### مدلسازی تغییر مختصات مسطحاتی نقاط سطحی زمین در چارچوبهای مرجع ITRF در محدودهٔ فلات ایران

اصغر راستبود' و بهزاد وثوقی '\*

ا دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۳۰)

چکیدہ

آشنایی با نحوه حرکت و تغییر مختصات نقاط سطح زمین با زمان برای انواع کاربردهای ژئودتیک امری بسیار مهم و ضروری است. هدف از این تحقیق مدلسازی وابسته به زمان جابهجایی و تغییر مختصات نقاط سطحی زمین در اثر حرکت صفحههای زمین ساختی و زمین لرزهها در محدوده فلات ایران است. از مدل عرضه شده میتوان برای پیش بینی تغییر مختصات نقاط سطحی زمین و یا پیش بینی مشاهدات ژئودتیک (طول و زاویه) از یک اپوک زمانی دلخواه به اپوک دلخواه دیگر نیز بهره جست. این مدل مختصات نقاط ورودی را در انواع چارچوب های مرجع TRF و یا WGS84 دریافت می کند و بعد از اجرای محاسبات، خروجی را در چارچوب مرجع دلخواه عرضه می دارد. به منظور مدل سازی حرکت دائمی صفحهها و حرکتهای بین لرزهای و همچنین حرکتهای هم لرزه از روابط تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) استفاده شده است. جذر میانگین مربعات (rms) خطای مدل سازی حرکتهای دائم و بین لرزهای برای مدلی که بهترین انطباق را با مشاهدات GPS داشت برابر GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران بیشتر از سهم گسلش های اطراف صفحه عربستان در تولید میدان سرعت GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران بیشتر از سهم گسلش های اطراف صفحه عربستان در تولید میدان سرعت (rms) محاسبه شد. نتایج مدل سازی نشان می دهد که سهم گسلش های اطراف صفحه عربستان در تولید میدان سرعت (GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران بیشتر از سهم گسلش های اطراف صفحه عربستان در تولید میدان سرعت GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران بیشتر از سهم گسلش های اطراف صفحه عربستان در تولید میدان سرعت GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران بیشتر از سهم وانگ (۲۰۰۶) برای تکمیل و بالا بردن دقت خروجیهای مدل پیشنهاد میشند و مدل سازی حرکتهای بعدلرزهای با سیاد و ایک رو

واژههای كليدی: ميدان سرعت GPS، نظريهٔ نابرجايي، زمينساخت، چارچوب مرجع، WGS84، JTRF

## Horizontal coordinates change modeling of Earth surface points in ITRF reference frames in the region of Iranian plateau

Asghar Rastbood<sup>1</sup> and Behzad Voosoghi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geodesy Engineering, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2 May 2010, accepted: 21 December 2011)

\*Corresponding author:

vosoghi@kntu.ac.ir

\*نگارنده رابط:

#### **Summary**

Being familiar with the modes of motion and coordinate changes of the Earth surface points as a function of time is very important and essential in different types of geodetic applications. The puepose of this research is the time-dependent modeling of displacement and coordinate changes of the Earth's crust surface points due to the plate tectonic motions and earthquakes in the region of Iranian plateau. The provided model could be used to predict the coordinate changes of surface crust points or to predict the geodetic observations (distance and angle) from one arbitrary epoch to another. This model receives the coordinates in various ITRFs or WGS84 reference frames and after the computations are made, the results could be provided in any reference frame.

The Bursa-Wolf seven-parameter conformal model was used to transform three dimensional Cartesian co-ordinates between WGS84 and ITRF2000. In the absence of a crustal motion, the equations for transforming positional coordinates from one ITRF to another are rather familiar to the surveying community, i.e. it is a seven-parameter transformation. In the presence of a crustal motion, the transformation equations can be generalized to allow one frame to move relative to the other. Thus, each of the seven defining parameters becomes a function of time. Therefore, in modeling, fourteen transformation parameters were used for ITRF2000 reference frame transformation to the previous and later reference frames.

Okada (1985) analytical model was used to model sudden coseismic and interseismic motions due to earthquakes. In previous works (Pearson, 2010 and Meade, 2005) the block model was used for secular and interseismic deformation modeling, but in this research, we used Okada (1985) analytical modeling for this purpose since (1) Modeling the present-day velocity field determined with GPS networks incorporates geological constraints on the geometry of the main structures and on the long-term deformations; (2) Regions between the major faults are not rigid and so the modeling allows for internal deformations. Finally, we have a tectonic model for Arabia-Eurasia oblique collision zone in Iran that is more realistic than the rigid block model. This model shows that about 30% of GPS velocity field components are produced by faults inside Iran, 60% by Arabian plate and 10% by Anatolian plate.

Continuous use of GPS data and local network observations is recommended to get a more precise model for secular and interseimic motions. Also using more precise geometric faulting parameters due to earthquakes obtained by inverse problem solution based on GPS or InSAR observations is recommended to get more precise outputs. Postseimic motions were not modeled in this research since this effect is a function of time and its amplitude is just considerable for large earthquakes, beside that the amount of this effect is reduced with time. Anyway, the postseismic deformation modeling due to intense earthquakes with a large focal depth using Wang (2006) model is recommended. In this research, just the effects of secular, interseismic and coseismic motions were included in the model. To complete the model, it is recommended to consider the effects of the crustal motions associated with land subsidence, volcanic activity, postglacial rebound etc.

Key words: GPS velocity field, dislocation theory, tectonics, reference frame, ITRF, WGS84

۱ مقدمه

زمین بدین لحاظ که دارای سه لایه عمده است شبیه یک تخممرغ نیمپز است. لایه خارجی که سنگ کره نامیده می شود، نسبتاً شکننده است و حدود یک درصد شعاع زمین را تشکیل میدهد. لایه میانی که گوشته نامیده می شود، دارای ساختاری شبیه خمیردندان است. داخلی ترین لایه هسته نامیده می شود. پر توزایی مداوم در داخل زمین باعث افزایش دما با افزایش عمق میشود، و گرما جریان همرفت در گوشته را ایجاد میکند. سنگ کره سخت تر از آن است که جریان یابد، بنابراین به حدود بیش از بیست صفحه زمینساختی شکسته می شود و بهصورت تقريباً صُلب، روی گوشته با نرخ تقريباً ثابت چند سانتیمتر در سال شناور است. زمانی که دو صفحه بههم برخورد میکنند یا بهشکل سایشی از کنار هم رد میشوند، بهصورت کشسان تغییرشکل پیدا میکنند. تنشرهای انباشته شده در اثر دگرشکلی هنگامی که از نیروی اصطکاک در طول مرز صفحهها بیشتر شود، بهصورت زمینلرزه ویرانگر آزاد میشوند. پس از وقوع زمینلرزه، صفحههای مجاور، برای بهدست آوردن شکل قبلی خود، حرکت بازگشتی میکنند. بنابراین، نقاط روی سطح زمین بهصورت افقی با سرعتهای نسبتاً ثابت حرکت میکنند که با جابهجاییهای ناگهانی مرتبط با زمینلرزه، گسیخته می شود.

در زمین شناسی ایران این باور وجود دارد که این سرزمین در بخش میانی کوهزاد آلپ – هیمالیا قرار دارد که از غرب اروپا آغاز می شود و پس از گذر از ترکیه، ایران، افغانستان تا تبت و شاید تا نزدیکی های برمه و اندونزی ادامه دارد (آقانباتی، ۱۳۸۳). ایران منطقهای با زمین ساخت فعال است و می توان آن را به صورت مرز عریض نرم بین صفحه های صُلب اوراسیا و عربستان در نظر گرفت، به طوری که همگرایی صفحه های عربستان – اوراسیا بین گسلش های این منطقه توزیع می شود. وضعیت

توپوگرافی این منطقه، وجود گسلهای فعال و توزیع زمینلرزههای متعدد دستگاهی و تاریخی مؤید این واقعیت است.

ایران شاهد برخورد مایل صفحههای زمینساختی عربستان و اوراسیا در رشته کوههای زاگرس، البرز و کپهداغ، فرورانش در منطقه مکران، حرکت پادساعت گرد در محدوده دشت لوت و سامانه حرکتی امتدادلغز در محدودهٔ گسل شمال تبریز است. با در نظر گرفتن زمینساخت منطقه و با توجه به وقوع زلزلههای متعدد و فاجعهبار تاریخی و دستگاهی در این منطقه (بربریان، فاجعهبار تاریخی و دستگاهی در این منطقه (بربریان، زلزلههای مشابه در آینده، جابهجایی نقاط از جمله ایستگاههای ژئودزی و تغییر مختصات آنها در اثر حرکت دائمی صفحههای زمینساختی و زمینلرزهها امری کاملاً طبیعی است.

هدف از تحقیق حاضر عرضه مدلی برای پیشبینی تغییر مختصات نقاط سطحی زمین در اثر حرکت دائمی صفحههای زمینساختی و زمینلرزهها در محدوده فلات ایران است. مدل عرضه شده از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. در قسمت اول مؤلفههای افقی سرعت ناشی از حرکتهای دائم و بینلرزهای محاسبه میشوند. بدینمنظور با استفاده از مشاهدات GPS و براساس نظریهٔ نابرجایی، مدل قادر به پیش بینی مؤلفه های افقی سرعت در هر موقعیت از محدوده مورد بررسی است. در قسمت دوم مؤلفههای افقی سرعت، ناشی از حرکتهای هملرزه با مدل براساس نظریهٔ نابرجایی محاسبه میشوند. بهمنظور محاسبه تغییر مختصات بین دو مقطع زمانی، سرعت پیش بینی شده با مدل در قسمت اول به اختلاف زمانی ضرب شده و با جابهجاییهای مرتبط با زمین لرزههای رخ داده در دورهٔ زمانی مشخص شده که در قسمت دوم مدل محاسبه شده جمع برداری می شود. به منظور مدل سازی سرعتهای بینلرزهای از میدان سرعت GPS شبکه

www.SID.ir

ژئودینامیک سراسری ایران با مشاهدات دورهای (ماسون، ۲۰۰۷) درحکم قید مدلسازی استفاده میشود. در مدلسازی و پیشربینی سرعتها و جابهجاییهای مربوط به حرکتهای دائمی، بینلرزهای و هملرزه در منطقه مورد بررسی از روابط تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) استفاده شده است.

