

MODERNI GEODETSKI KOORDINATNI SISTEMI IN ASTROGEODETSKA MREŽA SLOVENIJE

doc. dr. Bojan Stopar *, dr. Miran Kuhar *

Izvleček

V prispevku predstavljamo nekaj dejstev o astrogeodetski mreži Slovenije. Zaradi zgodovinskih razlogov je astrogeodetska mreža obremenjena s številnimi napakami in deformacijami. Kot taka težko izpolnjuje današnje zahteve, ki niso povezane samo s potrebami državne kartografije in evidentiranja zemljiškopolastniških stanj, ampak vključujejo tudi spremljanje geodinamičnih dogajanj na zemeljskem površju. Klasični geodetski koordinatni sistemi so bili vzpostavljeni pod predpostavko optimalnega ujemanja geoida z obliko referenčnega elipsoida na nekem zaključenem območju, položaj točke je bil ločen na horizontalni položaj in višino. Sodobni geodetski koordinatni sistemi pa so globalni in trirazsežni. Rezultati transformacij med astrogeodetsko mrežo in globalnim koordinatnim sistemom ETRS89 omogočajo ocenjevanje nepravilnosti obstoječega koordinatnega sistema. Eden od pogojev za nemoteno uporabo modernih koordinatnih sistemov pa je tudi natančno poznavanje oblike ploskve geoida.

KLJUČNE BESEDE:
referenčni sistem,
referenčni sestav,
astrogeodetska mreža,
geoid, transformacija

Abstract

The paper presents the condition of the astrogeodetic network of Slovenia. The inherent errors and distortions in the astrogeodetic network make it unsuitable for today's requirements which not only include national mapping and cadastral purposes, but also scientific and safety purposes such as earthquake prediction, crustal dynamics and land subsidence. It is obvious that such control network must be realized in terms of a stable and consistent coordinate frame which is of a global nature. The results of different transformation procedures between the astrogeodetic network and global coordinate system (ETRS89) shows all the drawbacks of existing coordinate frame. In order to implement such a modern threedimensional coordinate system country should have all reference system (height and horizontal position) well defined and up-to-date. One of the prerequisites for that is also an accurate geoid - the reference surface for height determination.

KEY WORDS:
reference frame,
reference system,
astrogeodetic network,
geoid, transformation

1. KOORDINATNI SISTEMI IN KOORDINATNI SESTAVI

Naloga referenčnega sestava (ang.: reference frame) je materializacija referenčnega sistema (ang.: reference system). Šele materializiran referenčni sistem lahko uporabimo za opis položajev ter njihovih sprememb glede na Zemljo (terestrični sestavi) ali nebesna telesa, vključno z Zemljo v vesolju (nebesni sestavi).

V geodeziji in astronomiji potrebujemo samo dva tipa koordinatnih sistemov. Prvi je »Dogovorjeni inercialni sistem« - CIS (ang.: Conventional Inertial System), ki je na »dogovorjeni« način »pritrjen« na oddaljene izvore radijskih valovanj - kvazarje. CIS služi kot osnova za obravnavo gibanja drugega sistema »Dogovorjenega terrestričnega sistema« - CTS (ang.: Conventional Terrestrial System). CTS se premika skupaj z Zemljo in je na »dogovorjeni« način pritrjen na določeno število observatorijev na zemeljski površini. Omenjena osnovna sistema je definirala služba IERS (ang.: International Earth Rotation Service) z imenoma:

- mednarodni nebesni referenčni sistem ICRS (ang.: International Celestial Reference System),
- mednarodni terrestrični (zemeljski) referenčni sistem ITRS (ang.: International Terrestrial Reference System).

V okviru 23. generalne skupščine IAU (ang.: International Astronomical Union) avgusta 1997 je le-ta odločila, da postane s 1. januarjem 1998 njen uradni nebesni referenčni sistem ICRS, ki nadomesti t.i. FK5 (nem.: Fundametel Katalog 5). Izhodišče ICRS je v težišču sončnega sistema, osi koordinatnega sistema so »pritrajene« glede na oddaljene kvazarje z natančnostjo, višjo od 0,02 mas (ang.: miliard of second - tisočinka kotne sekunde). ICRS je materializiran s položaji 608 kvazarjev, ocenjenimi na osnovi opazovanj med leti 1979 in 1995 in ga imenujemo Mednarodni nebesni referenčni sestav - ICRF (ang.: International Celestial Reference Frame).

Izhodišče ITRS je v težišču telesa Zemlje, ki vključuje oceane in Zemljino atmosfero. ITRS je materializiran z ocenjenimi položaji (in hitrostmi sprememb le-teh) izbranih IERS geodetskih observatorijev, ki se imenujejo Mednarodni terrestrični referenčni sestav - ITRF (ang.: International Terrestrial Reference Frame). Množica točk, ki definirajo ITRF, se povečuje, tako da se pojavljajo nove različice ITRF. Le-te izhajajo v obliki ITRF_{yy}, kjer je s končnico 'yy' podano leto »izdaje« različice sestava ITRF. Tako ITRF97 predstavlja koordinatni sestav, vzpostavljen leta 1997. V ta sestav so vključene točke s položaji in pripadajočimi hitrostmi sprememb le-teh, ki so bili določeni v okviru IERS do vključno leta 1996.

