

ANALIZA GLOBALNIH NNR KINEMATIČKIH MODELA GIBANJA TEK- TONSKIH PLOČA NA PODRUČJU RE- PUBLIKE HRVATSKE I SUSJEDNIH ZEMALJA

Analysis of global NNR tectonic plate kinematic models over the territory of Republic of Croatia and neighboring countries

SAŽETAK:

Za potrebe vremenske transformacije koordinata nužno je poznavati brzine gibanja točaka na fizičkoj površini Zemlje. Brzinu bilo koje točke na površini Zemlje moguće je izračunati ukoliko su nam poznate koordinate iste i parametri Eulerova pola pripadajuće tektonske ploče koji definiraju kinematički model. U ovom su radu uzeti svi globalni kinematički modeli Euroazijske tektonske ploče definirani u odnosu na NNR okvir, odnosno njihove komponente Eulerova pola i na temelju njih izračunate su brzine gibanja 81 točke na teritoriju Republike Hrvatske i susjednih zemalja. Izračunate brzine su uspoređene s referentnim podacima, odnosno brzinama tih istih točaka dobivenih na temelju kombiniranog rješenja 17 geodina-mičkih mjernih kampanja provedenih na teritoriju Republike Hrvatske u razdoblju od 20 godina i umreženog rješenja CROPOS-a i pozicijskih sustava susjednih zemalja za razdoblje od 4.87 godina. Nakon provedene usporedbe izračunati su statistički pokazatelji za svaki od korištenih modela na temelju kojih je ocijenjena pouzdanost primjenjivosti tih modela za računanje brzina diskretnih točaka na teritoriju Republike Hrvatske i susjednih zemalja.

KLJUČNE RIJEČI: BRZINE TOČAKA, EULEROV POL, KINEMATIČKI MODEL, NNR OKVIR, REFERENTNI PODACI, USPOREDBA, STATISTIČKI POKAZATELJI, POUZDANOST.

SUMMARY:

For the purpose of temporal coordinate transformation station velocities on the Earth's surface are needed. The velocity of every single point on the Earth's surface can be calculated if its coordinates and the Euler pole parameters of the belonging tectonic plate which define the kinematic model are known. This paper takes into consideration all global kinematic models of Eurasia defined with respect to the NNR frame, precisely its Euler pole components, in order to calculate velocities of 81 points located over the territory of Republic of Croatia and neighboring countries. Calculated velocities were compared with reference data, that is with velocities of same points obtained from combined solution of 17 GPS measuring campaigns over the territory of Croatia in the period of 20 years and networked solution of CROPOS and positioning systems of neighboring countries in the period of 4.87 years. After comparison, statistical indicators for each NNR kinematic model were calculated in order to assess the reliability of each model for computation of velocities of discrete points over the territory of Croatia and neighboring countries.

KEYWORDS: STATION VELOCITIES, EULER POLE, KINEMATIC MODEL, NNR FRAME, REFERENCE DATA, COMPARISON, STATISTICAL INDICATORS, RELIABILITY.

1. Uvod

Otkako znamo za Zemlju kao jedan od planeta Sunčeva sustava, na njezinoj se površini, kao i u njezinoj unutrašnjosti neprestano događaju brojne promjene i gibanja. Tijekom povijesti, Zemlju su istraživali mnogi znanstvenici i pritom otkrivali različite procese na i unutar Zemlje. Ti su procesi danas globalno prihvaćeni, a jedan od takvih, proces gibanja tektonskih ploča, upravo je i temelj ovog rada.

Dobro je poznato da su nekada svi kontinenti bili spojeni u jedan superkontinent koji se s vremenom razdvajao i formirali su se kontinenti s položajem kakav je danas. Iako razlog tome isprva nije bio dobro poznat, s vremenom je dokazano da je uzročnica tog procesa razlomljenost Zemljine kore (kao dijela litosfere) na tektonske (litosferne) ploče. Litosfera je kruti sloj Zemlje koji pluta po tekućem sloju u unutrašnjosti – astenosferi [Frisch i dr., 2011]. Razlomljena litosfera, odnosno tektonske ploče, neprestano se kreću te za posljednju imaju promjenu položaja diskretnih točaka na fizičkoj površini Zemlje. Iz toga proizlazi da svaka točka ima svoju brzinu, čiji se iznos može odrediti obradom diskretnih mjerenja (npr. GNSS mjerenja) ili izračunati primjenom nekog kinematičkog modela.

Na temelju geodinamičkih i/ili geokinematičkih istraživanja znanstvenici u svojim publikacijama predstavljaju kinematičke modele gibanja tektonskih ploča, definiranim numeričkim vrijednostima komponenti Eulerova pola. Komponente Eulerova pola polazni su elementi za određivanje brzina točaka na površini Zemlje ukoliko su nam poznate koordinate točke za koju želimo odrediti brzinu [Hamblin i Christiansen, 2009]. Kao posljedica korištenja različitih podataka i uključivanja različitog broja tektonskih ploča u računanje modela pojedinog autora, proizlaze različite numeričke vrijednosti komponenta Eulerova pola za svaki model. Kako je cilj ovog rada bio ispitati pouzdanost primjenjivosti različitih kinematičkih modela na teritoriju Republike Hrvatske, potrebne su bile i referentne vrijednosti brzina diskretnih točaka s kojima će izračunate brzine točaka biti uspoređene.