مدل طراحی شده قادر به پیشبینی سرعتها و جابهجايىها بهصورت اوراسيا فيكس است ولى قابليت تبدیل مقادیر پیش بینی شده را به دیگر چارچوبهای مرجع از جمله WGS84 و کلیه ITRFها دارد. از کارهای صورت گرفته قبلی در این مورد میتوان به تحقیق و نرمافزار تهیه شده HTDP در منطقه امریکا اشاره کرد (اسنی، ۱۹۹۹؛ پیرسون و همکاران، ۲۰۱۰). بیست و پنج نسخه متفاوت از این نرمافزار از ژوئن ۱۹۹۲ تا کنون عرضه شده است. آخرین نسخه عرضه شده ITDP 3.1.2 عرضه است که در ۶ ژوئن ۲۰۱۱ عرضه شد. تحقیق حاضر اولین گام در تولید اولین نسخه نرمافزار معادل برای منطقه فلات ایران است. در نرمافزار HTDP بهمنظور مدلسازی حرکت دائم و بینلرزهای صفحات از مدل بلوک استفاده شده است ولى در تحقيق حاضر به دو دليل از مدل تحليلي اكادا (۱۹۸۵) بهجاي مدل بلوك استفاده شده است. (۱) با مدلسازی میدان سرعت GPS با استفاده از مدل تحلیلی اکادا قیود زمینساختی (موقعیت گسل.ها) و لرزهزمین ساختی (جهت حرکت گسل ها) به طور صحیح در مدل قابل إعمال است. (٢) با استفاده از این مدل، مناطق واقع بین گسل.های فعال صُلب فرض نشده است و با ضرايب لامه تعريف شده براى مدل، قابليت تغيير شكل دارند. از کارهای قبلی صورت گرفته در زمینه مدلسازی میدان سرعت دائم و بینلرزهای با استفاده از مدل تحلیلی اکادا و مقایسه آن با مدل بلوک می توان به تحقیق آرمیگو و همکاران (۲۰۰۳) و فلریت و همکاران (۲۰۰۴) در منطقه فلات آناتولی و راستبود و وثوقی (۱۳۸۹) در منطقه خاورمیانه اشاره کرد.

بهبود یارامترهای گسلش ناشی از زمین لرزهها با بهرهگیری از روش های گوناگون حل مسئله معکوس و براساس روش های مشاهداتی نظیر GPS و InSAR به جای استفاده از روابط تجربي يا نيمه تجربي براي بالا بردن دقت خروجیهای مدل پیشنهاد میشود. در مدل عرضه شده، حرکتهای بعدلرزهای مدلسازی نشده است. زیرا اثرات بعدلرزهای بیشتر در مورد زمینلرزههایی مطرح است که دارای بزرگی و عمق کانونی زیادی باشند تا زمینلرزه قسمت خمیری سنگ کره را تحت تأثیر قرار دهد. در مورد زمینلرزههایی که بزرگ نسیتند و یا عمق کانونی زیادی ندارند، اثر بعدلرزهای بسیار کم است. از طرفی در حالت کلی اثرات بعدلرزهای در مقایسه با اثرات هملرزه، از نظر دامنه خیلی کوچکترند و بعد از وقوع زمینلرزه، با گذشت زمان کوچک تر نیز میشوند (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶). برای مدلسازی این حرکتها می توان از مدل وانگ (۲۰۰۶) استفاده کرد. به منظور کامل کردن مدل، افزودن و مدلسازی حرکتهای بعدلرزهای در مورد زمینلرزههای بزرگ با عمق کانونی زیاد، به مدل موجود در نسخههای بعدی نرمافزار عرضه شده پیشنهاد می شو د.

۲ مدلسازی تغییر شکل ناشی از گسلش ها بر اساس مدل تحلیلی اکادا

همان طور که در مقدمه نیز اشاره شد، به منظور مدل سازی جابه جایی های ناشی از لغزش در گسل ها، از مدل تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) استفاده شده است. مدل اکادا برپایه نظریهٔ نابر جایی فرمول بندی شده است. در این مدل ابتدا مدل سازی میدان تغییر شکل حاصل از یک تکنیرو (چشمه نقطه ای) صورت می گیرد و سپس با انتگرال گیری از روابط چشمه نقطه ای، میدان تغییر شکل حاصل از یک چشمه مستطیلی (صفحه گسلش) فرمول بندی می شود. به طور کلی پارامتر های ورودی مدل اکادا به دو دسته

www.SID.ir

پارامترهای فیزیکی و هندسی تقسیم میشوند. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در مدل، همان ضرایب لامه μ و منطقه مورد بررسی هستند که باید بهصورت تقریبی مشخص باشند. برای این منظور میتوان با توجه به نتایج آنالیز حساسیت مدل (نوری و وثوقی، ۱۳۸۸) از مقادیر متوسط جهانی نیز استفاده کرد. پارامترهای هندسی مورد استفاده در مدل اکادا شامل طول، عرض، عمق قفل شدگی، شیب، راستا، میزان نابرجایی یا نرخ لغزش، مشاهداتی (ایستگاههای GPS) است. در واقع این مدل با توجه به هندسه گسلش و فیزیک منطقه مورد بررسی، نابرجایی حاصل از گسلش یا نرخ لغزش را به میدان نابرجایی یا میدان سرعت ناشی از آن تبدیل می کند.

۲–۱ مدل اکادا برای گسلش نقطهای استکتی (۱۹۵۸) روشن ساخت که میدان جابهجایی س<sub>i</sub> (x<sub>1</sub>,x<sub>2</sub>,x<sub>3</sub>) ناشی از نابرجایی (ξ<sub>1</sub>,ξ<sub>2</sub>,ξ<sub>3</sub>) م مساحت ∑ در یک محیط همرفتار از رابطه زیر بهدست میآید:

(1)

$$u_{i} = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_{j} \left[ \lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_{i}^{n}}{\partial \xi_{n}} + \mu \left( \frac{\partial u_{i}^{j}}{\partial \xi_{k}} + \frac{\partial u_{i}^{k}}{\partial \xi_{j}} \right) \right] v_{k} d\Sigma,$$

که  $\delta_{jk}$  دلتای کرونکر،  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه و  $v_k$  مسینوس هادی نرمال بر سطح المان  $\Sigma$  و قرارداد  $p_k$  کسینوس هادی نرمال بر سطح المان  $\Sigma$  و قرارداد  $p_k$  جمع إعمال شده است.  $i_i$  مؤلفه أم جابهجایی در نقطه  $(x_1, x_2, x_3)$  ناشی از جهت زأم نیروی نقطهای به بزرگی F است که در نقطه  $(x_1, x_2, x_3)$  روی سطح إعمال می شود. رابطه (۱) به معادله ولترا (Volterra's equation) معروف است و نشان می دهد که جابهجایی ها ناشی از منابعی به صورت کوپل دو گانه هستند (سکال، ۲۰۱۰). در دستگاه مختصات دکارتی شکل ۱ محیط کشسان

در منطقه  $0 \ge z$  قرار می گیرد و محور x موازی با امتداد  $U_2$  , $U_1$  لا گسل است. همچنین در این شکل نابرجایی های  $U_1$ ,  $U_2$  و  $U_3$  که متناظر با مؤلفه های امتدادلغز، شیب لغز و کششی یک نابرجایی اختیاری هستند نشان داده شده است. هر بردار نابرجایی حرکت فرادیواره را نسبت به فرودیواره نشان می دهد. در این شکل مؤلفه شیب لغز نابرجایی یعنی  $U_2$  نشان می دهد. در این شکل مؤلفه شیب لغز نابرجایی یعنی ایشان می دهد. حرکت معکوس است که اگر  $0 > \delta = 2$ باشد، نشانگر حرکت نرمال خواهد بود. در این دستگاه باشد، نشانگر حرکت نرمال خواهد بود. در این دستگاه مختصات، مؤلفه أم جابه جایی در نقطه ( $x_1, x_2, x_3$ ) ناشی از جهت زأم نیروی نقطه ای به بزرگی F در نقطه از جهت رأم نیروی نقطه ای به بزرگی ( $U_1$ ) ناشی (۲)

$$\begin{cases} u_{1}^{1} = \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{\left(x_{1} - \xi_{1}\right)^{2}}{R^{3}} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R - \xi_{3}} - \frac{\left(x_{1} - \xi_{1}\right)^{2}}{R\left(R - \xi_{3}\right)^{2}} \right] \right\} \\ u_{2}^{1} = \frac{F}{4\pi\mu} (x_{1} - \xi_{1}) (x_{2} - \xi_{2}) \left\{ \frac{1}{R^{3}} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R\left(R - \xi_{3}\right)^{2}} \right\} \\ u_{3}^{1} = \frac{F}{4\pi\mu} (x_{1} - \xi_{1}) \left\{ -\frac{\xi_{3}}{R^{3}} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R\left(R - \xi_{3}\right)} \right\}, \tag{$\Psi$}$$

$$\begin{cases} u_{1}^{2} = \frac{F}{4\pi\mu} (x_{1} - \xi_{1}) (x_{2} - \xi_{2}) \left\{ \frac{1}{R^{3}} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R (R - \xi_{3})^{2}} \right\} \\ u_{2}^{2} = \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{(x_{2} - \xi_{2})^{2}}{R^{3}} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R - \xi_{3}} - \frac{(x_{2} - \xi_{2})^{2}}{R (R - \xi_{3})^{2}} \right] \right\} \\ u_{3}^{2} = \frac{F}{4\pi\mu} (x_{2} - \xi_{2}) \left\{ -\frac{\xi_{3}}{R^{3}} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R (R - \xi_{3})} \right\},$$

$$(\mathbf{f})$$

$$\begin{cases} u_1^3 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_1 - \xi_1) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R(R - \xi_3)} \right\} \\ u_2^3 = \frac{F}{4\pi\mu} (x_2 - \xi_2) \left\{ -\frac{\xi_3}{R^3} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R(R - \xi_3)} \right\} \\ u_3^3 = \frac{F}{4\pi\mu} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{\xi_3^2}{R^3} \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R} \right\}, \end{cases}$$

www.SID.ir



شکل ۱. هندسه گسل و نمادهای مورد استفاده در مدلسازی تحلیلی (اکادا، ۱۹۸۵).

که

$$R^{2} = (x_{1} - \xi_{1})^{2} + (x_{2} - \xi_{2})^{2} + (x_{3} - \xi_{3})^{2},$$

با استفاده از رابطه (۱)، سهم اِلِمان سطحی ∑∆ در جابهجایی، ناشی از هر مؤلفه نابرجایی به صورت زیر است: برای مؤلفه امتدادلغز:

$$\frac{1}{F} \mu U_1 \Delta \Sigma \left[ -\left( \frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \delta + \left( \frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \delta \right].$$
 ( $\Delta$ )

براي مؤلفه شيبلغز:

$$\frac{1}{F} \mu U_2 \Delta \Sigma \left[ \left( \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} \right) \cos 2\delta + \left( \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_3} - \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} \right) \sin 2\delta \right].$$
(9)

$$\frac{1}{F}U_{3}\Delta\Sigma\left[\lambda\frac{\partial u_{i}^{n}}{\partial\xi_{n}}+2\mu\left(\frac{\partial u_{i}^{2}}{\partial\xi_{2}}\sin^{2}\delta+\frac{\partial u_{i}^{3}}{\partial\xi_{3}}\cos^{2}\delta\right)\right.\\\left.-\mu\left(\frac{\partial u_{i}^{2}}{\partial\xi_{3}}+\frac{\partial u_{i}^{3}}{\partial\xi_{2}}\right)\sin 2\delta\right].$$

نشان میدهند. همچنین، رابطه (۷) مرکز اتساع با شدت  $\Delta \Delta \Sigma$   $\lambda U_3 \Delta \Sigma$  ترکیب شده با کوپل دوگانه بدون گشتاور و شدت  $\Delta \Delta \Sigma$  (tensile fault) را برای گسل کششی (tensile fault) نمایش میدهد. با جایگذاری روابط (۲)، (۳) و (۴) در روابط (۵)، (۶) و (۷) و قرار دادن  $0 = 2\xi = 1\xi$  و  $b - 2\xi$ , جابهجاییهای سطحی ناشی از یک چشمه نقطهای که در موقعیت (0,0,-d) قرار دارد بهدست می آید.