2. EVROPSKI TERESTRIČNI REFERENČNI KOORDINATNI SISTEM ETRS89

Na zasedanju generalne skupščine v Vancouvru leta 1987 je IAG (ang.: International Association of Geodesy) ustanovila podkomisijo »EUREF« (ang.: European Reference Frame) komisije X »Kontinentalne mreže« (ang.: IAG Commission X on Continental Networks). Z ustanovitvijo je podkomisija EUREF prevzela naloge takrat ukinjene podkomisije RETRIG (fr.: Réseaux Européens de la Triangulation). Končni rezultat delovanja podkomisije RETRIG je bila kombinirana izravnava podatkov terestričnih opazovanj v okviru triangulacijskih mrež I. reda in opazovanj, pridobljenih s pomočjo metod satelitske geodezije na področju Zahodne Evrope. Rezultati te izravnave nosijo skupno ime ED87 (ang. European Datum 1987).

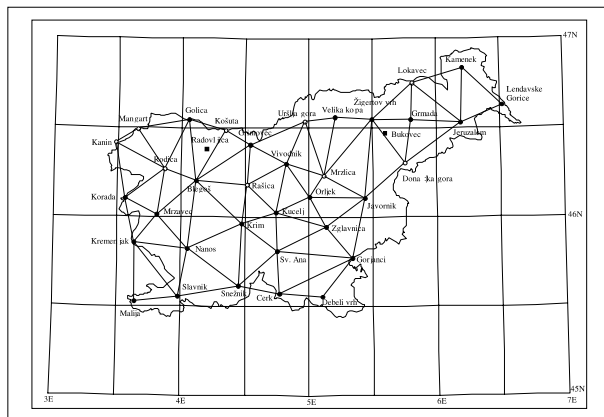
Glavni namen vzpostavitve EUREF-a je bila vzpostavitev najnatančnejše trirazsežne geodetske mreže, ki bo predstavljala osnovo za praktično realizacijo novega terestričnega koordinatnega sistema za območje Evrope, ob celoviti izrabi možnosti, ki jih ponujajo tehnike satelitske geodezije. Izvedba te naloge je bila mogoča ob predhodno definiranem in dostopnem koordinatnem sistemu ITRS. V tistem času je bilo število geodetskih točk, ki so bile vključene v ITRS, na območju Evrope dovolj veliko, da je bilo mogoče zagotoviti kvalitetno povezavo novega koordinatnega sistema z obstoječim ITRS koordinatnim sistemom. Ker koordinatni sistem za območje Evrope definirajo točke na evrazijski litosferski plošči, se položaji teh točk skupaj in enakomerno spreminjajo. Koordinatni sistem, ki ga je sprejel EUREF, je ETRS89 (ang.: European Terrestrial Reference System 89), ki je sovpadal s koordinatnim sistemom ITRS ob začetku leta 1989 in je bil pritrjen na stabilni del evrazijske litosferske plošče.

13

3. ASTROGEODETSKA MREŽA SLOVENIJE

Klasični geodetski koordinatni sistemi so bili lokalni koordinatni sistemi. Ti koordinatni sistemi predstavljajo koordinatno osnovo nekega dela zemeljske površine, najpogosteje ozemlja države ali skupine držav. Vzpostavljeni so bili ob predpostavki zadovoljive skladnosti zemeljskega površja oziroma ploskve geoida s površjem izbranega referenčnega elipsoida. Referenčni elipsoid je imel vlogo matematične referenčne ploskve, na katero so se nanašali vsi postopki obdelave - redukcije opazovanj in pridobljeni položaji točk astrogeodetske mreže.

Slika 1: Astrogeodetska mreža Slovenije



Astrogeodetska mreža Slovenije je po svoji obliki klasična trigonometrična mreža. Zaradi zahtev klasične terestrične geodezije se trigonometrične točke nahajajo na izpostavljenih mestih, kot so vrhovi gora in vrhovi višjih ali nižjih hribov in gričev. Točke so praviloma stabilizirane z betonskimi stebri. Astrogeodetsko mrežo Slovenije sestavlja 34 trigonometričnih točk I. reda. Za potrebe tega prispevka pa smo predpostavili, da spada v astrogeodetsko mrežo Slovenije tudi trigonometrična točka I. reda 375 Gorjanci. Tako v prispevku obravnavamo mrežo 35 točk, ki skupaj tvorijo 46 trikotnikov. Mreža pokriva ozemlje velikosti pribl. 230 x 140 km. Astrogeodetsko mrežo Slovenije prikazujemo na sliki 1.

Zaradi zgodovinskih razlogov je položaj astrogeodetske mreže Slovenije na Besselovem referenčnem elipsoidu napačen, v mreži so prisotne velike lokalne deformacije merila, natančnost mreže je dokaj nehomogena. Po letu 1974 so se začele aktivnosti za izboljšanje stanja v astrogeodetski mreži Slovenije. Poudarek je bil dan predvsem izmeri dolžin med točkami mreže, določitvi ortometričnih višin točk ter ocenjevanju lokalnih deformacij merila mreže (Jenko, 1986).

4. GEOID V SLOVENIJI

Raziskave težnostnega polja Zemlje, gravimetrična izmera in izračun geoida so od nastanka Jugoslavije spadali v področje dela vojaške geodetske službe. Vsa dela je izvajal Vojaški geografski inštitut (VGI) iz Beograda; raziskave in rezultati tovrstnih del niso bili dostopni javnosti. To posebej velja za meritve in raziskave, opravljene po drugi svetovni vojni. Slovenskim geodetom je tako ostala možnost raziskav na področju razvoja geodetskih mrež, kartografije, katastra in drugih dejavnosti znotraj geodetske službe.

Prve meritve na področju Slovenije za potrebe določitve ploskve geoida so bile opravljene še v času avstroogrške monarhije. V času pred prvo svetovno vojno je bil na meridianu Ljubljane izmerjen geoidni profil. To je bila prva tovrstna meritev v tedanji monarhiji.