Referentni podaci preuzeti su iz Pavašević [2014], a rezultat su kombinirane obrade i izjednačenja GPS mjerenja na CROPOS mreži i mrežama pozicijskih sustava susjednih zemalja (SIGNAL, GNSSnet.hu i MontePOS-a) za razdoblje od 4.87 godina te 17 GPS mjernih kampanja provedenih na teritoriju Republike Hrvatske i susjednih zemalja za razdoblje od 20 godina.

2. Kratko o geodeziji i njezina tri stupa

Definiciju geodezije prvi je predstavio Friedrich Robert Helmert (1843. – 1917.) krajem 19. stoljeća. On je geodeziju opisao kao znanost o izmjeri i kartiranju Zemljine površine [Torge, 2001]. Krajem 20. stoljeća Wolfgang Torge piše da je geodezija znanost koja se bavi određivanjem oblika i vanjskog polja ubrzanja sile teže Zemlje i drugih nebeskih tijela kao vremenski promjenjivih veličina, kao i određivanjem srednjeg Zemljina elipsoida na temelju parametara opažanih na i izvan površine Zemlje [ibid.].

Danas geodeziju definiramo kao znanost koja se bavi mjerenjem i prikazom geometrije, fizike i vremenskih varijacija Zemlje i drugih nebeskih tijela [Plag i dr., 2009]. Ova definicija geodezije može se razložiti na tri segmenta od kojih svaki predstavlja jedan od tri stupa geodezije: geokinematiku, Zemljinu rotaciju i Zemljino polje ubrzanje sile teže koje možemo vidjeti na slici 2.1. Fokus ovog rada bit će upravo na geokinematici, posebnoj znanstvenoj poddisciplini geodinamike, koja se bavi kvantifikacijom i kvalifikacijom pomaka i gibanja tijela Zemlje, odnosno produktima geodetske deformacijske analize, bez ulaženja u interpretaciju sustava fizikalnih sila, uzročnica gibanja odnosno pomaka [Rožić, 2001].



Slika 1. Tri stupa geodezije [Plag i dr., 2009]

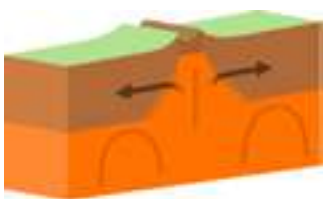
Geotektonika, kao jedna od poddisciplina geokinematike, bavi se proučavanjem pokreta i deformacija u Zemljinoj kori tj. litosfernom omotaču te kontaktima pojedinih oceanskih i kontinentalnih litosfernih ploča, koje se kreću po gornjem sloju astenosfere – Zemljinu plaštu [Kious i Tilling, 2001].

3. Gibanja tektonskih ploča

Kontinenti koje danas poznajemo nekada su bili spojeni u superkontinent Pangeu koji se s vremenom raspao, a njegovi dijelovi su formirali 7 manjih kontinenata. Prvi koji se zalagao za teoriju razlamanja i pomicanja kontinenata bio je Alfred Wegener, njemački geofizičar i meteorolog, koji se smatra ocem teorije „pomicanja kontinenata“ (engl. Continental Drift). On je još početkom 20. stoljeća, promatrajući živi svijet na različitim kontinentima te oblike kontinenata koji se međusobno podudaraju, predlagao teoriju po kojoj su svi današnji kontinenti nekada tvorili superkontinent te su se vremenom razdvojili i došli na položaj na kojem su danas [Chander, 2005].

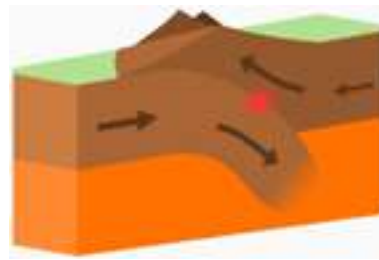
Wegener je odvajanje kontinenata objašnjavao pretpostavkom da kontinenti, sastavljeni od materijala manje gustoće plutaju gušćim materijalom Zemljina plašta – astenosfere. Uzrok gibanja tektonskih ploča objašnjen je sporim kretanjem vrućeg materijala u plaštu [ibid.]. Litosfera je razlomljena na 7 velikih tektonskih ploča i 70-ak manjih ploča koje malim brzinama plutaju po astenosferi te na površini Zemlje izazivaju brojne promjena. S obzirom na tip granice koji izazivaju susjedne tektonske ploče, posljedice gibanja mogu biti različite. Prema Kious i Tilling [2003] razlikujemo 3 tipa granica tektonskih ploča:

- konstruktivne ili divergentne granice koje nastaju na mjestima gdje se dvije ili više tektonskih ploča gibaju u suprotnim smjerovima, odnosno onda kada se one međusobno udaljavaju kao što je prikazano na slici 3.1. Ovakvi tipovi granica često su popraćeni velikom vulkanskom aktivnošću izazvanom magmom koja izbija na površinu [ibid.].