در حالت امتدادلغز:

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3x^2 q}{R^5} + I_1^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3xyq}{R^5} + I_2^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{3xdq}{R^5} + I_4^0 \sin \delta \right] \Delta \Sigma. \end{cases}$$
(A)

در حالت شيب لغز:

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3xpq}{R^5} - I_3^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3ypq}{R^5} - I_1^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{3dpq}{R^5} - I_5^0 \sin \delta \cos \delta \right] \Delta \Sigma. \end{cases}$$
(9)

$$\begin{cases} u_x^0 = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3xq^2}{R^5} - I_3^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_y^0 = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3yq^2}{R^5} - I_1^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma \\ u_z^0 = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{3dq^2}{R^5} - I_5^0 \sin^2 \delta \right] \Delta \Sigma. \end{cases}$$
(1.)

$$\begin{cases} I_{1}^{0} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[ \frac{1}{R(R+d)^{2}} - x^{2} \frac{3R+d}{R^{3}(R+d)^{3}} \right] \\ I_{2}^{0} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} x \left[ \frac{1}{R(R+d)^{2}} - y^{2} \frac{3R+d}{R^{3}(R+d)^{3}} \right] \\ I_{3}^{0} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{x}{R^{3}} \right] - I_{2}^{0} \qquad (11) \end{cases} \\ I_{4}^{0} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ -xy \frac{2R+d}{R^{3}(R+d)^{2}} \right] \\ I_{5}^{0} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R(R+d)} - x^{2} \frac{2R+d}{R^{3}(R+d)^{2}} \right] \\ I_{5}^{0} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{R(R+d)} - x^{2} \frac{2R+d}{R^{3}(R+d)^{2}} \right], \\ \begin{cases} p = y \cos \delta + d \sin \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ R^{2} = x^{2} + y^{2} + d^{2} = x^{2} + p^{2} + q^{2}. \end{cases} \end{cases}$$

$$\int_{0}^{L} d\xi' \int_{0}^{W} d\eta' \tag{11}$$

 $x - \xi' = \xi$  با تغییر متغیر از 'کے و ' $\eta$  به کے و  $\eta$  به صورت  $\xi = \xi' - \xi' = \xi$  است و  $p = y \cos \delta + d \sin \delta$  است  $p = y \cos \delta + d \sin \delta$  است خواهیم داشت:

$$\int_{x}^{x-L} d\xi \int_{p}^{p-W} d\eta \tag{14}$$

نتایج نهایی با استفاده از نماد چینری 🛚 بهمنظور نمایش

$$\begin{cases} u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \\ u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \\ u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \\ \end{cases}$$

$$(1V)$$

$$\begin{cases} u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \\ u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \\ u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{d}q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_5 \sin \delta \cos \delta \right] \\ \vdots \end{cases}$$

$$(1A)$$

$$\begin{cases} u_x = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{q^2}{R(R+\eta)} - I_3 \sin^2 \delta \right] \\ u_y = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{-\tilde{d}q}{R(R+\xi)} - \sin \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\xi)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_1 \sin^2 \delta \right] \\ u_z = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\xi)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_5 \sin^2 \delta \right] \\ \end{cases}$$

www.SID.ir

ſ

بهصورت برداری باهم جمع کنیم. مطابق شکل ۲ در مدلسازی با استفاده از مدل تحلیلی اکادا از سه دستگاه مختصات متفاوت استفاده می شود که عبارت اند از: ۱-دستگاه مختصات سراسری ۲- دستگاه مختصات محلی و ۳- دستگاه مختصات صفحه ای.

دستگاه مختصات سراسری ( $X_{g}, X_{g}, Z_{g}$ ) بین همه المانها مشترک است بهنحوی که محور X آن افقی و به موازات سطح آزاد، و جهت مثبت آن به سمت شرق است. محور Y این دستگاه نیز افقی و جهت مثبت آن به سمت شمال است. محور Z نیز قائم و جهت مثبت آن نسبت به سطح آزاد به سمت بالای نیمفضا است. از این دستگاه مختصات برای تعریف خروجی های مدل (سرعت و جابه جایی) استفاده می شود.

دستگاه مختصات محلی  $(X_L, Y_L, Z_L)$  برای هر صفحه یا المان تعریف شده و از آن برای محاسبه توابع  $\mathcal{P}_L$  ین مدل اکادا استفاده می شود. محورهای  $X_L$  و  $Y_L$  و یک صفحه افقی را تعریف می کنند که به موازات سطح آزاد است. محور  $X_L$  در راستای گسل و محور Y عمود بر آن و محور  $Z_L$  قائم بر صفحه دو محور است، به نحوی که دستگاه مختصات حاصل به صورت راست گرد باشد یعنی با نگاه کردن در راستای امتداد گسل  $(X_L)$ فرادیواره در سمت راست قرار بگیرد و محور  $Y_L$  به سمت فرودیواره باشد.

دستگاه مختصات صفحهای (X P, Y P, Z P) نیز برای هر صفحه تعریف می شود، به نحوی که محور X در امتداد گسل به موازات محور X دستگاه مختصات محلی، محور P در راستای شیب گسل، و به سمت بالا مثبت است. محور ZP نیز عمود بر صفحه یا المان و جهت مثبت آن به نحوی است که دستگاه راست گرد باشد. از این دستگاه مختصات برای تعریف و معرفی مشخصات نابر جایی گسل به مدل یا تعریف خروجی های مدل استفاده می شود. (19)

$$\begin{split} &I_{1} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{-1}{\cos \delta} - \frac{\xi}{R + \tilde{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_{5} \\ &I_{2} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ -\ln(R + \eta) \right] - I_{3} \\ &I_{3} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{\cos \delta} \frac{\tilde{y}}{R + \tilde{d}} - \ln(R + \eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_{4} \\ &I_{4} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \left[ \ln(R + \tilde{d}) - \sin \delta \ln(R + \eta) \right] \\ &I_{5} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \tan^{-1} \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{\xi(R + X) \cos \delta}, \\ &: \text{ct} \text{ ctr} \text{ ct$$

$$\begin{cases} I_{1} = -\frac{\mu}{2(\lambda+\mu)} \frac{\xi q}{\left(R+\tilde{d}\right)^{2}} \\ I_{3} = \frac{\mu}{2(\lambda+\mu)} \left[ \frac{\eta}{R+\tilde{d}} + \frac{\tilde{y}q}{\left(R+\tilde{d}\right)^{2}} - \ln\left(R+\eta\right) \right] \\ I_{4} = -\frac{\mu}{\lambda+\mu} \frac{q}{R+\tilde{d}} \\ I_{5} = -\frac{\mu}{\lambda+\mu} \frac{\xi \sin \delta}{R+\tilde{d}}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} p = y \cos \delta + d \sin \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ \tilde{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta \\ \tilde{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta \\ R^{2} = \xi^{2} + \eta^{2} + q^{2} = \xi^{2} + \tilde{y}^{2} + \tilde{d}^{2} \\ X^{2} = \xi^{2} + q^{2}, \end{cases}$$
(Y1)

با اِعمال اطلاعات همالرزهای به مدل اکادا می توان جابه جایی های همالرزه و با اِعمال اطلاعات بین لرزهای به این مدل می توان جابه جایی های بین لرزهای را محاسبه کرد.

۲-۳ دستگاههای مختصات مورد استفاده در مدلسازی با توجه به اینکه مدل اکادا مدلی تحلیلی است و برای یک مسئله خطی حل شده است، لذا با توجه به برقرار بودن اصل برهمنهی (principle of superposition) برای محاسبه اثر چند گسلش در یک نقطه کافی است که جابهجاییهای ناشی از تکتک گسلشها را محاسبه و

۱٩



شکل ۲. دستگاههای مختصات مورد استفاده در مدلسازی (گمبرگ و الیس، ۱۹۹۴).

۳ تبدیل مختصات بین چارچوبهای مرجع ITRF اگر مختصات دکارتی برای نقطهای در چارچوب مرجع اول بهصورت (X<sub>1</sub>,X<sub>2</sub>,X<sub>3</sub>) باشد، مختصات متناظر در چارچوب مرجع دوم در غیاب حرکت صفحههای زمین ساختی از روابط زیر بهدست می آید:

$$X_{2} = T_{X} + (1+S)X_{1} + R_{Z}Y_{1} - R_{Y}Z_{1}$$

$$Y_{2} = T_{Y} - R_{Z}X_{1} + (1+S)Y_{1} + R_{X}Z_{1}$$

$$Z_{2} = T_{Z} + R_{Y}X_{1} - R_{Y}Y_{1} + (1+S)Z_{1},$$
(YY)

که  $T_X$ ،  $T_Z$  و  $T_Z$  به ترتیب بیانگر سه انتقال در امتداد محورهای X، Y و Z هستند که باعث انطباق مبدأ دو چارچوب برهم می شوند.  $R_X$ ،  $R_X$  و  $Z_R$  نیز بیانگر سه دوران حول محورهای X، Y و Z هستند که ترکیب آنها سه محور یک چارچوب را به صورت موازی با محورهای متناظر از چارچوب دیگر قرار می دهد. S نیز بیانگر تفاوت مقیاس بین دو چارچوب است.

با در نظر گرفتن حرکت صفحههای زمینساختی می توان معادلات تبدیل مابین دو چارچوب را به منظور در نظر گرفتن حرکت یک چارچوب نسبت به دیگری تعمیم

داد. بنابراین هرکدام از هفت پارامتر تعریف کننده تبدیل دو چارچوب، تابعی از زمان t میشوند؛ یعنی (t) ,  $T_X(t)$  میشوند؛ یعنی (S(t) ,  $R_X(t)$  ,  $R_Y(t)$  ,  $R_X(t)$  ,  $T_Z(t)$  ,  $T_Y(t)$  ,  $R_X(t)$  ,  $T_Z(t)$  ,  $T_Y(t)$  ,  $R_X(t)$  ,  $R_X(t)$  ,  $R_X(t)$  ,  $T_Z(t)$  ,  $T_Y(t)$  ,  $R_X(t)$  ,  $R_X(t)$  ,  $T_Z(t)$  ,  $T_Y(t)$  , 

$$R_{X}\left(t\right) = R_{x}\left(t_{0}\right) + \left(dR_{x}/dt\right)\left(t-t_{0}\right), \qquad (\Upsilon\Upsilon)$$

که

$${}^{\prime}{}_{t_{0}}$$
: دوران در لحظه  ${}^{\prime}{}_{t_{0}}$ 

X : نرخ زمانی تغییرات دوران حول محور <math>X تبدیل تعمیمیافته شامل ۱۵ پارامتر است. دو پارامتر برای هر کدام از هفت تابع خطی و زمان مرجع  $t_0$ . از تعمیم ساده فوق برای تبدیل مختصات بین چارچوبهای مرجع گوناگون استفاده می شود. پارامترهای تبدیل از مدلسازی، در جدول ۱ عرضه شده است.