Po drugi svetovni vojni je prva objavljena publikacija s področja geofizikalnih raziskav težnostnega polja Zemlje za območje nekdanje Jugoslavije doktorska disertacija profesorja Gradbene fakultete v Sarajevu A. Muminagića, takratnega oficirja na VGI-ju.

V svojih raziskavah se je profesor Muminagić ukvarjal predvsem s problemom orientacije jugoslovanske trigonometrične mreže. S svojimi raziskavami na področju orientacije mreže je hkrati izračunal tudi prvi relativni geoid za območje nekdanje Jugoslavije. Za izračun geoida je uporabil podatke astronomskih meritev na 170 točkah.

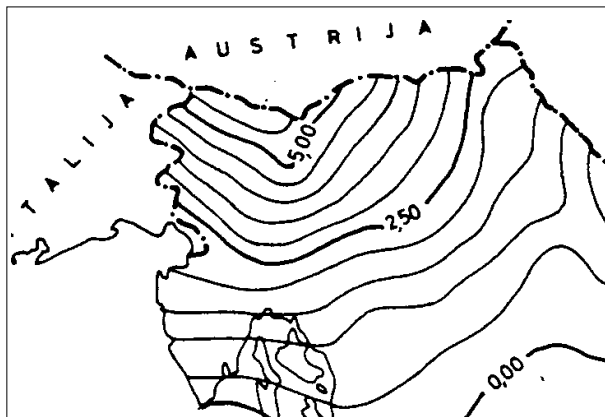
Geoidne višinske razlike med točkama je izračunal po Ölanderjevi enačbi (Muminagić, 1974):

$$\Delta N_{12} = -0,90 \left[\frac{\xi_1'' + \xi_2''}{2} \Delta\phi'' + \frac{\eta_1'' + \eta_2''}{2} \Delta\lambda'' \cos \phi_1 \right] \text{cm.} \quad (2)$$

Skupaj je bilo izračunanih 360 višinskih razlik. Vse višinske razlike, vključene v mrežo, so bile izravnane s pogojno izravnavo. Pred izravnavo višinskih razlik je bila opravljena kontrola z izračunom odstopanj v zaključenih geometrijskih figurah. Po odstranitvi grobih pogreškov se je izkazalo, da so največja nesoglasja nastala zaradi neprimerno izbranih astronomskih točk. Določena opazovanja so bila namreč opravljena na pobočjih ali ob vznožju velikih planin in gora (Velebit, Korab, itd.), kar je imelo za posledico velike lokalne odklone navpičnice.

V izravnavi so vse višinske geoidne razlike dobile popravke. Za začetno točko izračuna geoidnih višin je bila izbrana izhodiščna točka nekdanje jugoslovanske trigonometrične mreže. Privzeta vrednost geoidne ondulacije v tej točki je znašala $N_0=0$ m. Na ta način je bil geoid orientiran po višini. Za interpolacijo in grafični prikaz poteka ploskve geoida je izbrana ekvidistanca 0,5 m (slika 2).

Slika 2: Geoid prof.
Muminagića na
območju Slovenije



Profesorja K. Čolić, T. Bašić in sodelavci Geodetske fakultete iz Zagreba so leta 1992 izračunali geoid, ki zajema območje Slovenije in del Hrvaške (Čolić in dr., 1992). Za izračun astrogeodetskega geoida GF iz Zagreba je uporabljenih skupaj 117 točk z izračunanimi (izmerjenimi) komponentami odklona navpičnice. Astronomska opazovanja so izvedena z modificiranim in razširjenim Zeiss NI-2 astrolabom. Zunanja natančnost določitve astronomskih koordinat (odklonov navpičnice) znaša: za komponento x v smeri sever-jug $\sigma_{\phi}=0,4''$ in za komponento h v smeri vzhod-zahod $\sigma_{\lambda}=0,5''$. To uvršča opravljena astronomsko opazovanja med najnatančnejša opazovanja te vrste. Astronomske koordinate so določene z metodo enakih višin. Opazovanja so bila zaradi zmanjšanja sistematičnega pogreška atmosferske refrakcije opravljena v najmanj dveh nočeh. V eni noči so bila opravljena opazovanja praviloma ene skupine zvezd (25-30 ustrezno izbranih zvezd) na enem stojšču. Med točkami I. reda nista bili opazovani samo trigonometrični točki I. reda na Kaninu in Mangrtu.

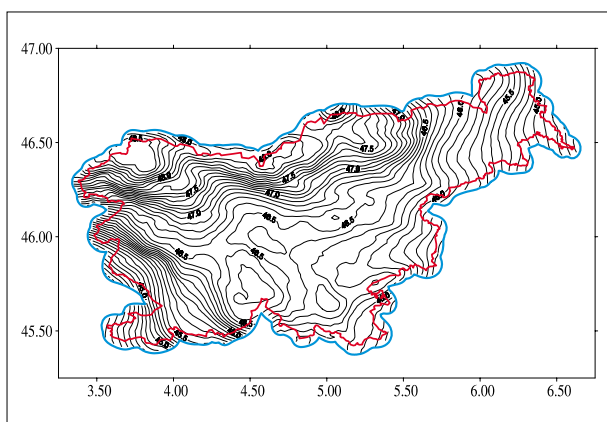
Geoid je izračunan z metodo "remove-restore" z uporabo kolokacije po metodi najmanjših kvadratov. V izračun je vključenih skupaj 117 točk z izmerjenimi komponentami odklona navpičnice, od skupnega števila točk se na ozemlju Slovenije nahaja samo 32 točk.