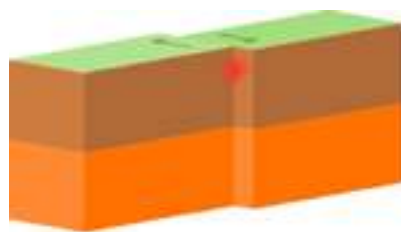
Slika 2. Divergentne (konstruktivne) granice [URL-1]

- destruktivne ili konvergentne granice koje se pojavljuju na mjestima gdje se susjedne tektonske ploče gibaju jedna prema drugoj, pri čemu se jedna tektonska ploča podvlači pod drugu, dok se druga izdiže nad nju kao što je prikazano na slici 3.2. Kao posljedica podvlačenja jedne tektonske ploče pod drugu, na površini dolazi do izdizanja Zemljine kore pri čemu se najčešće stvaraju planinski lanci [Kious i Tilling, 2003].



Slika 3. Konvergentne (destruktivne) granice [URL-2]

- konzervativne ili transformne granice nastaju na mjestima gdje se dvije tektonske ploče primiču jedna drugoj, ali se u trenutku sudarane podvlače jedna pod drugu već ploče klize jedna uz drugu kao što je vidljivo na slici 3.3. Zbog velike količine energije uzrokovane trenjem ploča, duž transformnih granica često dolazi do pucanja Zemljine kore što rezultira rasjedima na površini Zemlje [Kious i Tilling, 2003].



Slika 4. Transformne (konzervativne) granice [URL-3]

4. Općenito o kinematičkim modelima

Posljedica gibanja tektonskih ploča je dugoperiodički pomak diskretnih točaka na fizičkoj površini Zemlje, odnosno svaka točka na fizičkoj površini Zemlje giba se određenom brzinom. Brzine gibanja točaka

opisane su raznim kinematičkim modelima gibanja tektonskih ploča.

Kako bismo definirali određeni kinematički model, potrebno je definirati komponente Eulerova pola P_{XYZ} tog kinematičkog modela. Određivanje komponenta Eulerova pola P_{XYZ} primjenom izraza 5.2 obavlja se postupkom posrednog izjednačenja po teoriji najmanjih kvadrata za posredna mjerenja, iskazivanjem brzina izrazom [Perez i dr., 2003]:

$$\begin{bmatrix} V_{X_i} \\ V_{Y_i} \\ V_{Z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_i & -Y_i \\ -Z_i & 0 & X_i \\ Y_i & -X_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ili skraćeno:

$$V = A \Omega \quad (2)$$

Inverzijom izraza 4.2 i primjenom teorije najmanjih kvadrata, Eulerov vektor rotacije se računa prema izrazu:

$$\Omega = (A^T P A)^{-1} A^T P V \quad (3)$$

gdje vektor brzina V predstavlja vektor mjerenja l , a matrica težina mjerenja P dobivena je umnoškom kvadrata referentnog standardnog odstupanja σ_0 i inverzne matrice kovarijance V_{ll}

Konačno, komponente Eulerova pola $P(\phi, \lambda, \Omega)$ dobiju se prema izrazima [Calais, 2010]:

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{\Omega_z}{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}} \right) \\ \lambda &= \tan^{-1} \left(\frac{\Omega_y}{\Omega_x} \right) \\ \Omega &= \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Korištenjem različitih modela gibanja tektonskih ploča dobit ćemo i različite brzine gibanja tektonskih ploča za pojedinu točku, a razlog tome su međusobno različiti parametri Eulerova pola definirani za svaki model, potrebni da se izračuna brzina gibanja neke točke. Razlog različitih parametara Eulerova pola su različiti načini računanja kinematičkih modela, kao što je primjerice uključivanje većeg ili manjeg broja tektonskih ploča u računanje modela. Do danas je definirano 10 globalnih kinematičkih modela definiranih u odnosu na NNR (engl. No-net-rotation) okvir, odnosno primjenom NNR uvjeta.

NNR uvjet služi za iskazivanje brzina gibanja točaka bez referiranja u odnosu na koju tektonsku ploču se

iskazuje brzina. NNR uvjet prvi je predstavio francuski glaciolog i geograf Louis Lliboutry (1922. – 2007.) 1977. godine kao aproksimaciju referentnog okvira u kojem je moment sila koje djeluju na niže dijelove Zemljina plašta jednak nuli. NNR uvjet matematički se može iskazati Tisserandovim uvjetom koji kaže da suma ukupnog kutnog momenta svih tektonskih ploča mora biti jednaka nuli [Calais, 2007]:

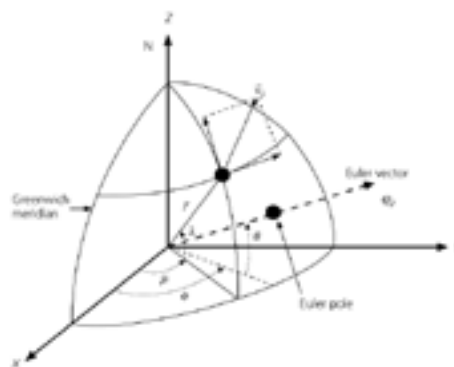
$$\vec{L} = \int_D \vec{r} \times \vec{V} dm = 0 \quad (5)$$

gdje je \vec{L} - suma ukupnog kutnog momenta svih tektonskih ploča, \vec{V} - vektor brzine promatrane točke, \vec{r} - vektor položaja promatrane točke, D - površina cijele Zemlje i dm - jedinična masa Zemlje.

U ovom radu uzeti su u obzir isključivo globalni kinematički modeli određeni u odnosu na NNR referentni okvir.

5. Računanje brzina iz kinematičkih modela

Gibanje tektonskih ploča opisuje se Eulerovim teoremom, koji govori da se pomak bilo koje točke na sferi može opisati njenom kutnom brzinom rotacije oko osi, koja prolazi fiksnom točkom na sferi – Eulerovim polom [Calais, 2010]. Prikaz Eulerova pola dan je na slici 5.1.



Slika 5. Eulerov pol [Stein i Wysession, 2003]

Dakle, kako bismo iz određenog kinematičkog modela dobili brzine točaka na fizičkoj površini Zemlje moramo poznavati komponente Eulerova pola, koje definiraju taj kinematički model [Calais, 2010]. Postupak određivanja brzina točaka iz komponenta Eulerova pola prikazan je u nastavku.

Iz komponenta Eulerova pola $P(\phi, \lambda, \Omega)$ pojedinog modela veoma lako možemo izraziti komponente

Eulerova vektora rotacije na sljedeći način [ibid.]:

$$\begin{aligned}\Omega_X &= \Omega \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \\ \Omega_Y &= \Omega \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda \\ \Omega_Z &= \Omega \cdot \sin\varphi\end{aligned}\quad (6)$$

Za točku T na fizičkoj površini Zemlje s pripadnim koordinatama X_T, Y_T, Z_T i poznatim elementima Eulerova vektora rotacije, brzine gibanja mogu se odrediti sljedećim izrazima [Calais, 2010]:

$$\begin{aligned}\frac{V_X}{\Delta T} &= \Omega_Y \cdot Z_T - \Omega_Z \cdot Y_T \\ \frac{V_Y}{\Delta T} &= \Omega_Z \cdot X_T - \Omega_X \cdot Z_T \\ \frac{V_Z}{\Delta T} &= \Omega_X \cdot Y_T - \Omega_Y \cdot X_T\end{aligned}\quad (7)$$

gdje su $V_X/\Delta T, V_Y/\Delta T, V_Z/\Delta T$ izraženi u [mm/god]. Brzine gibanja točaka V_{XYZ} izražene su u geocentričkom koordinatnom sustavu, a preračunavanje u lokalni koordinatni sustav V_{NEU} osigurano je izrazom [ibid.]:

$$V_{NEU} = R \cdot V_{XYZ} \quad (8)$$

pri čemu je R rotacijska matrica [Calais, 2010].

Konačno, horizontalna komponenta brzine računa se prema izrazu:

$$V_H = \sqrt{V_N^2 + V_E^2} \quad (9)$$

6. Vremenska transformacija koordinata

Sve do ETRF97 rješenja (uključujući njega), kutna brzina gibanja Euroazijske tektonske ploče u odgovarajućoj ITRF realizaciji preuzimala se iz kinematičkih modela koji su koristili NNR uvjet, a to su bili [Altamimi, 2018]:

- AMO2 model brzina [Minster i Jordan, 1978] i
- NNR-NUVEL-1 [Argus i Gordon, 1991] i NNR-NUVEL-1A [DeMets i dr., 1994].

Počevši s rješenjem ITRF2000, kutne brzine gibanja Euroazijske geotektonske ploče procjenjivane su koristeći ITRF polja brzina: ITRF2000 [Boucher i dr., 2004], ITRF2005 [Altamimi i dr., 2007], ITRF2008 [Altamimi i dr., 2012] i ITRF2014 [Altamimi i dr., 2017].

ETRF2000 tako postaje prva realizacija ETRS89 u kojoj su kutne brzine Euroazijske ploče izračunate upotrebom ITRF polja brzina [Boucher i dr., 2004].

Važnost odabira najrelevantnijeg modela za računanje brzina dolazi do izražaja prilikom vremenske transformacije koordinata neke točke iz razloga što tada izračunate brzine iz kinematičkog modela direktno utječu na izlaznu vrijednost transformirane koordinate, što se može vidjeti u izrazu [Altamimi, 2018]:

$$X(t) = X(t_c) + V \cdot (t - t_c) \quad (10)$$

gdje $X(t)$ označava vektor položaja točke u referentnom okviru za epohu t (t predstavlja unesenu izlaznu epohu), $X(t_c)$ predstavlja vektor položaja točke u referentnom okviru za centralnu epohu mjerenja t_c dobiven transformacijom. V predstavlja vektor brzine gibanja točke u referentnom okviru, a $t - t_c$ je razlika epoha.