۴ تبدیل مختصات بین چارچوب ITRF2000 و WGS84

تفاوت TTRF2000 و WGS84 به تفاوت تعریف دو سامانه و حرکتهای زمینساختی برمی گردد. تفاوت مختصات یک نقطه بین این دو سامانه در منطقه ایران بیشتر از یک متر نیست. با استفاده از یک تبدیل هفت پارامتری میتوان اختلاف بین دو سامانه را مدلسازی کرد. برای این منظور میتوان از دو مدل تبدیل بورسا- ولف (بورسا، ۱۹۶۲؛ ولف، ۱۹۶۳) و مالدنسکی – بادکاس (مالدنسکی و همکاران، ۱۹۶۲؛ بادکاس، ۱۹۶۹) استفاده کرد.

مدل متشابه هفت پارامتری بورسا- ولف برای تبدیل مختصات دکارتی سهٔبعدی بین چارچوبهای ماهوارهای در مقیاس جهانی مناسب است. این تبدیل شامل انتقال

مختصات مرکز زمین در فضای سه *بعدی (X*<sub>0</sub>, *X*<sub>0</sub>, *Z*<sub>0</sub>)، دوران *بُر*دار موقعیت ( rx, ry, rz) و تغییر مقیاس ( ds) است و به صورت ماتریسی زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{W} = \begin{bmatrix} X_{0} \\ Y_{0} \\ Z_{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1+ds & rz & -ry \\ -rz & 1+ds & rx \\ ry & -rx & 1+ds \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{I}, \quad (\Upsilon \mathfrak{F})$$

که اندیس های پایینی W و I به ترتیب نشان دهنده چارچوب WGS84 و ITRF هستند. ماتریس دوران سه در سه رابطه فوق ساده شده سه ماتریس دوران مجزا است، با این فرض که دوران های محوری کوچکاند (کوچک تر از پنج ثانیه کمانی برای اکثر شبکه های ژئودزی) و می توان از ترمهای بسط به سری دوجمله ای سینوس و کسینوس بر حسب رادیان استفاده کرد.

**جدول ۱**. پارامترهای تبدیل از ITRF2000 به ITRFهای قبل و بعد که در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است (بوچر و همکاران، ۲۰۰۴؛ التمیمی و همکاران، ۲۰۰۲).

شماره ITRF	$T_1$	$T_2$	T <sub>3</sub>	S	$\mathbf{R}_1$	$\mathbf{R}_2$	<b>R</b> <sub>3</sub>	ایم ک
	(cm)	(cm)	(cm)	(ppb)	(mas)	(mas)	(mas)	- 54
ITRF2008	-1.90	-1.70	-10.50	1.34	0.00	0.00	0.00	2000.0
نرخ	0.10	0.10	-1.80	0.08	0.00	0.00	0.00	
ITRF2005	0.10	-0.80	-5.80	0.40	0.00	0.00	0.00	2000.0
نرخ	-0.20	0.10	-1.80	0.08	0.00	0.00	0.00	
ITRF97	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
نرخ	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF96	0.67	-0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
نرخ	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF94	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
نرخ	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF93	1.27	0.65	-2.09	1.95	-0.39	0.80	-1.14	1988.0
نرخ	-0.29	-0.02	-0.06	0.01	-0.11	-0.19	0.07	
ITRF92	1.47	1.35	-1.39	0.75	0.0	0.00	-0.18	1988.0
نرخ	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF91	2.67	2.75	-1.99	2.15	0.00	0.00	-0.18	1988.0
نرخ	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF90	2.47	2.35	-3.59	2.45	0.00	0.00	-0.18	1988.0
نرخ	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF89	2.97	4.75	-7.39	5.85	0.00	0.00	-0.18	1988.0
نرخ	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF88	2.47	1.15	-9.79	8.95	0.10	0.00	-0.18	1988.0
نرخ	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	

T <sub>1</sub> (m)	T <sub>2</sub> (m)	T <sub>3</sub> (m)	S (ppm)	<b>R</b> <sub>1</sub> (sec)	<b>R</b> <sub>2</sub> (sec)	<b>R</b> <sub>3</sub> (sec)
0.551±0.0028	-	-	0.004874±0.0050	-0.001063±0.0013	0.009047±0.0016	-0.011414±0.0014
	$0.373 \pm 0.0028$	0.817±0.0028				

جدول ۲. پارامترهای تبدیل از UTRF2000 به WGS84 با استفاده از مدل بورسا- ولف که در مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل مالدنسکی- بادکاس نیز یک مدل متشابه هفت پارامتری مختصات دکارتی سه بُعدی بین چارچوبها است و برای تبدیل بین چارچوبهای زمینی و ماهوارهای مناسب و به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{W} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ M \\ Y \\ m \\ Z \\ m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + ds & rz & -ry \\ -rz & 1 + ds & rx \\ ry & -rx & 1 + ds \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ I - Y \\ Z \\ I - Z \\ m \end{bmatrix},$$
(Ya)

که ( ΔΖ, ΔΥ, ΔΔ) انتقال بین مرکز دو چارچوب است. ماتریس دوران و تغییر مقیاس با مدل بورسا- ولف فرقی ندارد. تنها تفاوت بین دو مدل، انتخاب نقطهای است که در آن دورانهای محوری و تغییر مقیاس صورت می گیرد. چون در مدل مالدنسکی- بادکاس این نقطه مرکز شبکه است، درنتیجه این مدل انتخاب مناسب تری برای تبدیل بین چارچوبهای زمینی و ماهوارهای است. به لحاظ نظری با استفاده از یک رشته اطلاعاتی، این دو مدل بایستی به نتایج یکسانی برای تعیین مجموعه پارامترهای تبدیل منجر شوند.

از بین این دو مدل، مدل بورسا – ولف به نتایج بهتری در منطقه ایران منجر و برای تعیین پارامترهای تبدیل توصیه شده است. به همین دلیل در مدل عرضه شده نیز از مدل بورسا – ولف برای تبدیل مختصات بین دو سامانه استفاده شده است. پارامترهای تبدیل برآورد شده با استفاده از مدل تبدیل بورسا – ولف در جدول ۲ آمده است.

۵ مراحل طراحی مدل و کاربردهای آن

۵–۱ پیش بینی سرعت

پیش بینی سرعت در هر موقعیت از سطح زمین در محدوده فلات ایران اساسی ترین کاربرد مدل عرضه شده است. در این قسمت اطلاعات بین لرزهای به مدل اِعمال می شود و جابه جایی های بین لرزهای متناظر با آنها با قید میدان سرعت GPS شبکه ژئودینامیک سراسری ایران با مشاهدات دوره ای ماسون (۲۰۰۷) در هر نقطه به کمک مدل و با روابط تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) به صورت اوراسیا فیکس محاسبه می شود.

این مرحله از مدلسازی با سعیوخطا، بهویژه در مورد نرخ لغزش و عمق قفل شدگی گسل های عمده در منطقه مورد بررسی بین میدان سرعت مدل و GPS صورت می گیرد. مدلسازی طی مراحل گوناگون طراحی شد و نتایج حاصل در هر مرحله با میدان سرعت GPS شبکه ژئودینامیک سراسری ایران در چارچوب مرجع اوراسیا فیکس از مقاله ماسون و همکاران (۲۰۰۷) مقایسه شد (شکل ۳). مقادیر عددی مؤلفه های میدان سرعت GPS به همراه دقت و همبستگی آنها در جدول ۳ قابل مشاهده است. بهمنظور آغاز مدلسازی میدان سرعت دائم و بین لرزهای در منطقه مورد بررسی، نخست فقط گسلش های بین صفحه های زمین ساختی نوبیا، سومالی، هند و دور فلات آناتولی در مدلسازی وارد شد. موقعیت این گسل،ها مطابق شکل ۴- الف و جهت و مقدار لغزش نيز با توجه به سازو کار ژرفي زمين لرزهها (شکل ۴- ب) با استفاده از مدلهای موجود حرکت صفحات زمین ساختی مانند REVEL (سلا، ۲۰۰۲) یا NUVEL-1A (دیمتز،



**شکل ۳.** میدان سرعت GPS (بردارهای سرخ) نسبت به اوراسیا با بیضی خطای ٪۹۵ در منطقه ایران برگرفته از مقاله ماسون و همکاران (۲۰۰۷) که بهمنزلهٔ قید در مدلسازی حرکتهای دائم و بینلرزهای مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴. خلاصه اطلاعات زمینساختی و لرزهزمینساختی منطقه مورد بررسی که در مدلسازی حرکت دائمی و بینلرزهای در منطقه فلات ایران مورد استفاده قرار گرفته است. (الف) نقشه توپوگرافی و زمینساخت ساده شده منطقه مورد بررسی در محل برهمکنش صفحههای زمینساختی نوبیا، سومالی، عربستان و اوراسیا. (با تغییر از رایلینگر و همکاران، ۲۰۰۶) (ب) سازوکار ژرفی زمینلرزهها در منطقه مورد بررسی از فهرستنامهٔ هاروارد در بازه زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ (رایلینگر و همکاران، ۲۰۰۶).

