

مطالعه سهم حرکات صفحات زمین‌ساختی منطقه خاورمیانه در تولید میدان سرعت GPS شبکه غیر دائم ژئودینامیک سراسری ایران

اصغر راست‌بود^۱ و بهزاد وثوقی^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۸/۰۸

چکیده

در این پژوهش، نقش حرکت صفحات زمین‌ساختی و گسلش‌های مختلف موجود در منطقه خاورمیانه بر روی داده‌های ژئودینامیک (میدان سرعت GPS) مورد بررسی قرار گرفته است و هدف آن بررسی سهم این حرکات در تولید میدان سرعت GPS شبکه غیر دائم ژئودینامیک سراسری در محدوده کشور ایران با استفاده از مفاهیم مکانیک شکست و مدل‌سازی جداشدگی است. برای این منظور، اطلاعات گسلش موجود از منطقه خاورمیانه با توجه به زمین‌ساخت منطقه به دسته‌های مختلف تقسیم شده و مؤلفه‌های سرعت ناشی از آنها مدل‌سازی شده و با میدان سرعت حاصل از GPS مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند که سهم گسلش‌های مربوط به صفحه عربستان در میدان سرعت مشاهداتی GPS بیشتر از سهم گسلش‌های فلات آناتولی بوده و گسلش‌های داخلی ایران نیز ضمن ایجاد فشردگی شمالی-جنوبی سعی در دوران میدان سرعت حاصل از صفحه عربستان و فلات آناتولی به صورت پادساعت‌گرد دارند. مدل‌سازی‌های انجام‌شده، نشان می‌دهند که حدود ۳۰ درصد مؤلفه‌های میدان سرعت GPS توسط گسلش‌های داخلی ایران، ۶۰ درصد آن توسط صفحه عربستان و ۱۰ درصد آن توسط گسلش‌های فلات آناتولی تأمین می‌شود.

کلیدواژه‌ها: میدان سرعت GPS، مکانیک شکست، دگرشکلی، زمین‌ساخت، سنگ‌کره کشسان.

*نویسنده مسئول: بهزاد وثوقی

E-mail: vosoghi@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

زمین‌ساخت منطقه به گروه‌های مختلف جدا و هر کدام به صورت مجزا و تلفیقی مدل‌سازی می‌شوند و اثر آنها در میدان سرعت ایستگاه‌های GPS سنجیده می‌شود. گفتنی است که مدل‌سازی میدان سرعت GPS به کار برده شده در مقاله Reilinger et al. (2006) بر اساس مدل بلوک است که یک نوع مدل‌سازی هندسی است، اما در پژوهش حاضر به جای مدل بلوک از مدل تحلیلی Okada که یک مدل‌سازی فیزیکی است برای تعیین سهم گسلش‌های مختلف مدل‌سازی شده در میدان سرعت GPS شبکه غیر دائم ژئودینامیک سراسری ایران استفاده شده است. از کارهای پیشین انجام‌شده با استفاده از مدل تحلیلی Okada می‌توان به مقالات Flerit et al. (2003)، Armijo et al. (2003) و Flerit et al. (2004) اشاره کرد که در منطقه فلات آناتولی با مشاهدات شبکه GPS مربوط به مقاله McClusky et al. (2000) انجام شده است.

مرز برخورد صفحات زمین‌ساختی در مناطق قاره‌ای مانند ایران، بزرگ‌تر از مرزهای متناظر در صفحات اقیانوسی است. با در نظر گرفتن این واقعیت مرز برخورد صفحات عربستان و اوراسیا در ایران، در محدوده بزرگی (تقریباً درون مرزهای سیاسی ایران) گسترده شده است و در حقیقت ایران شبیه یک مرز عریض نرم بین دو صفحه متحرک در حال برخورد مایل عربستان و اوراسیا است. دگرشکلی حاصل از این برخورد در محدوده گسترده‌ای درون ایران بین سامانه‌های مختلف گسلش توزیع می‌شود. به گونه‌ای که برخورد باعث ایجاد کمربند چین‌خورده و رانندگی در رشته‌کوه‌های زاگرس، فرورانش در منطقه مکران، حرکت پادساعت‌گرد در محدوده دشت لوت و سامانه حرکتی امتدادلغز در محدوده شمال باختر ایران است.