7. Globalni NNR kinematički modeli Euroazijske ploče

Uzevši u obzir samo kinematičke modele Euroazijske ploče koji su određeni s obzirom na no-net-rotation okvir, u tablici 7.1 prikazani su kinematički modeli korišteni za računanje brzina u ovom radu.

Tablica 1. Elementi Eulerova pola svih NNR kinematičkih modela Euroazijske tektonske ploče

MODEL	φ [°]	λ [°]	Ω [°/mil. god.]	AUTORI
NNR-NUVEL-1	50.6000	-112.4000	0.2400	Argus i Gordon [1991]
NNR-NUVEL-1A	50.6310	-112.2750	0.2337	DeMets i dr. [1994]
APKIM2000	57.9000	-97.1000	0.2590	Drewes i Angermann [2001]
ITRF2000	57.9650	-99.3740	0.2600	Boucher i dr. [2004]
PB2002	50.6311	-112.2750	0.2337	Bird [2003]
APKIM2005	53.4000	-95.7000	0.2590	Drewes [2009]
ITRF2005	56.3300	-95.9790	0.2610	Altamimi i dr. [2007]
MORVEL56	48.8500	-106.5000	0.2230	DeMets i dr. [2010]
ITRF2008	54.2254	-98.8260	0.2570	Altamimi i dr. [2012]
ITRF2014	55.0699	-98.8260	0.2610	Altamimi i dr. [2014]

Za svaki od 10 modela, primjenom izraza 5.2, 5.3 i 5.4 izračunato je 7 komponenta brzina ($V_X, V_Y, V_Z, V_N, V_E, V_D, V_H$) gibanja za 81 točku na teritoriju

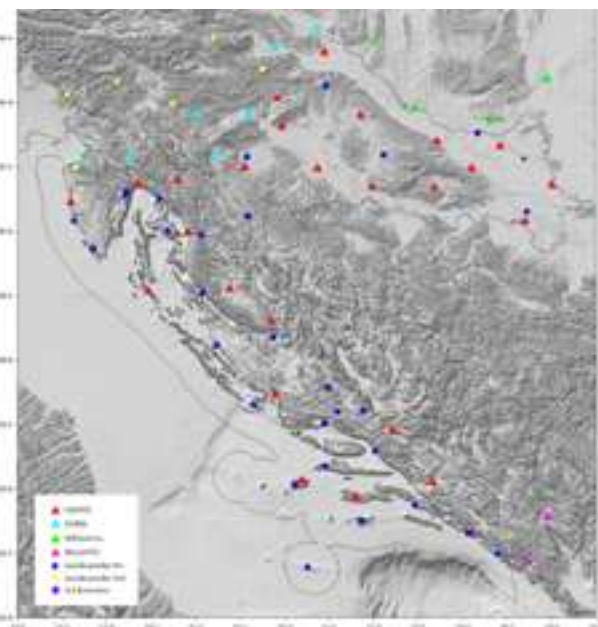
Republike Hrvatske i susjednih zemalja za koje su bili dostupni referentni podaci. Kompletan postupak računanja brzina obavljen je u Microsoft Excel tabličnom kalkulatoru, a dobiveni rezultati su dodatno prekontrolirani uz pomoć servisa UNAVCO Plate Motion Calculator [URL-4].

U sklopu 17 provedenih GPS kampanja na teritoriju Republike Hrvatske i susjednih zemalja ukupno su opažane 43 točke, od čega je 29 geodinamičkih točaka

8. Referentni podaci za usporedbu

na teritoriju Republike Hrvatske, 7 geodinamičkih točaka na teritoriju Republike Slovenije, 3 IGS kontrolne točke (od čega dvije na teritoriju RH) te 4 IGS referentne točke Međunarodnog GNSS servisa (engl. International GNSS service – IGS). Kombiniranjem rješenja tih 17 GPS mjernih kampanja za razdoblje od 20 godina s umreženim rješenjem CROPOS mreže i pozicijskih sustava susjednih zemalja (SIGNAL - Slovenija - 7 stanica, GNSSnet.hu - Mađarska - 4 stanice i MontePOS - Crna Gora - 2 stanice) za razdoblje od 4.87 godina izračunate su brzine gibanja za ukupno 90 točaka [Pavasović, 2014]. Upravo su te točke (slika 8.1), izuzev stanica CROPOS mreže HVA2 i DUB2, koje su opažane u kratkom vremenskom razdoblju (pa referentni podaci istih nisu dovoljno pouzdani) i 7 IGS stanica koje se nalaze izvan teritorija Republike Hrvatske, uzete kao referentne točke za usporedbu s brzinama izračunatim iz NNR globalnih kinematičkih modela Euroazijske tektonske ploče (tablica 7.1).

