:iii-podaci-i-usluge-fgu-pregled-i-trenutni-status,pridobljeno.3.9.2020](https://www.gdhh.ba/component/phocadownload/category/5-4_kongres.html?download=235:iii-podaci-i-usluge-fgu-pregled-i-trenutni-status,pridobljeno.3.9.2020)
- Tierra, A., Dalazoana, R., De Freitas, S. (2008). Using an artificial neural network to improve the transformation of coordinates between classical geodetic reference frames. *Computers & Geosciences*, 34 (3), 181–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.03.011>
- Tuno, N., Mulahusić, A., Kogoj, D. (2015). Vrednotenje modelov transformacije geodetskih načrtov. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 736–751. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.736-751>
- Tuno, N., Mulahusić, A., Kogoj, D. (2017). Improving the Positional Accuracy of Digital Cadastral Maps through Optimal Geometric Transformation. *Journal of Surveying Engineering*, 143 (3), 1–12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000217](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000217)
- Tuno, N., Mulahusić, A., Topoljak, J., Kogoj, D. (2017). Vrednotenje postopkov za ocenjevanje točnosti georeferenciranja geodetskih načrtov. *Geodetski vestnik*, 61 (3), 373–386. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2017.03.373-386>
- Varga, M., Grgić, M., Bašić, T. (2017). Empirical comparison of the Geodetic Coordinate Transformation Models: a case study of Croatia, *Survey Review*, 49 (352), 15–27. DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2015.1104092>
- Wu, C. H., Chou, H. J., Su, W. H. (2007). A genetic approach for coordinate transformation test of GPS positioning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4 (2), 297–301. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.894164>
- Yun, H.S., Song, D.S., Cho, J.M. (2006) Horizontal datum transformation by distortion modelling in Korea. *Survey Review*, 38 (301), 554–562. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.2006.38.301.554>
- Ziggah, Y. Y., Yakubu, I., Laari, P. B., Hui, Z. (2018). 2D Cadastral Coordinate Transformation Using Extreme Learning Machine Technique. *Geodesy and Cartography*, 67 (2), 321–343. DOI: <https://doi.org/10.24425/118706>
- Zimić, Š., Đonlagić, E. (2017). Uvođenje novih geodetskih referentnih sistema u Bosni i Hercegovini. *Geodetski glasnik*, 48, 154–164.



Tuno N., Mulahusić A., Savšek S., Kogoj D. (2021). Testiranje in izboljšava horizontalne datumske transformacije: študija primera v Bosni i Hercegovini. *Geodetski vestnik*, 65 (1), 13–26.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.01.13-26>

**izr. prof. dr. Nedim Tuno, univ. dipl. inž. geod.**

Univerza v Sarajevu, Građevinski fakultet  
Patriotske lige 30, BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina  
e-naslov: [nedim\\_tuno@gf.unsa.ba](mailto:nedim_tuno@gf.unsa.ba)

**izr. prof. dr. Admir Mulahusić, univ. dipl. inž. geod.**

Univerza v Sarajevu, Građevinski fakultet  
Patriotske lige 30, BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina  
e-naslov: [admir\\_mulahusic@gf.unsa.ba](mailto:admir_mulahusic@gf.unsa.ba)

**doc. dr. Simona Savšek, univ. dipl. inž. geod.**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana  
e-naslov: [simona.savsek@fgg.uni-lj.si](mailto:simona.savsek@fgg.uni-lj.si)

**izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana  
e-naslov: [dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si](mailto:dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si)