در این پژوهش، هدف بر این است که سهم گسلش‌های مختلف موجود در منطقه خاورمیانه شامل عربستان، ترکیه و ایران در میدان سرعت GPS شبکه غیر دائمی ژئودینامیک سراسری ایران برآورد شود. در طول دهه گذشته، ایستگاه‌های GPS بسیاری در محدوده ایران برپا شده است که منجر به تعیین بهتر بردارهای سرعت بیانگر دگرشکلی در منطقه شده است. دگرشکلی حاصل از مشاهدات ایستگاه‌های GPS را می‌توان با سرعت‌های تعیین‌شده با روش‌های وابسته به زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی در بازه‌های زمانی بلندتر و یا با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها مقایسه کرد.

در انجام مدل‌سازی، از مدل تحلیلی Okada به همراه اطلاعات گسلش موجود از منطقه در مقاله Reilinger et al. (2006) استفاده شده است. المان‌های مورد استفاده در مدل منطقه‌ای شامل المان‌های مستطیلی است که از ژرفای قفل‌شدگی متوسط ۱۵ کیلومتر تا ۱۰۰۰۰۰ کیلومتر (ژرفای مؤثر بی‌نهایت) در نیم‌فضای کشسان (با نسبت پواسون ۰/۲۵ و مدول یانگ ۸۰۰۰۰۰ بار) امتداد دارند. این المان‌ها ساختارهای قائمی را در پوسته پایین و گوشه بالا تا سست‌کره تشکیل می‌دهند (Savage & Burford, 1973). جابه‌جایی‌ها با استفاده از جداشدگی‌های مستطیلی که نماینده گسلش‌های موجود در منطقه و شرایط مرزی مدل هستند، محاسبه می‌شوند. بدین گونه که اطلاعات گسلش موجود در این منابع برحسب

۲- مدل‌سازی دگرشکلی ناشی از گسلش‌ها بر اساس مدل تحلیلی

Okada

همان‌گونه که در مقدمه نیز اشاره شد، به منظور مدل‌سازی جابه‌جایی‌های ناشی از آهنگ لغزش در گسل‌ها در این پژوهش، از مدل تحلیلی Okada (1985) استفاده می‌شود. از مزیت‌های مدل‌سازی تحلیلی، می‌توان به محاسبه میزان دگرشکلی در هر نقطه دلخواه با توجه به نوع گسلش مورد نظر اشاره کرد.

مدل Okada برپایه نظریه جداشدگی (dislocation theory) فرموله شده است. در این مدل ابتدا مدل‌سازی میدان دگرشکلی حاصل از یک تک‌نیرو (منبع نقطه‌ای) انجام می‌گیرد و سپس با انتگرال‌گیری از روابط منبع نقطه‌ای، میدان دگرشکلی حاصل از یک منبع مستطیلی (صفحه گسلش) فرموله می‌شود. به طور کلی، متغیرهای ورودی مدل Okada به دو دسته متغیرهای فیزیکی و هندسی تقسیم‌بندی می‌شوند. متغیرهای فیزیکی مورد استفاده در مدل، همان ضرایب لامه μ و λ منطقه مورد مطالعه است، که باید به صورت تقریبی مشخص باشند، برای این منظور می‌توان با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل (نوری و همکاران، ۱۳۸۸) از مقادیر متوسط جهانی نیز

با استفاده از رابطه (۱)، سهم المان سطحی $\Delta\Sigma$ در جابه‌جایی، ناشی از هر مؤلفه جاداشدگی به صورت زیر است:

$$\frac{1}{F} \mu U_1 \Delta\Sigma \left[- \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \delta + \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \delta \right]. \quad (5)$$

برای مؤلفه شیب‌لغز:

$$\frac{1}{F} \mu U_2 \Delta\Sigma \left[\left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} \right) \cos 2\delta + \left(\frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_3} - \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} \right) \sin 2\delta \right]. \quad (6)$$

برای مؤلفه کششی:

$$\frac{1}{F} U_3 \Delta\Sigma \left[\lambda \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + 2\mu \left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} \sin^2 \delta + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_3} \cos^2 \delta \right) - \mu \left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} \right) \sin 2\delta \right]. \quad (7)$$