Izračun je opravljen v treh korakih:

- iz merjenih komponent odklona navpičnice je odstranjen vpliv topografskih mas, upoštevajoč teorijo izostazije (odstranjevanje topoizostatskega vpliva);
- z reduciranimi količinami oz. odstopanji so izračunane geoidne višine s pomočjo kolokacije po metodi najmanjših kvadratov;
- povrnjen je odstranjeni topoizostatski vpliv v merjenih in računskih (prediciranih) točkah.

Zanimivo je, da navkljub ustaljeni praksi v postopku kolokacije iz merjenih podatkov ni odstranjen globalni trend. Pri poskusu redukcije merjenih podatkov z globalnim geopotencialnim modelom OSU91A se je izkazalo, da so odstopanja prevelika in se preveč razlikujejo od merjenih vrednosti. Vzrok za to je lahko dvojen: naša astrogeodetska mreža je lokalno orientirana (prisotni so zamiki, ki imajo korenine še iz časa povezave naše mreže z avstroogrsko); v izračun globalnega geopotencialnega modela niso vključeni podatki iz obravnavanega območja.

Leta 2000 je v okviru doktorske disertacije Boško Pribičević z Geodetske fakultete v Zagrebu izračunal novi geoid na območju Slovenije (Pribičević, 2000). Pri tem je uporabil večje število astrogeodetskih meritev in upošteval spremenljivo gostoto Zemljine skorje na osnovi izdelanega digitalnega modela gostote. V izračun je bilo vključenih 98 točk z izmerjenimi komponentami odklona navpičnice. Največje število točk se nahaja na ozemlju Slovenije, vendar so upoštevane tudi točke z mejnih območij Avstrije, Madžarske in Hrvaške. Na ozemlju Slovenije je bilo v izračun privzetih 50 točk. V končni rešitvi je bilo vključenih še približno tri tisoč vrednosti točkastih anomalij težnosti. Geoid je izračunan z metodo "remove-restore" z uporabo kolokacije po metodi najmanjših kvadratov.



Slika 3: Ploskev geoida na območju Slovenije (Pribičević, 2000)

Tokrat je za odstranitev dolgovalovnega vpliva težnostnega polja Zemlje (korak "remove") uporabljen globalni geopotencialni model EGM96. To je prvi tovrstni geopotencialni model, ki je določen tudi s podatki z ozemlja Slovenije. Poleg tega so bili uporabljeni še:

- digitalni model reliefa za izračun vpliva topografskih mas na merjene količine, in sicer fini model DMR v rastru 11,25"x18,75" in grobi model DMR v rastru 90"x150" (1,5'x2,5'),

- podatki o gostoti površinskih topografskih mas v obliki digitalnega modela gostote (DMG). V skladu z izdelanimi DMR-ji sta tudi modela gostote dva: fini model DMG v rastru 11,25"x18,75" in grobi model DMG v rastru 90"x150" (1,5' x2,5').

Rezultat kolokacije po metodi najmanjših kvadratov so izračunane (predicirane) geoidne višine v pravilni mreži točk (grid) z ločljivostjo 1,0'x1,5'. Geoidne višine so podane glede na globalni geocentrični elipsoid GRS-80. Absolutna orientacija geoida je opravljena na osnovi geoidnih višin, ki so izračunane iz razlik elipsoidnih višin (določenih s pomočjo GPS) in ortometričnih višin, določenih s preciznim nivelmanom. Skupaj je bilo uporabljenih več kot sto točk z znanimi geoidnimi višinami.

Natančnost izračunanih geoidnih višin je povprečno 3 cm, vendar je ta na območjih, kjer je večje število točk z znanimi geoidnimi višinami (GPS/nivelman), večja. Geoid je predstavljen na sliki 3.

5. SLOVENIJA IN EUREF

Novi referenčni koordinatni sistemi, ki nadomeščajo obstoječe državne astrogeodetske mreže, morajo biti vzpostavljeni v skladu z zahtevami in potrebami moderne geodezije. Med temi zahtevami je posebno pomembna povezanost državnih koordinatnih sistemov preko državnih meja. Tako povezavo omogočajo globalni koordinatni sistemi kot npr.: ITRS ali ETRS. Za vzpostavitev povezave med državnim in globalnim koordinatnim sistemom je potrebno pridobiti položaje istih točk v obeh sistemih. Danes za te naloge uporabljamo izključno GPS tehnologijo.

Tako je bil v Sloveniji leta 1994 v okviru izmere EUREF CRO-SLOV '94 določen položaj 8 točk v ETRS89 koordinatnem sistemu. Od teh točk je bilo 5 "pravih" EUREF točk (Malija, Korada, Kucelj, Velika kopa, Lendavske gorice), preostale 3 pa niso dobile statusa uradnih EUREF točk. Rezultati so bili objavljeni leta 1995 (Altiner in dr., 1998).

Namen druge EUREF izmere leta 1995, z imenom SLOVENIA '95, je bila zgostitev EUREF mreže točk na območju Slovenije. Slovenija se nahaja na tektonsko in seizmično aktivnem področju Evrope. Želja GURS-a je bila vzpostavitev modernega koordinatnega sistema na območju stika Alp z jadransko litosfersko ploščo. EUREF izmera leta 1995 je bila izvedena na vseh 34 (35) točkah astrogeodetske mreže, na 2 točkah triangulacijskih baznih mrež (Bukovec in Radovljica), na eni trigonometrični točki II. reda in na 12 na novo

vzpostavljenih geodinamičnih točkah. Končni rezultat te izmere so položaji točk v ITRF93 (1995.7) in ETRS89 (1989.0) koordinatnih sestavih oz. sistemih.