Slika 6. Referentne točke (81) na teritoriju Republike Hrvatske i susjednih zemalja s poznatim vrijednostima brzina



9. Analiza usporedbe

Koristeći komponente Eulerova pola svih kinematičkih modela navedenih u tablici 7.1, za svaki su model zasebno izračunate brzine. Sve komponente brzina iskazane su u metrima po godini. Usporedbom tih brzina s referentnim brzinama točaka dobivenih kombiniranim rješenjem 17 GPS kampanja i umreženih rješenja CROPOS-a i pozicijskih sustava susjednih zemalja dobivene su razlike brzina svih točaka za svaki model u odnosu na referentne podatke.

Iz tako dobivenih razlika brzina izračunati su statistički pokazatelji (minimalno odstupanje, maksimalno odstupanje, srednje odstupanje i standardna devijacija) za svaku komponentu brzine (V_x , V_y , V_z , V_N , V_E , V_U , V_H) na temelju kojih je moguće procijeniti pouzdanost primjenjivosti pojedinog globalnog NNR kinematičkog modela Euroazijske ploče na teritoriju Republike Hrvatske i susjednih zemalja. Statistički pokazatelji su u tablici 8.1.

Tablica 2. Statistički pokazatelji korištenih NNR kinematičkih modela

Model	Stat. pok.	V_x [m/god.]	V_y [m/god.]	V_z [m/god.]	V_N [m/god.]	V_E [m/god.]	V_U [m/god.]	V_H [m/god.]
NNR-NUVEL-1	MIN.	-0.0041	-0.0028	-0.0019	-0.0014	-0.0031	-0.0032	-0.0025
	MAKS.	0.0026	0.0059	0.0049	0.0045	0.0057	0.0044	0.0062
	SRED.	-0.0008	-0.0004	0.0014	0.0016	-0.0001	0.0004	0.0008
	ST.DEV.	0.0016	0.0012	0.0018	0.0019	0.0011	0.0015	0.0014
NNR-NUVEL-1A	MIN.	-0.0045	-0.0023	-0.0017	-0.0001	-0.0024	-0.0032	-0.0018
	MAKS.	0.0022	0.0064	0.0051	0.0048	0.0063	0.0044	0.0069
	SRED.	-0.0012	0.0002	0.0017	0.0020	0.0005	0.0004	0.0015
	ST.DEV.	0.0019	0.0011	0.0020	0.0022	0.0012	0.0015	0.0019
APKIM2000	MIN.	-0.0036	-0.0021	-0.0026	-0.0012	-0.0026	-0.0032	-0.0026
	MAKS.	0.0031	0.0067	0.0043	0.0036	0.0064	0.0044	0.0064
	SRED.	-0.0004	0.0003	0.0009	0.0008	0.0004	0.0004	0.0008
	ST.DEV.	0.0015	0.0012	0.0014	0.0014	0.0011	0.0015	0.0014
ITRF2000	MIN.	-0.0036	-0.0026	-0.0024	-0.0010	-0.0030	-0.0032	-0.0029
	MAKS.	0.0031	0.0062	0.0045	0.0038	0.0059	0.0044	0.0061
	SRED.	-0.0004	-0.0002	0.0010	0.0011	-0.0001	0.0004	0.0005
	ST.DEV.	0.0015	0.0012	0.0015	0.0015	0.0011	0.0015	0.0013
PB2002	MIN.	-0.0045	-0.0023	-0.0017	-0.0001	-0.0024	-0.0032	-0.0018
	MAKS.	0.0022	0.0064	0.0051	0.0048	0.0063	0.0044	0.0069
	SRED.	-0.0012	0.0002	0.0017	0.0020	0.0005	0.0004	0.0015
	ST.DEV.	0.0019	0.0011	0.0020	0.0022	0.0012	0.0015	0.0019
APKIM2005	MIN.	-0.0026	-0.0011	-0.0039	-0.0031	-0.0020	-0.0033	-0.0031
	MAKS.	0.0042	0.0077	0.0030	0.0017	0.0070	0.0043	0.0058
	SRED.	0.0007	0.0013	-0.0005	-0.0010	0.0010	0.0003	0.0003
	ST.DEV.	0.0016	0.0017	0.0012	0.0015	0.0015	0.0015	0.0012
ITRF2005	MIN.	-0.0031	-0.0018	-0.0032	-0.0021	-0.0024	-0.0032	-0.0029
	MAKS.	0.0036	0.0070	0.0037	0.0027	0.0065	0.0044	0.0060
	SRED.	0.0001	0.0006	0.0003	0.0000	0.0005	0.0003	0.0005
	ST.DEV.	0.0015	0.0013	0.0011	0.0012	0.0012	0.0015	0.0012
MORVEL56	MIN.	-0.0046	-0.0002	-0.0023	-0.0009	-0.0005	-0.0032	-0.0005
	MAKS.	0.0022	0.0085	0.0045	0.0040	0.0083	0.0044	0.0082
	SRED.	-0.0012	0.0023	0.0011	0.0012	0.0025	0.0003	0.0027
	ST.DEV.	0.0019	0.0024	0.0015	0.0016	0.0026	0.0015	0.0029
ITRF2008	MIN.	-0.0029	-0.0018	-0.0033	-0.0023	-0.0025	-0.0033	-0.0030
	MAKS.	0.0038	0.0070	0.0036	0.0025	0.0065	0.0043	0.0058
	SRED.	0.0003	0.0006	0.0001	-0.0003	0.0005	0.0003	0.0003
	ST.DEV.	0.0015	0.0013	0.0011	0.0012	0.0012	0.0015	0.0012
ITRF2014	MIN.	-0.0029	-0.0022	-0.0033	-0.0022	-0.0029	-0.0033	-0.0033
	MAKS.	0.0039	0.0066	0.0036	0.0026	0.0061	0.0043	0.0056
	SRED.	0.0003	0.0002	0.0001	-0.0002	0.0001	0.0003	0.0000
	ST.DEV.	0.0015	0.0012	0.0011	0.0012	0.0011	0.0015	0.0012