عبارت‌های ۵ و ۶ جفت نیروهای معادل کوپل مضاعف با گشتاور $\mu U_1 \Delta\Sigma$ یا $\mu U_2 \Delta\Sigma$ را در حالت گسل برشی نشان می‌دهند. همچنین رابطه ۷ مرکز اتساع باشدت $\mu U_3 \Delta\Sigma$ ترکیب شده با کوپل مضاعف بدون گشتاور و شدت $2\mu U_3 \Delta\Sigma$ را برای گسل کششی نمایش می‌دهد. با جایگذاری روابط ۲، ۳، ۴ در روابط ۵، ۶ و ۷ و قرار دادن $\xi_3 = -d$ و $\xi_1 = \xi_2 = 0$ در موقعیت $(0,0,-d)$ قرار دارد، به دست می‌آید.

در حالت امتدادلغز:

$$\begin{cases} u_x^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3x^2q}{R^5} + I_1^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_y^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xyq}{R^5} + I_2^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_z^0 = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{3xdq}{R^5} + I_4^0 \sin \delta \right] \Delta\Sigma. \end{cases} \quad (8)$$

در حالت شیب‌لغز:

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

در حالت کششی:

$$\begin{cases} u_x^0 = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{3xq^2}{R^5} - I_3^0 \sin^2 \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_y^0 = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{3yq^2}{R^5} - I_1^0 \sin^2 \delta \right] \Delta\Sigma \\ u_z^0 = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{3dq^2}{R^5} - I_5^0 \sin^2 \delta \right] \Delta\Sigma. \end{cases} \quad (10)$$

در روابط ۸، ۹ و ۱۰ داریم:

$$\begin{cases} I_1^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} y \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - x^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \\ I_2^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} x \left[\frac{1}{R(R+d)^2} - y^2 \frac{3R+d}{R^3(R+d)^3} \right] \\ I_3^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{x}{R^3} \right] - I_2^0 \\ I_4^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[-xy \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \\ I_5^0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{R(R+d)} - x^2 \frac{2R+d}{R^3(R+d)^2} \right] \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} p = y \cos \delta + d \sin \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ R^2 = x^2 + y^2 + d^2 = x^2 + p^2 + q^2. \end{cases} \quad (12)$$

استفاده کرد. متغیرهای هندسی مورد استفاده در مدل Okada شامل طول، عرض، ژرفای قفل‌شدگی، شیب، راستا، میزان جاداشدگی یا آهنگ لغزش، مختصات نقطه ابتدایی گسل و همچنین مختصات نقاط مشاهداتی (ایستگاه‌های GPS) است. مدل Okada در واقع با توجه به هندسه گسلش و فیزیک منطقه مورد مطالعه، جاداشدگی گسلش یا آهنگ لغزش را به میدان جابه‌جایی یا میدان سرعت ناشی از آن تبدیل می‌کند.

۲-۱. مدل Okada برای منبع نقطه‌ای

(Steketee 1958) نشان داد که میدان جابه‌جایی $u_i(x_1, x_2, x_3)$ ناشی از جاداشدگی $\Delta u_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ به مساحت Σ در یک محیط هم‌رفتار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \quad (1)$$

در این رابطه δ_{jk} دلتای کرونکر، λ و μ ضرایب لامه و کسینوس هادی عادی بر سطح المان $d\Sigma$ بوده و قرارداد جمع اعمال شده است. u_i^j مؤلفه نام جابه‌جایی در نقطه (x_1, x_2, x_3) ناشی از جهت j ام نیروی نقطه‌ای به بزرگی F است که در نقطه (ξ_1, ξ_2, ξ_3) روی سطح اعمال می‌شود. رابطه ۱ به معادله ولترا (Volterra's equation) معروف بوده و نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌ها ناشی از منابعی به صورت کوپل مضاعف هستند (Segall, 2010).