V letu 1996 je bilo v okviru geodinamičnega projekta CROREF-CRODYN '96, v katerem je bilo opazovanih skupaj 68 točk, ponovno opazovanih tudi 5 EUREF točk v Sloveniji in 10 na Hrvaškem. Namen te izmere ni bil samo vzpostavitev dovolj goste geodinamične mreže vzdolž jadranske obale, ampak tudi razširitev EUREF referenčnega sestava na kontinentalni del Hrvaške.

Rezultat omenjenih izmer so objavljeni položaji točk na našem in sosednjih ozemljih v ETRS89 koordinatnem sistemu (Altiner in dr., 1998). Ti položaji pa niso bili tudi uradno verificirani s strani delovne skupine EUREF (EUREF Working Group). Opravljajo se aktivnosti, ki naj bi nejasnosti ter nastale razlike med posameznimi rezultati odstranile.

6. TRANSFORMACIJE KOORDINATNIH SISTEMOV

Postopek transformacije predstavlja transformacijo koordinat točk. Če sprejmemo, da koordinate točk predstavljajo koordinatni sistem, na katerega se nanašajo, lahko govorimo o transformaciji koordinatnih sistemov. S pojavom in praktično dostopnostjo visokonatančnih terestričnih koordinatnih sistemov (GPS) so postali postopki transformacij med koordinatnimi sistemi v vsakdanji geodetski praksi zelo pogosta naloga.

Obstaja veliko možnih transformacij med koordinatnimi sistemi. Izbiro postopka transformacije običajno narekujejo zahtevane lastnosti transformiranih koordinat.

Najpogosteje uporabljena transformacija je podobnostna transformacija, pri kateri je sprememba merila enaka v vseh smereh. Ta transformacija ohranja obliko, spremenijo pa se razdalje med točkami in položaji točk v mreži. Ortogonalna transformacija je transformacija, pri kateri se merilo ne spremeni. Ta transformacija ohranja razdalje med točkami in obliko, spremenijo pa se položaji točk v mreži.

6.1 Podobnostna transformacija

Podobnostna transformacija je najpogosteje uporabljena transformacija v geodeziji. V trirazsežnem prostoru je ta transformacija definirana na osnovi

sedmih transformacijskih parametrov, v dvorazsežnem prostoru pa na osnovi štirih transformacijskih parametrov. Koordinatna sistema se torej razlikujeta po položaju, orientaciji in enoti merila. Smiselnost uporabe podobnostne transformacije je v dejstvu, da sta dva koordinatna sistema, ki sta praktično realizirana z različnimi merskima tehnikami, različna po položaju in orientaciji ter različnega merila. Merilo v podobnostni transformaciji obravnavamo kot konstantno v celotnem koordinatnem sistemu, kar je lahko prevelika poenostavitev. V primerih, ko se izkaže, da ta poenostavitev ne ustreza potrebam, lahko merilo obravnavamo kot funkcijo položaja, kar nam omogočajo drugačni postopki transformacije.

Naj bosta $S=\{0, b_1, b_2, b_3\}$ in $S'=\{0, b_1', b_2', b_3'\}$ pravokotna koordinatna sistema in naj bodo $\mathbf{x}=(x_1, x_2, x_3)$ in $\mathbf{x}'=(x_1', x_2', x_3')$ pravokotne koordinate točke v koordinatnem sistemu S oziroma S' .

V splošnem lahko podobnostno transformacijo med koordinatnima sistemoma zapišemo kot:

$$\mathbf{x}' = m\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t}', \quad (2)$$

kjer je \mathbf{R} ortogonalna rotacijska matrika, za katero velja $\mathbf{R}\mathbf{R}^T = \mathbf{I}$, $m=(1+dm)$ je faktor merila, $\mathbf{t}'=(t_1', t_2', t_3')$ so koordinate izhodišča koordinatnega sistema S v koordinatnem sistemu S' . Vsako ortogonalno matriko \mathbf{R} lahko podamo s tremi parametri, kjer lahko te parametre izberemo na več načinov. V geodeziji kot omenjene tri parametre običajno uporabljamo Eulerjeve ali Cardanijeve kote. Omejimo se na uporabo Cardanijevih kotov, s katerimi lahko ortogonalno rotacijsko matriko zapišemo v obliki:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_3(\gamma)\mathbf{R}_2(\beta)\mathbf{R}_1(\alpha), \quad (3)$$

kjer so:

$$\mathbf{R}_3(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, \mathbf{R}_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ortogonalna rotacijska matrika \mathbf{R} je predstavljena s tremi zaporednimi zasuki okrog osi b_3 , b_2 in b_1 . Splošna oblika Cardanijeve ortogonalne rotacijske matrike je:

$$R = R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\gamma - \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ -\cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma \\ \sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Če imamo na razpolago $\mathbf{x}=(x_{1,i}, x_{2,i}, x_{3,i}), i=1, \dots, n; n>3$ koordinate točk v koordinatnem sistemu $\{0, b_1, b_2, b_3\}$ in $\mathbf{x}'=(x_{1,i'}, x_{2,i'}, x_{3,i'}), i=1, \dots, n$ koordinate istih točk v koordinatnem sistemu $\{0, b_1', b_2', b_3'\}$, lahko določimo sedem transformacijskih parametrov $(\mathbf{t}', \alpha, \beta, \gamma, dm)$ na osnovi sedmih koordinat najmanj treh točk, danih v obeh sistemih. Če je število skupnih koordinat, danih v obeh sistemih, večje od 7, pridobimo vnaprej določen sistem linearnih enačb (1), katerega rešitev (oceno vrednosti transformacijskih parametrov) pridobimo s postopkom izravnave transformacije.