Sito	long.	lat.	Ve	Vn	<sub>e</sub> σ	$\sigma_{n}$	Corr	Res. E	Res. N
Site	(°E)	(°N)	(mm/yr)	(mm/yr)	(mm/yr)	(mm/yr)	Coll.	(mm/yr)	(mm/yr)
ALIS	51.082	28.919	1.19	20.65	0.89	0.86	0.024	-2.53	-0.12
ARDA	53.822	32.313	-0.28	13.60	0.86	0.84	0.023	-0.73	1.83
BAZM	60.180	27.865	6.24	03.20	2.02	1.65	0.018	1.50	0.96
BAHR	50.608	26.209	4.21	20.45	0.89	0.87	0.026	-0.38	0.37
BIJA	47.930	36.232	-1.79	13.09	0.95	0.92	0.014	-1.46	0.83
CHAB	60.694	25.300	5.05	07.23	1.11	1.02	0.024	1.00	1.08
DAMO	47.744	39.513	7.45	15.31	0.94	0.91	0.013	1.67	1.40
HARA	54.608	30.079	1.68	13.58	0.98	0.96	0.023	-1.06	1.18
ILAM	46.427	33.648	-3.14	16.46	0.97	0.93	0.016	-1.68	-0.73
JASK	57.767	25.636	3.52	12.62	1.04	1.00	0.026	-1.14	0.67
KASH	58.464	35.293	0.74	05.71	0.87	0.84	0.019	0.96	2.37
KERM	57.119	30.277	1.42	16.30	1.07	0.99	0.024	-1.59	2.19
KHAS	56.233	26.208	5.79	25.50	1.01	0.98	0.025	0.57	3.30
KHOS	48.409	30.246	0.58	19.10	0.98	0.95	0.018	-2.04	0.15
KORD	54.199	36.860	-2.53	07.48	0.98	0.94	0.017	-0.25	1.35
KSHA	51.255	34.150	-1.18	12.69	0.95	0.93	0.017	-1.80	-0.10
LAMB	54.004	26.883	2.52	20.96	1.18	1.00	0.019	-2.23	1.33
MAHM	52.285	36.588	-2.43	06.45	1.60	1.56	0.013	-0.73	-0.66
MIAN	46.162	36.908	-1.66	13.70	0.95	0.91	0.013	-1.61	1.73
MSHN	59.480	36.335	0.29	02.70	1.36	1.28	0.016	0.79	-0.20
MUSC	58.569	23.564	8.85	25.95	1.11	1.02	0.022	2.50	2.00
NSSP	44.503	40.226	2.23	07.17	1.29	1.21	0.007	-0.02	-1.13
RAZD	55.800	28.330	3.76	14.70	1.04	1.00	0.022	-1.32	0.66
ROBA	56.070	33.369	1.30	10.67	0.97	0.95	0.020	0.24	2.39
SEMN	53.564	35.662	0.28	09.04	0.96	0.93	0.018	-1.13	-0.08
SHAH	50.748	32.367	-1.47	12.65	0.96	0.93	0.018	-2.21	-1.69
SHIR	57.308	37.814	-1.80	03.54	0.96	0.95	0.018	0.90	-0.17
TEHN	51.334	35.697	0.19	11.63	1.01	1.00	0.015	-1.54	-0.84
YAZT	61.034	36.601	0.72	00.97	0.96	0.95	0.018	0.63	-0.19
ZABO	61.517	31.049	1.97	02.01	1.08	0.98	0.022	-0.35	0.16

**جدول ۳**. نامها و مؤلفههای شرقی و شمالی میدان سرعت GPS (Ve, Vn) شبکه غیردانم ژئودینامیک سراسری ایران با دقت (σ<sub>e</sub>, σ<sub>n</sub>) و همبستگی در چارچوب مرجع اوراسیا فیکس از مرجع ماسون و همکاران (۲۰۰۷). ستونهای نهم و دهم مقادیر باقیمانده سرعتها را برای هر ایستگاه GPS در حالتی که مدل-سازی حرکتهای دانم و بین لرزهای بهترین انطباق را با میدان سرعت GPS دارد (rms = ۰/۳۵ mm/yr) نشان میدهد.

میدان سرعت GPS، بردارهای مشکی) را همراه با میدان خطای درونیابی شده بین مقادیر اسکالر باقیماندهها (با رنگ سرخ) که بیانگر میزان منطبق نبودن دو میدان سرعت است نشان میدهد.

استفاده از این شیوه منطبق نبودن دو میدان، باعث تشخیص راحت مناطق با منطبق نبودن زیاد میشود و یک روش قابلاعتماد برای تشخیص خطاهای سامانمند در گروهی از بردارها و بهبود سامانمند مدل است. مطابق شکل ۵- ج مقادیر باقیماندهها، بهویژه در جنوب غربی و جنوب ایران زیاد است. مدلسازی اولیه نشانگر تأثیر و ضرورت در نظر گرفتن گسلهای اطراف صفحه عربستان ۱۹۹۴) محاسبه شده است. شکل ۵ نتایج مدلسازی اولیه میدان سرعت دائم و بینلرزهای در منطقه مورد بررسی را نشان میدهد. شکل ۵- الف موقعیت و نرخ لغزش گسلهای انتخابی با نرخهای لغزش مربوط (بردارهای آبی) را نشان میدهد. مطابق شکل ۵- ب مدل اولیه میدان سرعتی را در راستای جنوب غرب به شمال شرق در ایران ایجاد کرده است (بردارهای مشگی) و انطباق خوبی با میدان سرعت GPS شبکه ژئودینامیک سراسری ایران ربردارهای سرخ) ندارد. دامنه میدان سرعت مدل در راستای جنوب غرب به شمال شرق کم می شود. شکل ۵حتى سهم گسل هاى اطراف صفحه عربستان خيلي بيشتر از

سهم گسلهای اطراف فلات آناتولی است.

و فلات آناتولی در تولید میدان سرعت GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران است، بهنحویکه



شکل ۵. مدلسازی اولیه میدان سرعت دائم و بینلرزهای در منطقه موردبررسی. (الف) فقط گسلشهای بین صفحههای زمینساختی نوبیا، سومالی، عربستان، هند و دور فلات آناتولی در مدلسازی وارد شدهاند. جهت و مقدار لغزش (بردارهای آبی) در گسلها با استفاده از مدلهای موجود حرکت صفحههای زمینساختی مانند REVEL2000 (سلا، ۲۰۰۲)یا NUVEL-1A (دیمتز، ۱۹۹۴) محاسبه شده است. (ب) مدل اولیه میدان سرعتی را در راستای جنوب غرب به شمال شرق در ایران ایجاد کرده (بردارهای مشگی) و انطباق خوبی با میدان سرعت GPS شبکه ژئودینامیک سراسری ایران (بردارهای سرخ) ندارد. دامنه میدان سرعت مدل در راستای جنوب غرب به شمال شرق کم میشود. (ج) مقادیر باقیماندهها (تفاضل میدان سرعت مدل از میدان سرعت (GPS) که به ویژه در جنوب غرب و جنوب ایران زیاد است.

در ادامه، گسلهای فعال عمده مناطق داخلی ایران برای مدلسازی حرکتهای دائم و بینلرزهای انتخاب شدند. برای این منظور نخست مطابق شکل ۶- الف زمینساخت و سینماتیک ایران به صورت طرحوار در منطقه برخورد مایل صفحههای زمینساختی عربستان و اوراسیا در نظر گرفته شد. در این شکل بردارهای سرخ نشاندهنده حرکت نسبت به اوراسیا هستند و نحوه نشاندهنده حرکت نسبت به اوراسیا هستند و نحوه میکند. خطوط مشگی نحوه حرکت و تغییرشکل را در مناطق مربوط به گسلهای عمده نشان میدهند. خطوط زرد نیز جهت لغزش گسلهای امتدادلغز را نشان میدهند (هولینقزورف و همکاران، ۲۰۱۰). سپس گسلهای فعال

عمده براساس شکل ۶- الف و نقشه گسل های فعال ایران (حسامی و جمالی، ۲۰۰۶) برای مدلسازی نهایی حرکتهای دائم و بین لرزه ای در منطقه ایران انتخاب شدند. گسل های انتخابی نهایی در شکل ۶- ب قابل مشاهده اند. گسل های فعال انتخابی از داخل ایران با در نظر گرفتن موقعیت (شکل ۶- ب) و جهت حرکت آنها با استفاده از سازوکار ژرفی زمین لرزه های رخ داده (شکل ۴- ب) به تدریج به مدل اولیه اضافه می شود و با سعی و خطا در نرخ لغزش و عمق قفل شد گی گسل ها تلاش شد تا بردار باقی مانده ها بین میدان سرعت مدل و GPS حداقل شود. بدین ترتیب مدل نابر جایی بهینه که تطابق خوبی با



شکل ۶. انتخاب گسلهای فعال عمده مناطق داخلی ایران برای مدلسازی نهایی حرکت دائم و بینلرزهای در محدوده فلات ایران. (الف) نقشه طرحوار نشاندهنده زمین ساخت و سینماتیک ایران در منطقه برخورد مایل صفحههای زمین ساختی عربستان و اوراسیا. بردارهای سرخ نشاندهنده حرکت نسبت به اوراسیا هستند و نحوه کوتاه شدگی شمالی – جنوبی را در منطقه برخورد مایل صفحههای زمین ساختی عربستان و اوراسیا. بردارهای سرخ نشاندهنده حرکت نسبت به اوراسیا هستند و خطوط زرد جهت لغزش گسلهای امتدادلغز را نشان می دهند (هولینقزورف و همکاران، ۲۰۱۰). (ب) گسلهای فعال عمده انتخابی (خطوط سبز) براساس شکل ۵ الف و نقشه گسلهای فعال ایران (حسامی و جمالی، ۲۰۰۶) برای مدل سازی نهایی حرکتهای دائم و بین لرزهای در منطقه ایران. عبارتهای اختصاری مورد استفاده در این شکل عبارت اند از: گسل شمال تبریز (NAF)، خلیج کورا (KU)، گسل تالش (T)، گسل اصلی جوان (MRF)، گسل المی فعال عمده انتخابی (نحفازه را نشان در این شکل عبارت اند از: گسل شمال تبریز (Da)، گسل تالش (T)، گسل اصلی جوان (MR)، گسل امی فعال عمده ایران. عبارته ای گسل درونه (DD)، گسل دشت بیاض (Da)، گسل آبیز (Ab)، گسل ناه (Ne)، گسل اصلی جوان (MZ)، گسل میناب (Mi)، گسل دهشیر (De)، راندگی اصلی زاگرس (MZT)، گسل دان دانی)، گسل کاشان (Ka)، گسل امین (MZT)، گسل امی میناب (MZ)، گسل دهشیر (MZ)، دامی ای راندگی اصلی زاگر (MZT)، گسل کازرون (Kaz)، گسل کاشان (Ka).

ایران، میدان سرعت مدل را تقویت کردهاند و آن را از

راستای جنوب غربی – شمال شرقی به راستای جنوبی-شمالی و جنوب جنوب شرقی – شمال شمال-غربی دوران

میدهند. برای آزمودن صحت مدلسازی، تساوی آماری

کل گسلهای مربوط به مدل بهینه با نرخهای لغزش مربوط (بردارهای آبی) برای مدلسازی نهایی میدان سرعت دائم و بینلرزهای در منطقه مورد بررسی را نشان میدهد. مقایسه شکلهای ۵- ب و ۷- ب نشان میدهد که مطابق مدل نابرجایی بهینه، گسلشهای محدوده فلات



شکل ۷. مدلسازی نابرجایی بهینه میدان سرعت دائمی و بینلرزهای در منطقه مورد بررسی. (الف) گسلشهای داخلی ایران بهتدریج به مدل اولیه اضافه شده و با سعیوخطا روی نرخ لغزشها و عمق قفلشدگی، مدل نابرجایی بهینه بهدست میآید. (ب) گسلشهای محدوده فلات ایران میدان سرعت مدل را تقویت میکنند و از راستای جنوب غربی – شمال شرقی به راستای جنوبی – شمالی و جنوب جنوب شرقی – شمال شمال غربی دوران میدهند. (ج) در مورد اکثر ایستگاههای GPS شبکه ژئودینامیک سراسری ایران مقادیر باقیماندهها در محدوده بیضی خطای ٪۹۵ مشاهدات GPS است.