در سیستم مختصات کارتزین شکل ۱ محیط کشسان در منطقه $z \leq 0$ قرار گرفته و محور x موازی با امتداد گسل است. همچنین در این شکل، جاداشدگی‌های U_1 ، U_2 و U_3 که متناظر با مؤلفه‌های امتدادلغز، شیب‌لغز و کششی یک جاداشدگی اختیاری هستند، نشان داده شده است. هر بردار جاداشدگی حرکت فرادایره را نسبت به فرودایره نشان می‌دهد. در این شکل مؤلفه شیب‌لغز جاداشدگی، یعنی U_2 ، نشان‌دهنده حرکت وارون است که اگر $\sin 2\delta < 0$ باشد نشانگر حرکت عادی خواهد بود. در این سیستم مختصات، u_i^j در سطح زمین از روابط زیر به دست می‌آید:

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

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

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

در این روابط داریم:

$$R^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2$$

۲-۲. مدل Okada برای منبع با ابعاد محدود

میدان دگرشکلی برای یک گسل مستطیلی محدود با طول L و عرض W ، با جایگزینی $x = \xi - \eta \cos \delta$ و $y = \eta \sin \delta$ در جای α و γ در روابط به دست آمده برای منبع نقطه‌ای و با انتگرال گیری زیر به دست می‌آیند:

$$\int_0^L d\xi \int_0^W d\eta' \quad (13)$$

با تغییر متغیر از ξ' و η' به ξ و x به صورت $\xi = x - \eta'$ و $\eta = p - \eta'$ که در آن $p = y \cos \delta + d \sin \delta$ خواهیم داشت:

$$\int_{x-L}^{x+L} d\xi \int_0^{p-W} d\eta \quad (14)$$

نتایج نهایی با استفاده از نماد چینری (Chinnery) || برای نمایش جای گذاری به صورت زیر است:

$$f(\xi, \eta) = f(x, p) - f(x, p - W) - f(x - L, p) + f(x - L, p - W) \quad (15)$$

اگر مطابق خطوط خط چین شکل ۱ گسل مستطیلی با طول $2L$ در نظر گرفته شود، کافی است که در دو عبارت اول و دوم سمت راست رابطه ۱۵، x را $x + L$ جایگزین شود. مؤلفه‌های بردار جابه‌جایی برای گسلش امتدادلغز به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \\ u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\bar{y} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \\ u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\bar{d} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \end{cases} \quad (16)$$

همچنین برای گسلش شیب لغز خواهیم داشت:

$$\begin{cases} u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \\ u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\bar{y} q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \\ u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\bar{d} q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \end{cases} \quad (17)$$

برای گسلش کششی نیز خواهیم داشت:

$$\begin{cases} u_x = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{q^2}{R(R+\eta)} - I_3 \sin^2 \delta \right] \\ u_y = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{-\bar{d} q}{R(R+\xi)} - \sin \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\xi)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_1 \sin^2 \delta \right] \\ u_z = \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{\bar{y} q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\xi)} - \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} \right\} - I_3 \sin^2 \delta \right] \end{cases} \quad (18)$$

در روابط بالا داریم:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \delta} - \frac{\xi}{R + \bar{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_3 \\ I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R + \eta)] - I_3 \\ I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \delta} \frac{\bar{y}}{R + \bar{d}} - \ln(R + \eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \\ I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} [\ln(R + \bar{d}) - \sin \delta \ln(R + \eta)] \\ I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \tan^{-1} \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{\xi(R + X) \cos \delta} \end{cases} \quad (19)$$

در حالتی که $\cos \delta = 0$ باشد، خواهیم داشت:

$$\begin{cases} I_1 = -\frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \frac{\xi q}{(R + \bar{d})^2} \\ I_3 = \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \left[\frac{\eta}{R + \bar{d}} + \frac{\bar{y} q}{(R + \bar{d})^2} - \ln(R + \eta) \right] \\ I_4 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{q}{R + \bar{d}} \\ I_5 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi \sin \delta}{R + \bar{d}} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} p = y \cos \delta + d \sin \delta \\ q = y \sin \delta - d \cos \delta \\ \bar{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta \\ \bar{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta \\ R^2 = \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + \bar{y}^2 + \bar{d}^2 \\ X^2 = \xi^2 + q^2 \end{cases} \quad (21)$$