Transformacija, zapisana v obliki (2), kjer je $m=1$, je ortogonalna transformacija. Kot smo omenili, jo uporabljamo, ko sprejmemo enakost enote merila v obeh koordinatnih sistemih. V takih primerih povezuje oba koordinatna sistema samo 6 transformacijskih parametrov $(\mathbf{t}', \alpha, \beta, \gamma)$.

7. ASTROGEODETSKA MREŽA SLOVENIJE IN ETRS89 KOORDINATNI SISTEM

Astrogeodetska mreža Slovenije je klasična triangulacijska mreža. V klasični triangulacijski mreži so koti določeni z mnogo višjo natančnostjo kot dolžine. To ima za posledico velike lokalne deformacije merila. Dosedanje raziskave stanja v astrogeodetski mreži Slovenije so to dejstvo potrdile (Jenko, 1986).

Kot smo že omenili, smo v okviru EUREF izmer na področju Slovenije pridobili položaje vseh trigonometričnih točk I. reda v ETRS89 koordinatnem sistemu. Niso pa bile vse točke opazovane centrično. Na nekaterih točkah so bila opazovana bočna zavarovanja, nekatere točke so bile predstavljene tik pred EUREF izmero, druge so bile stabilizirane kot novo ekscentrično stojšče.

Tako imamo trenutno na razpolago 27 trigonometričnih točk I. reda s položaji, dani v ETRS89 in državnem koordinatnem sistemu, kar omogoča primerjavo obeh koordinatnih sistemov. Te točke so na sliki 1 označene z obarvanimi krogi in kvadrati.

Najbolj enostavna izvedba transformacije v trirazsežnem prostoru je mogoča s pravokotnimi koordinatami točk, ki jih pridobimo z:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h)\cos\varphi\cos\lambda \\ (N+h)\cos\varphi\sin\lambda \\ [(1-e^2)N+h]\sin\varphi \end{bmatrix}, \text{ kjer je } N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} \text{ in } e^2 = 2f - f^2 \quad (6)$$

Uradni parametri Besselovega referenčnega elipsoida so $a=677397,155\text{m}$ in $1/f=299,1528128533$. Elipsoidna višina h posamezne točke je izračunana na osnovi zveze $h=H+N$, kjer je H ortometrična višina in N geoidna višina, izračunana na osnovi aktualnega modela astrogeodetskega geoida (Čolić in dr., 1992).

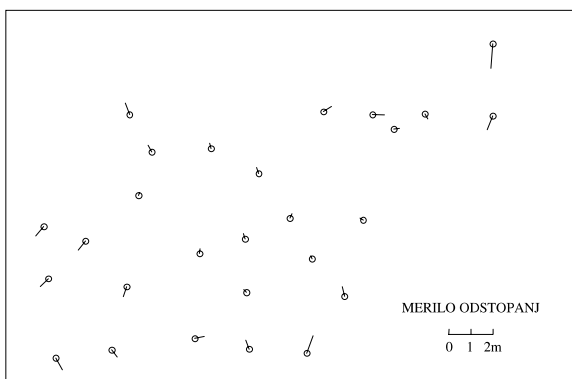
7.1 Transformacija med astrogeodetsko mrežo in koordinatnim sistemom ETRS89

Za potrebe ocenjevanja astrogeodetske mreže Slovenije smo izvedli 7-parametrično podobnostno in 6-parametrično ortogonalno transformacijo med položaji točk v astrogeodetski mreži in položaji točk v ETRS89 koordinatnem sistemu. S tema transformacijama smo lahko ocenili nekaj osnovnih značilnosti astrogeodetske mreže Slovenije. Pri tem predpostavljamo, da so položaji, pridobljeni v okviru EUREF izmer, bistveno boljše kvalitete kot v astrogeodetski mreži Slovenije, zato lahko v nadaljevanju prikazane transformacije med tema sistemoma razumemo tudi kot vrednotenje določenih kategorij kvalitete astrogeodetske mreže Slovenije v absolutnem smislu.

Kot smo omenili, je najobičajnejša transformacija koordinatnih sistemov v geodeziji 7-parametrična transformacija. V veliko primerih se izkaže kot idealno orodje, v drugih pa lahko zabriše določena dejstva o koordinatnih sistemih, predvsem o posameznih (nehomogenih) delih koordinatnih sistemov. Če uporabimo 7-parametrično transformacijo za veliko območje (mrežo), lahko izgubimo del informacije o lokalnih spremembah merila in orientacije posameznih delov območja (mreže). Običajno so lokalne spremembe merila in orientacije posledica neustrezno reduciranih opazovanj na računsko referenčno ploskev. V tej zvezi najpogosteje nista upoštevana vpliv odklona navpičnice na opazovane količine, kot tudi vpliv geoidne višine na redukcijo opazovanih količin na površino referenčnega elipsoida. Pri tem pa moramo vedeti, da so prvi praktično uporabni modeli astrogeodetskega geoida tudi edini modeli geoida, ki jih imamo trenutno na razpolago.