زاگرس، ماسون و همکاران (۲۰۰۶)، جمور و همکاران (۲۰۱۱) در منطقه شمال غرب ایران، تاتار و همکاران (۲۰۰۲) در منطقه زاگرس مرکزی ، ورنانت و همکاران (۲۰۰۴) و جمور و همکاران (۲۰۱۰) در منطقه خاورمیانه و ورنانت و همکاران (۲۰۰۴) در منطقه خاورمیانه و مکلاسکی و همکاران (۲۰۰۴) در منطقه شرق مدیترانه و قفقاز قابل استخراج است. با توجه به اینکه بردارهای سرعت GPS در منابع یادشده به ایستگاههای گوناگونی از اوراسیا فیکس شدهاند، یکسانسازی ایستگاههایی از اوراسیا که بردارهای سرعت GPS به آنها فیکس می شوند با استفاده از مفهوم قطب اولر (هفتی، ۲۰۰۷) قبل از شروع مدلسازی میدان سرعت دائم و بینلرزهای در منطقه مورد بررسی ضروری است.

مدلسازی میدان سرعت دائم و بین لرزهای نشان میدهد که حدود ۳۰ درصد مؤلفه های میدان سرعت GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران با گسلش های داخلی ایران، ۶۰ درصد آن با صفحه عربستان و ۱۰ درصد آن با گسلش های فلات آناتولی تأمین میشود.

در ادامه، میدان سرعت مدلسازی شده با استفاده از قطب اولر اوراسیا نسبت به چارچوب ITRF2000 که از سوی ورنانت (۲۰۰۴) تعیین شده است (جدول ۴) به این چارچوب تبدیل شد. میدان سرعت حاصل در چارچوب مرجع ITRF2000 را میتوان یا استفاده از پارامترهای تبدیل ذکرشده در جدولهای ۲ و ۳ به WGS84 یا هر ITRF دیگری تبدیل کرد.

استفاده قرار گرفت. بدین منظور تفاضل بردار سرعت حاصل از مدل و مشاهدات GPS بایستی در محدوده بیضی خطای مشاهدات GPS قرار گیرد. شکل ۷- ج نشان میدهد که در مورد اکثر ایستگاههای GPS شبکه ژئودینامیک سراسری ایران مقادیر باقیماندهها در محدوده بیضی خطای ۹۵٪ مشاهدات GPS است، یعنی در مورد اکثر مشاهدات این تساوی آماری برقرار است. جذر میانگین مربعات (rms) خطای مدل سازی حرکتهای دائم و بینلرزهای برای مدلی که بهترین انطباق را با مشاهدات GPS داشت برابر ۳۵ mm/yr محاسبه شد. ستونهای نهم و دهم جدول ۳ مقادیر باقیمانده سرعتها را برای هر ایستگاه GPS درحالتی که مدلسازی بهترین انطباق را با میدان سرعت GPS دارد نشان میدهد. منطبق نبودن دو میدان سرعت را می توان به اثرات سامانمند موجود در مشاهدات GPS و بهویژه مشاهدات دورهای نیز نسبت داد (برای مثال، اثرات فصلی یا اثرات ناشی از فعالیتهای انسانی). بهمنظور رفع این مشکل می توان از مشاهدات پیوسته GPS با فیلتر مکانی (ودوینسکی و همکاران، ۱۹۹۷) و فیلتر آنالیز مؤلفه اصلی (آکی و شولز، ۲۰۰۳؛ سویج، ۱۹۸۸) بهجای مشاهدات دورهای استفاده کرد. همچنین بهبود دقت نتایج مدلسازی میدان سرعت دائم و بین لرزهای با استفاده از شبکههای محلی GPS نیز پیشنهاد می شود. مشاهدات شبکه پیوسته و محلی در محدوده ایران از منابعی نظیر بایر و همکاران (۲۰۰۶) و پیرت و همکاران (۲۰۰۹) در منطقه بین زاگرس و مکران، حسامی و همکاران (۲۰۰۶)، توکلی و همکاران (۲۰۰۶) در منطقه

**جدول ۴**. قطب دوران اوراسیا در چارچوب ITRF2000 مورد استفاده در تبدیل میدان سرعت حرکت دائم و بینلرزهای صفحههای زمینساختی مدل از سامانهٔ اوراسیا – فیکس به چارچوب ITRF2000 (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴).

نرخ (°Myr <sup>-1</sup> )	طول جغرافيايي (E°)	عرض جغرافیایی (N°)	صفحه زمينساختي
$0.26\pm0.01$	$-100,79 \pm 1.9$	$56.11 \pm 1.4$	اوراسيا

۲-۵ پیشینی جابهجایی
 پیشینی جابهجایی در یک نقطه بین دو مقطع زمانی T<sub>1</sub>

و T<sub>2</sub> با ضرب سرعت مدلسازی شده برای آن نقطه در فاصله زمانی دو مقطع و سپس اضافه کردن جابهجایی های لحظهای نقطه در اثر زمین لرزه های احتمالی در بازه زمانی مورد نظر صورت می گیرد. برای محاسبه جابه جایی لحظه-ای نقطه در اثر زمین لرزه نیز از روابط تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) استفاده می شود.

در این مرحله بهمنظور مدلسازی، از زمین لرزههای با بزرگی 5.5 < M استفاده شد. بهدلیل تعداد زیاد این زمینلرزهها فقط زمینلرزههای با بزرگی M > 6.5 در جدول ۵ فهرست شده است. پارامترهای هندسی گسلش را می توان از اطلاعات موجود در مقالات منتشر شده در مورد زمینلرزهها بهدست آورد. در مواردی که اطلاعاتی از زمینلرزه در دسترس نباشد، از روابط تجربی ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴)، نوروزی (۱۹۸۵) یا روابط نیمه تجربی هایون و خیاخین (۲۰۰۳) برای برآورد پارامترهای هندسی گسلش ها استفاده می شود. پارامترهای هندسی بر آورد شده برای گسلش های ناشی از زمین لرزهها در قالب پایگاه داده اطلاعاتی برای مدل در نظر گرفته شده است. ستونهای ۶ تا ۸ جدول ۵ پارامترهای هندسی گسلشهای ناشی از زمینلرزهها را برای زمینلرزههای با بزرگی 6.5 < M نشان میدهد. در بررسی زمین لرزههای انتخابی براساس تحقیق زارع (۱۹۹۹)، برای بزرگای کمتر از ۴، M<sub>b</sub> و بیش از ۴، M<sub>s</sub>، درحکم معادل، M<sub>w</sub> انتخاب شده است.

### ۵-۳ بهروزرسانی موقعیت مسطحاتی

بهمنظور بهروزرسانی موقعیت، بایستی مختصات نقطه در چارچوب موردنظر، مقطع زمانی موقعیت نقطه، T<sub>1</sub>، مقطع زمانی که موقعیت نقطه مدنظر است، T<sub>2</sub>، به مدل معرفی شود. از مدل بردار جابهجایی بین دو مقطع T<sub>1</sub> و T<sub>2</sub>

محاسبه می شود و با اضافه کردن آن به مختصات اولیه نقطه، مختصات مسطحاتی نقطه در مقطع زمانی T<sub>2</sub> بهدست می آید.

# ۴-۵ بـهروزرسـانی مـشاهدات ژئودتیـک (طـول و زاویه)

بهمنظور بهروزرسانی مشاهدات مسطحاتی یعنی طول و زاویه، نوع مشاهده، مقدار مشاهداتی و تاریخ مشاهده، مختصات نقطه یا نقاطی که مشاهده در آنها صورت گرفته و تاریخ بهروزرسانی مشاهدات به مدل معرفی میشود. با بر آورد تغییر مختصات بین دو مقطع زمانی در نقاط مربوط به مشاهده صورت گرفته، تغییر مشاهده ژئودتیکی قابل محاسبه است.

مختصات نقاط مشاهداتی را می توان در چارچوبهای گوناگون ITRF و یا بیضوی WGS84 وارد مدل کرد. موقعیت نقاط خروجی نیز در دستگاههای مختصات گوناگون قابل محاسبه است.

> ۶ نتیجه گیری برای عملہ ساختن مدا

برای عملی ساختن مدلسازی از میدان سرعت ۳۰ ایستگاه GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران که تقریباً بهطور یکنواخت در سراسر ایران پراکنده شده است درحکم معیار استفاده شد. با استفاده از نتایج این مدلسازی می توان سرعتها، جابهجاییها، تغییر موقعیتهای مسطحاتی و تغییر مشاهدات ژئودتیکی (طول و زاویه) را در محدوده بین ۴۵ تا ۶۲ درجه طول جغرافیایی شرقی و ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی و در بازههای زمانی دلخواه پیش بینی کرد.

مدلسازی میدان سرعت دائم و بین لرزهای در محدوده فلات ایران نشان میدهد که حدود ۳۰ درصد مؤلفههای میدان سرعت GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران با گسلشهای داخلی ایران، ۶۰ درصد آن

M، برگرفته از فهرستنامهٔ زمینلرزه پژوهشگاه بینالمللی زلزلهشناسی و مهندسی زلزله که در مدل-	<b>جدول ۵</b> . زمینلرزههای رخ داده در منطقه ایران با 6.5 < s
سلش یعنی طول، عرض و مقدار نابرجایی ناشی از زمینلرزهها با استفاده از روابط تجربی ولز و	سازی مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای هندسی گ
	کوپراسمیت (۱۹۹۴) و نوروزی (۱۹۸۵) محاسبه شده است.