با اعمال اطلاعات هم‌لرزه به مدل Okada، می‌توان جابه‌جایی‌های هم‌لرزه و با اعمال اطلاعات بین‌لرزه‌ای به این مدل، جابه‌جایی‌های بین‌لرزه‌ای را محاسبه کرد. در این پژوهش اطلاعات بین‌لرزه‌ای به مدل اعمال شده و جابه‌جایی‌های بین‌لرزه‌ای متناظر با این قیود، محاسبه می‌شوند. همچنین با توجه به این که مدل Okada یک مدل تحلیلی بوده و برای یک مسئله خطی حل شده است، بنابراین برای محاسبه اثر چند گسلش در یک نقطه کافی است که جابه‌جایی‌های ناشی از تک تک گسلش‌ها را محاسبه کرده و به صورت برداری باهم جمع کرد.

۳- مدل‌سازی

برای مدل‌سازی، نخست گسلش‌های با فعالیت زیاد منطقه خاورمیانه از مقاله Reilinger et al. (2006) انتخاب شد. سپس گسلش‌ها، با در نظر گرفتن زمین‌ساخت منطقه به دسته‌های مختلف تقسیم شدند. مناطق تقسیم‌بندی عبارتند از: ۱) گسلش‌های داخلی ایران شامل گسلش‌های منطقه مکران، گسلش‌های خاور ایران، گسلش‌های منطقه البرز و منطقه زاگرس، ۲) گسلش‌های بین صفحات عربستان، هند و آفریقا و ۳) گسلش‌های دور فلات آناتولی. سپس گسلش‌ها به تدریج وارد مدل تحلیلی شدند و میدان سرعت حاصل از آنها در محل ایستگاه‌های شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران مدل‌سازی شده و سپس نتایج آن با بردارهای سرعت GPS مقایسه و تحلیل گردید که در ادامه به این مقایسه‌ها پرداخته می‌شود. در مدل‌سازی‌ها شماره‌های به کار برده شده برای گسلش‌ها در شکل‌ها یا درون متن با شماره گسلش‌ها در جدول ۱ متناظر است و بدین ترتیب اطلاعات مربوط به گسلش‌های انتخابی با در نظر گرفتن شماره گسلش‌ها از متن یا شکل‌های مربوط در جدول ۱ قابل ملاحظه است. اطلاعات جدول ۱ شامل شماره گسلش، طول و عرض نقاط ابتدا و انتهای گسلش، ژرفای قفل‌شدگی، مؤلفه امتدادلغز آهنگ لغزش، مؤلفه شیب لغز آهنگ لغزش و شیب گسلش است. اطلاعات موجود در این جدول، یا خروجی مدل بلوک بوده و یا از مقالات زمین‌شناسی مختلف استخراج شده است. گسلش‌های داخلی ایران فقط در شکل ۲-الف شماره گذاری شده است و در بقیه شکل‌ها فقط رد گسلش‌های وارد شونده در مدل، نمایش داده شده و شماره آنها در متن مقاله بیان شده است. جدول ۲ میدان سرعت GPS انتخابی از مقاله Masson et al. (2007) را برای مقایسه با نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی ابتدا مطابق شکل ۲-الف فقط گسلش‌های داخلی ایران مدل‌سازی شد. بردارهای سرعت حاصل از مدل‌سازی در ستون‌های ۶ و ۷ جدول ۲ و شکل ۲-ب به همراه میدان سرعت حاصل از مشاهدات GPS نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود گسلش‌های داخلی ایران یک فشردگی در راستای شمالی-جنوبی به همراه یک دوران پادساعت‌گرد در نیمه باختری ایران ایجاد می‌کنند. میدان سرعت حاصل از مدل، نشان‌دهنده چیرگی گسلش‌های امتدادلغز راست‌گرد بر گسلش‌های امتدادلغز چپ‌گرد و گسلش‌های شیب‌لغز وارون بر گسلش‌های شیب‌لغز عادی در درون ایران است.