Sukladno statističkim pokazateljima, najpouzdaniji globalni kinematički model za područje od interesa je ITRF2014, najnoviji model trenutno aktualne ITRF realizacije. Također, svi preostali kinematički modeli pokazuju dobru pouzdanost pri čemu jedino kod modela MORVEL56 srednja vrijednost odstupanja nekih komponenata brzina prelazi 2 mm/god. Obratimo li pažnju na minimalne i maksimalne vrijednosti, možemo uočiti da se najveća razlika u odnosu na referentne vrijednosti brzina pojavljuje kod modela MORVEL56 gdje maksimalna vrijednost razlika brzina za V_V , V_E i V_H komponente postiže vrijednosti preko 8 mm/god. Slijedom navedenog, možemo zaključiti da su brzine točaka dobivene modelom MORVEL56 za područje od interesa nešto manje pouzdane od brzina dobivenih preostalim modelima. Kod svih preostalih modela, uočljivo je da su maksimalne vrijednosti razlika brzina također dobivene za V_V , V_E i V_H komponente brzina. Te se vrijednosti kreću u rasponu 5 – 7 mm/god. za svaki model, pri čemu također najmanje maksimalne vrijednosti pokazuje model ITRF2014. Bitno je naglasiti da se maksimalna vrijednost razlika gore navedenih komponenti brzina (V_{VEH}) u iznosu 5 – 7 mm/god. pojavljuje kod svih modela (osim za model MORVEL56) isključivo za točku Velika Polana (VELP) u Sloveniji dok su maksimalne vrijednosti komponenti brzina (V_{VEH}) preostalih 80 točaka unutar 4 mm/god. Kod modela MORVEL56 ekstrem nije isključivo točka VELP, već je razlika komponenti brzina (V_{VEH}) 10-ak drugih točaka također na razini 5 – 6 mm/god. što ukazuje na činjenicu da je model MORVEL56 najnepouzdaniji model za određivanje brzina na teritoriju Republike Hrvatske i susjednih zemalja.

10. Zaključak

Svaki pomak neke točke na fizičkoj površini Zemlje moguće je odrediti ukoliko znamo njezinu brzinu i smjer kretanja. Brzinu neke točke moguće je izračunati ukoliko su nam poznate njezine koordinate te vrijednosti apsolutnih komponenti Eulerova pola za onu ploču na kojoj se točka nalazi. U ovom radu izračunate su brzine 81 točke na teritoriju Republike Hrvatske i susjednih zemalja za 10 različitih NNR kinematičkih modela kako bismo mogli procijeniti primjenjivost svakog od tih modela na teritoriju Republike Hrvatske, ali i susjednih zemalja. Brzine su izračunate na temelju prethodno definiranih kinematičkih modela, odnosno numeričkih vrijednosti njihovih komponenata Eulerova pola i prethodno definiranih matematičkih izraza. Dobivene

brzine uspoređene su sa referentnim brzinama dobivenim kombiniranim rješenjem podataka CROPOS-a i pozicijskih sustava susjednih zemalja tijekom 4,87 godina te 17 GPS mjernih kampanja na teritoriju Republike Hrvatske tijekom 20 godina. Na temelju usporedbe s referentnim podacima izračunati su statistički pokazatelji za svaki model.

Iz izračunatih statističkih pokazatelja vidljivo je da srednje vrijednosti svih komponenata brzine svakog kinematičkog modela u ovom slučaju nisu velikog iznosa, a također, minimalne i maksimalne vrijednosti razlika komponenata brzina niti za jedan model ne prelaze milimetarsku razinu. S obzirom na te podatke može se reći da se svaki globalni kinematički model korišten u ovom radu može koristiti za računanje brzina točaka na teritoriju Republike Hrvatske i šire. Prilikom vremenske transformacije koordinata svakako se preporučuje korištenje odgovarajućeg globalnog kinematičkog modela Euroazijske ploče u ovisnosti o odgovarajućem referentnom koordinatnom okviru sukladno preporukama EUREF-a.