$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Date	Lat.	Lon.	Mag.	Ref.	Length	Width (km)	Dislocation
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $				(M <sub>s</sub> )		(km)		(m)
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1930/05/06	38.24	44.60	7.2	AMB	78.09	24.86	2.13
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1934/06/13	27.63	62.64	6.6	AMB	30.90	13.46	0.40
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1945/11/27	25.02	63.47	8.0	AMB	226.83	72.70	26.69
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1946/11/04	39.32	55.20	6.9	AMB	49.12	18.29	0.92
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1947/08/05	25.25	63.20	7.0	AMB	48.37	22.32	2.66
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1947/09/23	33.67	58.67	6.8	AMB	42.09	16.51	0.69
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1948/10/05	37.88	58.55	7.2	AMB	78.09	24.86	2.13
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1953/02/12	35.39	55.08	6.5	A28	26.47	12.15	0.30
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1957/07/02	36.07	52.47	6.8	AMB	35.51	17.63	17.01
1958/08/16 $34.30$ $48.17$ $6.6$ AMB $33.38$ $12.05$ $0.32$ $1961/06/11$ $27.78$ $54.51$ $6.5$ AMB $22.34$ $12.37$ $0.08$ $1962/09/01$ $35.71$ $49.81$ $7.2$ AMB $84.37$ $20.55$ $1.51$ $1968/08/31$ $34.04$ $58.96$ $7.1$ EHB $72.29$ $18.80$ $1.17$ $1972/04/10$ $28.41$ $52.79$ $6.7$ EHB $30.42$ $15.66$ $2.89$ $1976/11/24$ $39.08$ $44.03$ $7.0$ EHB $57.33$ $20.26$ $1.22$ $1977/03/21$ $27.58$ $56.37$ $6.7$ EHB $36.06$ $14.91$ $0.52$ $1978/09/16$ $33.24$ $57.38$ $7.4$ EHB $89.75$ $35.80$ $6.70$ $1979/01/16$ $33.90$ $59.47$ $6.5$ EHB $28.60$ $11.03$ $0.25$ $1979/11/27$ $34.06$ $59.76$ $7.1$ EHB $72.29$ $18.80$ $1.17$ $1980/05/04$ $38.05$ $49.02$ $6.6$ EHB $30.90$ $13.46$ $0.40$ $1981/07/28$ $29.97$ $57.77$ $7.3$ EHB $98.47$ $22.46$ $1.96$ $1990/06/20$ $36.99$ $49.35$ $7.7$ ISC $142.68$ $51.01$ $13.40$ $1997/02/04$ $37.73$ $57.31$ $6.5$ EHB $30.90$ $13.46$ $0.40$ $1997/02/04$ $37.73$ $57.21$ $6.6$ EHB $30.90$ $13.46$ $0.40$ $1$	1957/12/13	34.58	47.82	6.7	AMB	38.96	13.17	0.41
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	1958/08/16	34.30	48.17	6.6	AMB	33.38	12.05	0.32
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1961/06/11	27.78	54.51	6.5	AMB	22.34	12.37	0.08
1968/08/31 $34.04$ $58.96$ 7.1EHB $72.29$ $18.80$ $1.17$ 1972/04/10 $28.41$ $52.79$ $6.7$ EHB $30.42$ $15.66$ $2.89$ 1976/11/24 $39.08$ $44.03$ $7.0$ EHB $57.33$ $20.26$ $1.22$ 1977/03/21 $27.58$ $56.37$ $6.7$ EHB $36.06$ $14.91$ $0.52$ 1978/09/16 $33.24$ $57.38$ $7.4$ EHB $89.75$ $35.80$ $6.70$ 1979/01/16 $33.90$ $59.47$ $6.5$ EHB $28.60$ $11.03$ $0.25$ 1979/11/14 $33.96$ $59.73$ $6.6$ EHB $33.38$ $12.05$ $0.32$ 1979/11/27 $34.06$ $59.76$ $7.1$ EHB $72.29$ $18.80$ $1.17$ 1980/05/04 $38.05$ $49.02$ $6.6$ EHB $26.07$ $13.92$ $0.49$ 1981/06/11 $29.86$ $57.69$ $6.6$ EHB $30.90$ $13.46$ $0.40$ 1981/07/28 $29.97$ $57.77$ $7.3$ EHB $98.47$ $22.46$ $1.96$ 1983/04/18 $27.77$ $62.05$ $6.7$ EHB $30.90$ $13.46$ $0.40$ 1990/11/06 $28.24$ $55.46$ $6.6$ EHB $30.90$ $13.46$ $0.40$ 1997/05/10 $33.85$ $59.81$ $7.2$ EHB $84.37$ $20.55$ $1.51$ 1998/03/14 $30.14$ $57.59$ $6.6$ EHB $30.90$ $13.46$ $0.40$ 2000/12/06 $39.53$	1962/09/01	35.71	49.81	7.2	AMB	84.37	20.55	1.51
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1968/08/31	34.04	58.96	7.1	EHB	72.29	18.80	1.17
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1972/04/10	28.41	52.79	6.7	EHB	30.42	15.66	2.89
1977/03/21       27.58       56.37       6.7       EHB       36.06       14.91       0.52         1978/09/16       33.24       57.38       7.4       EHB       89.75       35.80       6.70         1979/01/16       33.90       59.47       6.5       EHB       28.60       11.03       0.25         1979/11/14       33.96       59.73       6.6       EHB       33.38       12.05       0.32         1979/11/27       34.06       59.76       7.1       EHB       72.29       18.80       1.17         1980/05/04       38.05       49.02       6.6       EHB       30.90       13.46       0.49         1981/06/11       29.86       57.69       6.6       EHB       30.90       13.46       0.40         1981/07/28       29.97       57.77       7.3       EHB       98.47       22.46       1.96         1983/04/18       27.77       62.05       6.7       EHB       30.90       13.46       0.40         1990/06/20       36.99       49.35       7.7       ISC       142.68       51.01       13.40         1990/11/06       28.24       55.46       6.6       EHB       30.90       13.46	1976/11/24	39.08	44.03	7.0	EHB	57.33	20.26	1.22
1978/09/1633.2457.387.4EHB89.7535.806.701979/01/1633.9059.476.5EHB28.6011.030.251979/11/1433.9659.736.6EHB33.3812.050.321979/11/2734.0659.767.1EHB72.2918.801.171980/05/0438.0549.026.6EHB30.9013.460.401981/06/1129.8657.696.6EHB30.9013.460.401981/07/2829.9757.777.3EHB98.4722.461.961983/04/1827.7762.056.7EHB36.0614.910.521990/06/2036.9949.357.7ISC142.6851.0113.401990/11/0628.2455.466.6EHB30.9013.460.401997/02/0437.7357.316.5EHB22.3412.370.081997/05/1033.8559.817.2EHB84.3720.551.511998/03/1430.1457.596.6EHB33.3812.050.321999/03/0428.2757.216.6EHB30.9013.460.402000/12/0639.5354.807.0EHB57.3320.261.222002/06/2235.6049.026.5EHB26.4712.150.302003/12/2629.0858.386.5HEES28.6011.03<	1977/03/21	27.58	56.37	6.7	EHB	36.06	14.91	0.52
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1978/09/16	33.24	57.38	7.4	EHB	89.75	35.80	6.70
1979/11/14         33.96         59.73         6.6         EHB         33.38         12.05         0.32           1979/11/27         34.06         59.76         7.1         EHB         72.29         18.80         1.17           1980/05/04         38.05         49.02         6.6         EHB         26.07         13.92         0.49           1981/06/11         29.86         57.69         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1981/07/28         29.97         57.77         7.3         EHB         98.47         22.46         1.96           1983/04/18         27.77         62.05         6.7         EHB         36.06         14.91         0.52           1990/06/20         36.99         49.35         7.7         ISC         142.68         51.01         13.40           1990/11/06         28.24         55.46         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1997/02/04         37.73         57.31         6.5         EHB         22.34         12.37         0.08           1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51	1979/01/16	33.90	59.47	6.5	EHB	28.60	11.03	0.25
1979/11/27       34.06       59.76       7.1       EHB       72.29       18.80       1.17         1980/05/04       38.05       49.02       6.6       EHB       26.07       13.92       0.49         1981/06/11       29.86       57.69       6.6       EHB       30.90       13.46       0.40         1981/07/28       29.97       57.77       7.3       EHB       98.47       22.46       1.96         1983/04/18       27.77       62.05       6.7       EHB       36.06       14.91       0.52         1990/06/20       36.99       49.35       7.7       ISC       142.68       51.01       13.40         1990/11/06       28.24       55.46       6.6       EHB       30.90       13.46       0.40         1997/02/04       37.73       57.31       6.5       EHB       22.34       12.37       0.08         1997/05/10       33.85       59.81       7.2       EHB       84.37       20.55       1.51         1998/03/14       30.14       57.59       6.6       EHB       30.90       13.46       0.40         2000/12/06       39.53       54.80       7.0       EHB       57.33       20.26	1979/11/14	33.96	59.73	6.6	EHB	33.38	12.05	0.32
1980/05/04         38.05         49.02         6.6         EHB         26.07         13.92         0.49           1981/06/11         29.86         57.69         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1981/07/28         29.97         57.77         7.3         EHB         98.47         22.46         1.96           1983/04/18         27.77         62.05         6.7         EHB         36.06         14.91         0.52           1990/06/20         36.99         49.35         7.7         ISC         142.68         51.01         13.40           1990/11/06         28.24         55.46         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1997/02/04         37.73         57.31         6.5         EHB         22.34         12.37         0.08           1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51           1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         33.38         12.05         0.32           1999/03/04         28.27         57.21         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40	1979/11/27	34.06	59.76	7.1	EHB	72.29	18.80	1.17
1981/06/11         29.86         57.69         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1981/07/28         29.97         57.77         7.3         EHB         98.47         22.46         1.96           1983/04/18         27.77         62.05         6.7         EHB         36.06         14.91         0.52           1990/06/20         36.99         49.35         7.7         ISC         142.68         51.01         13.40           1990/11/06         28.24         55.46         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1997/02/04         37.73         57.31         6.5         EHB         22.34         12.37         0.08           1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51           1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         33.38         12.05         0.32           1999/03/04         28.27         57.21         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22	1980/05/04	38.05	49.02	6.6	EHB	26.07	13.92	0.49
1981/07/28         29.97         57.77         7.3         EHB         98.47         22.46         1.96           1983/04/18         27.77         62.05         6.7         EHB         36.06         14.91         0.52           1990/06/20         36.99         49.35         7.7         ISC         142.68         51.01         13.40           1990/11/06         28.24         55.46         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1997/02/04         37.73         57.31         6.5         EHB         22.34         12.37         0.08           1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51           1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25	1981/06/11	29.86	57.69	6.6	EHB	30.90	13.46	0.40
1983/04/18         27.77         62.05         6.7         EHB         36.06         14.91         0.52           1990/06/20         36.99         49.35         7.7         ISC         142.68         51.01         13.40           1990/11/06         28.24         55.46         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1997/02/04         37.73         57.31         6.5         EHB         22.34         12.37         0.08           1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51           1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	1981/07/28	29.97	57.77	7.3	EHB	<b>98.4</b> 7	22.46	1.96
1990/06/20         36.99         49.35         7.7         ISC         142.68         51.01         13.40           1990/11/06         28.24         55.46         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1997/02/04         37.73         57.31         6.5         EHB         22.34         12.37         0.08           1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51           1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         33.38         12.05         0.32           1999/03/04         28.27         57.21         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	1983/04/18	27.77	62.05	6.7	EHB	36.06	14.91	0.52
1990/11/06         28.24         55.46         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           1997/02/04         37.73         57.31         6.5         EHB         22.34         12.37         0.08           1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51           1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         33.38         12.05         0.32           1999/03/04         28.27         57.21         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	1990/06/20	36.99	49.35	7.7	ISC	142.68	51.01	13.40
1997/02/04         37.73         57.31         6.5         EHB         22.34         12.37         0.08           1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51           1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         33.38         12.05         0.32           1999/03/04         28.27         57.21         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	1990/11/06	28.24	55.46	6.6	EHB	30.90	13.46	0.40
1997/05/10         33.85         59.81         7.2         EHB         84.37         20.55         1.51           1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         33.38         12.05         0.32           1999/03/04         28.27         57.21         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	1997/02/04	37.73	57.31	6.5	EHB	22.34	12.37	0.08
1998/03/14         30.14         57.59         6.6         EHB         33.38         12.05         0.32           1999/03/04         28.27         57.21         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	1997/05/10	33.85	59.81	7.2	EHB	84.37	20.55	1.51
1999/03/04         28.27         57.21         6.6         EHB         30.90         13.46         0.40           2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	1998/03/14	30.14	57.59	6.6	EHB	33.38	12.05	0.32
2000/12/06         39.53         54.80         7.0         EHB         57.33         20.26         1.22           2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	1999/03/04	28.27	57.21	6.6	EHB	30.90	13.46	0.40
2002/06/22         35.60         49.02         6.5         EHB         26.47         12.15         0.30           2003/12/26         29.08         58.38         6.5         HEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         HEES         57.33         20.26         1.22	2000/12/06	39.53	54.80	7.0	EHB	57.33	20.26	1.22
2003/12/26         29.08         58.38         6.5         IIEES         28.60         11.03         0.25           2011/01/18         28.04         63.85         7.0         IIEES         57.33         20.26         1.22	2002/06/22	35.60	49.02	6.5	EHB	26.47	12.15	0.30
2011/01/18 28.04 63.85 7.0 HEES 57.33 20.26 1.22	2003/12/26	29.08	58.38	6.5	HEES	28.60	11.03	0.25
	2011/01/18	28.04	63.85	7.0	HEES	57.33	20.26	1.22

از صفحه عربستان و ۱۰ درصد آن از گسلش های فلات آناتولی تأمین می شود.