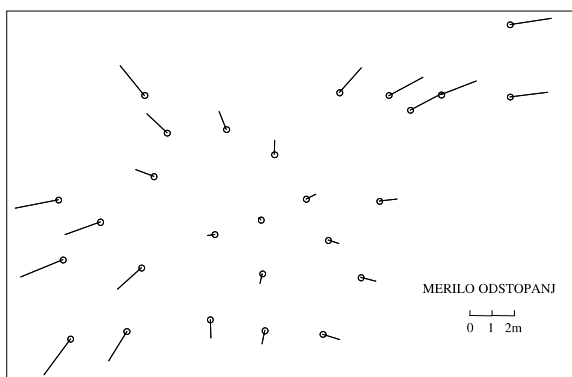
Kljub omenjenim dejstvom pa 7-parametrična transformacija omogoča pridobitev splošnega vtisa o kvaliteti relativnih položajev posameznih sosednjih točk in predstavlja izhodišče za detajlno in podrobno obravnavo obstoječe astrogeodetske mreže.

S 7-parametrično podobnostno transformacijo vseh 27 točk astrogeodetske mreže so pridobljena odstopanja na točkah mreže, ki po velikosti dosegajo vrednosti 1 m. Zanimivo je, da se največja odstopanja transformiranih koordinat točk pojavljajo na ravninskih in nižinskih delih države (na SV in JZ). Odstopanja po 7-parametrični transformaciji podajamo na sliki 4.



Slika 4: Odstopanja v astrogeodetski mreži Slovenije po 7-parametrični podobnostni transformaciji

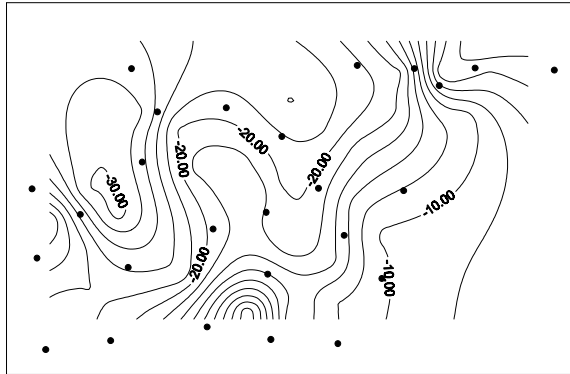
S 6-parametrično ortogonalno transformacijo smo primerjali koordinatna sistema s predpostavko enakosti merila v obeh sistemih. Zaradi že omenjenih razlogov je ta postopek transformacije manj običajen. Odstopanja na skupnih točkah znašajo po 6-parametrični transformaciji do 2 m. Odstopanja so usmerjena radialno navzven od težiščne točke mreže in se povečujejo z oddaljevanjem točke od težiščne točke. Če pogledamo odstopanja po transformaciji na točkah na vzhodu in zahodu Slovenije, vidimo, da so le-ta nasprotnega predznaka, kar tudi pomeni, da je razdalja med točkami na vzhodu in zahodu države približno 4 m krajša od prave razdalje. Lahko pa tudi trdimo, da ta odstopanja pomenijo, da je Slovenija v smeri V-Z za 4 m in v smeri S-J za 2 m daljša kot znaša dolžina, določena na osnovi uradno veljavnih položajev točk astrogeodetske mreže Slovenije. To tudi pomeni, da je površina slovenskega državnega ozemlja vsaj za 0,5 km² (50 ha) večja od uradno določene površine. Odstopanja po 6-parametrični transformaciji podajamo na sliki 5.



Slika 5: Odstopanja v astrogeodetski mreži Slovenije po 6-parametrični ortogonalni transformaciji

Na koncu smo želeli oceniti še merilo (enoto dolžin) v astrogeodetski mreži Slovenije. Za to smo sestavili 37 trikotnikov, ki povezujejo 27 točk v mreži. V vsakem posameznem trikotniku smo merilo ocenili s 7-parametrično transformacijo. Na ta način pridobljena deformacija merila znaša v posameznih trikotnikih od -0,02 mm/km do -30,85 mm/km. Interpolirane vrednosti merila v astrogeodetski mreži podajamo na sliki 6.

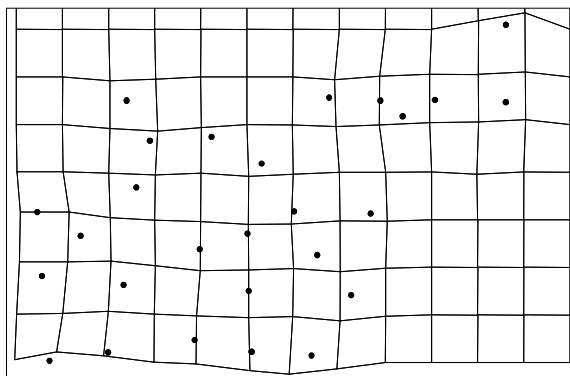
Slika 6: Interpolirane vrednosti deformacije merila v astrogeodetski mreži Slovenije v mm/km



Jasno je, da obstaja veliko drugih postopkov transformacije, kot so npr.: afina, projektivna, polinomska, itd., ki jih lahko dodatno modificiramo z dodajanjem parametrov, s katerimi lahko opišemo sistematične vplive na položaje točk v mreži. S takšnimi transformacijami bi bilo mogoče izvesti zelo detajlno analizo stanja v astrogeodetski mreži, ki pa je lahko zaradi številnih transformacijskih parametrov tudi dokaj težavna. Težavna je lahko tudi geometrijska interpretacija posameznih transformacijskih parametrov.

Za zaključek smo izvedli še transformacijo med astrogeodetsko mrežo Slovenije in ETRS89 koordinatnim sistemom s pomočjo kolokacije po metodi najmanjših kvadratov. Rezultat kolokacije so modelirane vrednosti odstopanj od pravilne mreže (signala) v poljubni točki na območju mreže.