LITERATURA

- Altamimi, Z., (2018): EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), France, June, pp. 1-12.
- Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., Collilieux, X. (2017): ITRF2014 plate motion model. *Geophysical Journal International*, Volume 209, Issue 3, 1 June 2017, Pages 1906-1912, <https://doi.org/10.1093/gji/ggx136>
- Altamimi, Z., Métivier, L., Collilieux, X. (2012): ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 117, Issue B7, pp. 1-14. doi:10.1029/2011JB008930.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., Boucher, C. (2007): ITRF2005 - A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, American Geophysical Union, Vol. 112 (B9), pp. 14-19, doi:10.1029/2007JB004949.
- Argus, D. F., Gordon, R. G. (1991): No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1. *Geophysical Research Letters*, 18(11), pp. 2039-2042, doi: 10.1029/91GL01532.
- Bird, P. (2003): An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Volume 4, Number 3. doi:10.1029/2001GC000252.

- Boucher, C., Altamimi, Z., Feissel-Vernier, M., Sillard, P. (2004): The ITRF2000. IERS Technical Note 31. IERS Conventions Centre, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. pp. 1-289, ISBN 3-89888-881-9 (print version).
- Calais, E. (2010): Kinematics of the lithosphere from geodetic measurements. Lectures. Purdue University - Department of Earth and Atmospheric Sciences.
- Calais, E. (2007): Reference Frames. Lectures. Purdue University - Department of Earth and Atmospheric Sciences.
- Chander, R. (2005): Wegener and his Theory of Continental Drift, Resonance, December 2005, Volume 10, Issue 12, pp 58-75, doi: org/10.1007/BF02835130
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, F. (2010): Geologically current plate motions. Geophysical Journal International, Vol. 181, Issue 1, pp. 1-80. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., Stein, S. (1994): Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. Geophysical Research Letters, 21(20), pp. 2191-2194, doi: 10.1029/94GL02118.
- Drewes, H. (2009): The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model APKIM2005 as basis for a non-rotating ITRF. Geodetic Reference Frames, H. Drewes (Ed.), IAG Symposia, 134, pp. 95-99, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. doi:10.1007/978-3-642-00860-3_15.
- Drewes, H., Angermann, D. (2001): The Actual Plate Kinematics and Crustal Deformation Model 2000 (APKIM2000) as a Geodetic Reference System, IAG Scientific Assembly, September, 2-8, 2001, Budapest, Hungary.
- Frisch, W., Meschede, M., Blakey, R. (2011): Plate Tectonics - Continental Drift and Mountain Building. Springer-Verlag Heidelberg Berlin.
- Hamblin, W. K., Christiansen, E. H. (2009): Earth's Dynamic Systems, 10th Edition (Web Edition 1.0). Department of Geological Sciences, Brigham Young University, Provo Utah.
- Kious, W. J., Tilling, R. I. (2001): This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics. Ed. Lindeberg, P., U. S. Geological Survey, Denver, U.S.A., <https://doi.org/10.3133/7000097>
- Minster, J.B., Jordan, T.H. (1978): Present-day plate motions. Journal of Geophysical Research, 83(B11), pp. 5331-5354. doi: 10.1029/JB083iB11p05331.
- Pavasović, M. (2014): CROPOS kao hrvatski terestrički referentni okvir i njegova primjena u geodinamičkim istraživanjima. Doktorska disertacija. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Perez, J. A., Monaco, J. F. G., Chaves, J. C. (2003): Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South America Case. Journal of Global Positioning Systems, Vol. 2, pp. 90-99.
- Plag, H.-P., Beutler, R., Gross, R., Herring, T.A., Rizos, C., Rummel, R., Sahagian, D., Zumberge, J. (2009): Introduction Chapter. Global Geodetic Observing System Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Eds. H.-P. Plag, M. Perlman. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-02687-4. pp. 1-13, doi: 10.1007/978-3-642-02687-4_1.
- Rožić, N. (2001): Geodinamika. Nekorigirani rukopis. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Stein, S., Wysession, M. (2003): An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure, Blackwell Publ.
- Torge, W. (2001): Geodesy, 3rd completely revised and extended edition, Walter de Gruyter, Berlin-New York.

POPIS URL-OVA

URL-1: https://en.wikipedia.org/wiki/Divergent_boundary (pristupljeno 11. 10. 2018.)

URL-2: <https://www.abc.net.au/news/2017-02-22/earthquakes-convergent-boundary/8187474> (pristupljeno 11. 10. 2018.)

URL-3: https://en.wikipedia.org/wiki/Transform_fault (pristupljeno 11. 10. 2018.)

URL-4: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> (pristupljeno 29. 8. 2018.)

AUTORI | AUTHORS

Tedi Banković, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: tedi.bankovic1@gmail.com

Antonio Banko, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: antonio.banko@yahoo.com

Doc. dr. sc. Marko Pavasović, dipl. ing. geod., Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: mpavasovic@geof.hr

Izv. prof. dr. sc. Almin Đapo, dipl. ing. geod., Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: adapo@geof.hr