مدل عرضه شده در این تحقیق مدلی پویا است، چون ما را قادر می سازد تا با استفاده از آن روی زمین پویا تعیین موقعیت وابسته به زمان را عملی سازیم و از طرفی می توان با گذشت زمان مدل را کامل تر کرد. مدل طراحی شده دربرگیرنده حرکتهای مرتبط با صفحههای زمین ساختی شناور روی گوشته و زمین لرزهها است. با وارد کردن

دیگر انواع حرکتهای پوسته زمین از جمله فعالیتهای آتشفشانی، نشست زمین، بازگشت بعد از عصر یخبندان، بارگذاری و یا کاهش بار از پوسته، میتوان مدل را کامل تر کرد. پایگاه داده مورد استفاده برای پارامترهای گسلش در اثر زمین لرزهها در مدل نیز بایستی با وقوع هر زمین لرزه بزرگ بهروز شود. به شرط بهروزرسانی پایگاه داده مدل، این مدل ابزار بسیار مناسبی برای کاهش یا حذف اثرهای هم لرزه یا بعد لرزهای از میدان سرعت

V )

نوری، س.، وثوقی، ب.، و ابوالقاسم، ا. م.، ۱۳۸۸، مدلسازی میدان جابهجایی هملرزه یک گسل و تعیین حساسیت پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل به میدان جابهجایی آن: مجله فیزیک زمین و فضا، **۳۵** (۱)، ۸۹–۷۳-۵۹

- Aoki, Y., and Scholz C. H., 2003, Vertical deformation of the Japanese islands, 1996– 1999: J. Geophys. Res., 108, B5, 2257.
- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C., 2002, ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, J. Geophys. Res., **107**, B10, 2214, pp. 19.
- Ambraseys, N., and Melville, C., 1982, A History of Persian Earthquakes: Cambridge University Press, Cambridge.
- Armijo, R., Flerit, F., King, G., and Meyer, B., 2003, Linear elastic fracture mechanics explains the past and present evolution of the Aegean: Earth and Planetary Science Letters, 217, 85-95.
- Badekas, J., 1969, Investigations related to the establishment of a world geodetic system, Report 124, Department of Geodetic Science, Ohio State University, Columbus.
- Bayer, R., Chéry, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson F., Nilforoushan, F., Doerflinger, E., Regard, V., and Bellier, O., 2006, Active deformation in Zagros–Makran transition zone inferred from GPS measurements: Geophys. J. Int., 165, 373– 381.
- Boucher, C., Altamimi, Z., Sillard, P., and Feissel-Vernier M., 2004, The ITRF2000: IERS ITRS Centre, IERS Technical Note No.31, Verlag des Bundesamtes für Karthographic und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Bursa, M., 1962, The theory for the determination of the non-parallelism of the minor axis of the reference ellipsoid and the inertial polar axis of the Earth, and the planes of the initial astronomic and geodetic meridians from observations of artificial Earth satellites: Studia Geophysica et Geodetica, **6**, 209-214.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., and Stein, S., 1994, Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions: Geophys. Res. Lett., 21, 2191-2194.
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H.R., Ritz, J.-F., Hinderer, J., Hatam, Y.,

حاصل از پردازش مشاهدات شبکههای GPS غیردائم و یا دائم ژئودینامیکی در محدوده مدلسازی است.

با روند سعیوخطا، جذر میانگین مربعات (rms) خطای مدلسازی حرکتهای دائم و بینلرزهای برای مدلی که بهترین انطباق را با میدان سرعت GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران داشت برابر rm/yr محاسبه شد. با استفاده از مشاهدات پیوسته و شبکههای محلی GPS و پارامترهای هندسی دقیق گسلها شبکههای محلی که با مشاهدات RSAR در حالت بینلرزهای و با حل مسئله معکوس بهدست آمده باشند، می توان به نتیجه بهتری برای جذر میانگین مربعات خطای مدلسازی رسید.

بهمنظور مدلسازی حرکتهای هملرزه، پارامترهای هندسی گسلش یعنی طول، عرض و مقدار نابرجایی ناشی از زمین لرزه ها با استفاده از روابط تجربی ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) و نوروزی (۱۹۸۵) محاسبه شده است. با استفاده از مشاهدات GPS یا InSAR و با حل مسئله معکوس و استفاده از روش های بهینه سازی می توان به مقادیر دقیق تری برای این پارامترها رسید و دقت خروجی مدل را بالا برد.

منابع

1. .

. . . . . .

• 1 • 1

. . . (

Vernant, P., 2006, Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin: Earth and Planetary Science Letters, **252**, 180–188.

- McClusky, S., Balassanian, S., Barka A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, N., and Veis, G., 2000, Global positioning system constraints on the plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus: J. Geophys. Res. 105, 5695–5719.
- Meade, B. J., and Hager, B. H., 2005, Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements: J. Geophys. Res., **110**, B03403.
- Nowroozi, A. A., 1985, Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran. Bull. Seis. Soc. Am., **75**, 1327-1338.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space: Bulletin of the Seismological Society of America, **75**, 1135–1154.
- Pearson C., McCaffrey R., Elliott J. L., and Snay R., 2010, HTDP 3.0: Software for Coping with the Coordinate Changes Associated with Crustal Motion, Journal of Surveying Engineering, **136**(2), 80-90.
- Peyret, M., Djamour, Y., Hessami, K., Regard, V., Bellier, O., Vernant, P., Daignières, M., Nankali, H., Van Gorp, S., Goudarzi, M., Chéry, J., Bayer, R., and Rigoulay, M., 2009, Present-day strain distribution across the Minab-Zendan-Palami fault system from dense GPS transects, Geophys. J. Int., 179(2), 751-762.
- Reilinger R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., and Karam, G., 2006, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions: J. Geophys. Res., 111, B05411.
- Savage, J. C., 1988, Principal component analysis

Luck, B., Le Moigne, N., Sedighi, M., and Khorrami, F., 2010, GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran: Geophys. J. Int., **183**, 1287-1301.

- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. R., and Tavakoli, F., 2011, NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: Results from the Iranian permanent GPS network: Earth and Planetary Science Letters, **307**, 27-34.
- Flerit, F., Armijo, R., King, G., and Meyer, B., 2004, The mechanical interaction between the propagating North Anatolian Fault and the back-arc extension in the Aegean: Earth and Planetary Science Letters, **224**, 347–362.
- Gomberg J., and Ellis, M., 1994, Topography and tectonics of the central New Madrid seismic zone: Results of numerical experiments using a three-dimensional boundary-element program: J. Geophys. Res., 99, 20299-20310.
- Haiyun, W., and Xiaxin, T., 2003, Relationships between moment magnitude and fault parameters: theoretical and semi-empirical relationships: Earthquake engineering and engineering vibration, **2**, (2), 201-211.
- Hefty, J., 2007, Geo-kinematics of central and south-east Europe resulting from combination of various regional GPS velocity fields: Acta Geodyn. Geomater., **4**, 4 (148), 173-189.
- Hessami, K., and Jamali, F., 2006. Explanatory Notes to the Map of Major Active Faults of Iran. Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE), **8**, 1-11.
- Hessami, K., Nilforoushan, F., and Talbot, C. J., 2006, Active deformation within the Zagros Mountains deduced from GPS measurements: Journal of the Geological Society, London, 163, 143–148.
- Hollingsworth, J., Fattahi, M., Walker, R., Talebian, M., Bahroudi, A., Bolourchi, M. J., Jackson, J., and Copley, A., 2010, Oroclinal bending, distributed thrust and strike-slip faulting, and the accommodation of Arabia– Eurasia convergence in NE Iran since the Oligocene: Geophys. J. Int., 181, 3, 1214-1246.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignieres, M., Nankali, H., and Van Gorp, S., 2007, Largescale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran: Geophys. J. Int., **170**, 436–440.
- Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., Chéry, J., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H., and

٣٣

Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chéry, J., 2004, Presentday crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: Geophys. J. Int., **157**, 381–398.

- Molodensky, M., S., Eremeev, V., F., and Yurkina, M., I., 1962, Methods for Study of the External Gravitational Field and Figure of the Earth: Programme for the Translation of Scientific Publications, Jerusalem (Russian original 1960).
- Wang, R., Lorenzo-Martin, F., and Roth, F., 2006, PSGRN/PSCMP - a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelasticgravitational dislocation theory: Computers and Geosciences, **32**, 527–541.
- Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P., and Genrich, J., 1997, Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the Landers earthquake: J. Geophys. Res., **102**, 18,057-18,070.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement: Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 974-1002.
- Wolf, H., 1963, Geometric connection and reorientation of three-dimensional triangulation nets: Bulletin Géodésique, 68, 165-169.
- Zare, M., 1999, Contribution a l'etude des movements forts en Iran: du catalogue aux lois d'attenuation: These De L'universite Joseph Fourier, Grenoble, France.

of geodetically measured deformation in Long Valley Caldera, eastern California: J.

Geophys. Res., 93, 13,297-13,305. Segall P., 2010, Earthquake and volcano

- deformation, Princeton University Press, 458 pp.
- Sella, G.F., Dixon, G. F., and Mao, G.F., 2002, REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy: J. Geophys. Res., **107**.
- Snay, R.A., 1999, Using the HTDP software to transform spatial coordinates across time and between reference frames: Surveying and Land Information Systems, **59**(1), 15-25.
- Steketee J. A., 1958, On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium: Can. J. Phys., 36, 192-205.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Martinod, J., and Walpersdorf, A., Ghafori-Ashtiany, M., and Chéry, J., 2002, The present-day deformation of the central Zagros from GPS measurements: Geophys. Res. Lett., 29(19).
- Tavakoli, F., Walpersdorf, A., Authemayou, C., Nankali, H. R., Hatzfeld, D., Tatar, M., Djamour, Y., Nilforoushan, F., and Cotte, N., 2008, Distribution of the right-lateral strikeslip motion from the Main Recent Fault to the Kazerun Fault System (Zagros, Iran): Evidence from present-day GPS velocities: Earth and Planetary Science Letters, 275, 342-347.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chéry, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J. F., Sedighi, M., and Tavakoli, F., 2004, Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data: Earth and Planetary Science Letters, 223, 177– 185.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F.,