Slika 7: Nehomogenost astrogeodetske mreže Slovenije, ocenjena z metodo kolokacije



Na sliki 7 podajamo grafično predstavitev distorzij pravilne mreže, velikosti 20 x 20 km, izračunane na osnovi odstopanj po 7-parametrični transformaciji na 27 točkah astrogeodetske mreže.

8. ZAKLJUČEK

Položaj astrogeodetske mreže Slovenije na referenčnem elipsoidu je zaradi zgodovinskih razlogov napačen, mreža ima velike deformacije merila in ni homogena natančnosti. Zato ne ustreza sodobnim potrebam različnih področij geodezije in kartografije, kot tudi ne potrebam evidentiranja zemljiško lastniških stanj. Hkrati je to dvodimenzionalna mreža, kjer tretjo komponento položaja - višino lahko pridobimo samo na osnovi geometričnega nivelmana, kar zahteva vzdrževanje popolnoma ločene višinske mreže.

Danes, ko je uporaba GPS tehnologije vsakdanja praksa, je pomembno, da je državni koordinatni sistem časovno stabilen in združljiv z globalnimi referenčnimi sistemi. Vzpostavitev geografskih informacijskih sistemov in digitalnih kartografskih baz zahteva kvalitetne države, v določenih primerih tudi mednarodne referenčne sisteme. V številnih nalogah, predvsem s področja navigacije, je potrebno enotno obravnavati kopenska področja kot tudi področja morij in oceanov.

Za vzpostavitev sodobnih koordinatnih sistemov se danes uporablja skoraj izključno GPS tehnologija. Ti koordinatni sistemi pokrivajo velika območja; zaradi natančnosti in nizke cene teh opazovanj lahko koordinate točk določamo z visoko natančnostjo in mnogo pogosteje kot v časih klasične geodezije. Sodobna GPS tehnologija omogoča določanje koordinat točk tudi z natančnostjo 0,01 ppm. Takšno natančnost pa lahko dosežemo samo s primerno izbiro referenčnega sestava. Izbrani sestav mora biti vzdrževan ter mora omogočati skladno in dosledno obdelavo rezultatov GPS izmere danes in v prihodnosti.

Če želimo izkoristiti visoko natančnost elipsoidnih GPS višin in te uporabljati v praksi, moramo imeti na voljo natančne modele geoida. Geoid centimetrskje natančnosti omogoča uporabo GPS višinomerstva za učinkovito določanje višin na številnih področjih geodezije.

Slovenijo torej čaka odločitve o uvedbi novega, sodobnega koordinatnega sistema, ki bo uporaben ne samo za potrebe geodezije in kartografije, temveč tudi v drugih geo-znanostih in strokah. Nov sistem mora biti uporaben povsod, kjer se izkaže potreba po določitvi položaja točke v tri- oz. celo štirirazsežnem prostoru.

Literatura

- Altiner Y., Čolić K., Gojčeta B., Habrich H., Lipej B., Neumaier P., Marjanović M., Medić Z., Mišković D., Pribičević B., Rašić L., Seeger H., Seliškar A. and Tavčar D.,** Results of a Recomputation of the EUREF GPS Campaigns in Croatia and Slovenia. Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Bad Neuenahr-Ahrweiler, 10-13 junij 1998, eds. Gubler E. and Hornik H., zbornik del, [Verlag des BGK], 1998, str. 79-89
- Čolić K., Bašić T., Petrović T. Pribičević B., Ratkajec M., Sünkel H., Kühtreiber N.** New geoid solution for Slovenia and a part of Croatia. IAG First continental workshop on the geoid in Europe, 11.-14. maj 1992, Praga, zbornik del [Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography], 1992. str. 158-165
- Muminagić A.,** Ispitivanje realnog geoida u Jugoslaviji. Geodetski list, Zagreb, 1974, št. 1, str. 6-12
- Pribičević B.,** Uporaba geološko-geofizičnih in geodetskih baz podatkov za računanje ploskve geoida Republike Slovenije. Doktorska disertacija, Ljubljana, FGG OG, 2000
I.E.R.S. domača stran: <http://hpiers.obspm.fr/>
- Jenko M.,** Works on the Astrogeodetic Network in the Years 1975-1982, Inštitut GZ SRS, Ljubljana, 1986
- Mišković D., Altiner Y.,** National Report of Slovenia - Attempt to Establish New Reference Coordinate System in the Republic of Slovenia, Proceedings of the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Sofija, 4-7 junij 1997, eds. Gubler E. and Hornik H., zbornik del [Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften], 1997, str. 202-209
- Mišković D.,** National Report of the Republic of Slovenia. Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Ankara, 22-25 maj, 1996, eds. Gubler E. and Hornik H., zbornik del [Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften], 1996, str. 296-298
- Stopar B. in Kuhar M.,** Astrogeodska mreža Slovenije in geoid. Geodetski vestnik, Ljubljana, 1997, letnik 41, št. 2, str. 101-111

Recenzija: Redakcijski odbor simpozija ISPRS v Ljubljani

Avtorski prevod: dr. Miran Kuhar in dr. Bojan Stopar

Prispelo v objavo: 2001-01-26

Opomba: Članek je napisan tudi v angleščini in je objavljen pri vsebini številke 1-2/2001 na spletni strani Geodetskega vestnika (www.geodetski-vestnik.com)!

Important note for English language readers: The article, written entirely in English language, is available on the website of Geodetski vestnik (www.geodetski-vestnik.com) inside the contents of the issue 1-2/2001!