در مرحله بعد، گسلش‌های بین صفحات هند، عربستان و آفریقا مدل‌سازی شد که میدان سرعت حاصل از آن به همراه گسلش‌های مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این مدل‌سازی گسلش‌های بین صفحات عربستان، آفریقا و هند میدان سرعتی را در جهت جنوب باختر به شمال خاور در ایران ایجاد می‌کنند که

بزرگ تر بودن مؤلفه‌های امتداد لغز نسبت به مؤلفه‌های شیب لغز سازگار است. سپس، گسلش‌های منطقه البرز یعنی المان‌های شماره ۱۲۳، ۱۲۴، ۱۳۲، ۱۳۴، ۱۳۵، ۱۳۹، ۱۴۰، ۱۴۱ و ۱۴۲ به مدل اضافه شد که نتایج مدل‌سازی در شکل ۹ قابل مشاهده است. در گسلش‌های اضافه‌شده از منطقه البرز در بین مؤلفه‌های امتداد لغز، مؤلفه‌های راست گرد کمی بزرگ‌تر از مؤلفه‌های چپ گرد هستند، به همین دلیل افزودن گسلش‌های منطقه البرز، میدان سرعت مدل را اندکی از راستای جنوب باختری-شمال خاوری به راستای جنوبی-شمالی دوران می‌دهد. همچنین دوران اندکی به صورت ساعت گرد در ایستگاه‌های شمال خاور ایران و به صورت پادساعت گرد در ایستگاه‌های شمال باختری ایران مشاهده می‌شود. از بین مؤلفه‌های شیب لغز نیز مؤلفه‌های وارون، بزرگ‌تر از مؤلفه‌های عادی هستند که این مؤلفه‌ها میدان سرعت مدل را در بخش باختری، مرکزی و جنوب ایران تقویت می‌کنند و در بخش شمال خاوری ایران و شمال البرز کاهش می‌دهند.

در ادامه، به تدریج، گسلش‌های بیشتری از منطقه و در پایان، کل گسلش‌های منطقه خاورمیانه وارد مدل شد. ادامه این روند میدان سرعت مدل را در ایران افزایش داده و آن را در جهت پادساعت گرد دوران می‌دهد تا با تقریب خوبی در محدوده خطای مشاهدات GPS با بردارهای میدان سرعت حاصل از GPS منطبق شود (شکل ۱۰).

مطابق نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها در جدول ۲، حدود ۳۰ درصد مؤلفه‌های میدان سرعت GPS توسط گسلش‌های درون ایران، ۶۰ درصد آن توسط حرکت صافه عربستان و ۱۰ درصد توسط گسلش‌های فلات آناتولی تأمین می‌شود.

شکل ۱۱ میزان نبود انطباق مدل‌سازی تحلیلی میدان سرعت ناشی از گسلش‌های منطقه خاورمیانه را با میدان سرعت مشاهداتی GPS نشان می‌دهد. در مورد بیشتر ایستگاه‌ها اختلاف بردارهای سرعت مدل و مشاهدات GPS در محدوده بیضی خطای ۹۵٪ مشاهدات GPS قرار گرفته است که به مفهوم تساوی آماری دو میدان سرعت است. تساوی آماری مدل‌سازی با مشاهدات در حد خطاهای مشاهداتی GPS در بیشتر ایستگاه‌ها، تأییدکننده درستی برآوردهای انجام‌شده و ادعاهای مطرح‌شده در این پژوهش در مورد میزان مشارکت حرکات صفحات عربستان، هند و آفریقا، گسلش‌های فلات آناتولی و همچنین گسلش‌های داخلی ایران در میدان سرعت شبکه سراسری غیردائم ژئودینامیک ایران است. مطابق شکل ۱۱ در شمال، جنوب و تاحدی در جنوب خاوری ایران، بین بردارهای سرعت مدل و برخی مشاهدات GPS با بیضی خطای ۹۵٪ تساوی آماری برقرار نمی‌شود، یعنی بردار اختلاف مدل و GPS داخل بیضی خطای ۹۵٪ مشاهدات GPS قرار نمی‌گیرد. حل این مشکل نیاز به استفاده از شبکه‌های محلی GPS با تراکم بیشتر به همراه اطلاعات دقیق‌تر از گسلش‌ها به‌ویژه گسل‌های فعال‌تر یا نزدیک‌تر به ایستگاه‌های GPS دارد.

۴- نتیجه‌گیری

مطابق مدل‌سازی انجام‌شده میدان سرعت حاصل از گسلش‌های داخلی ایران، یک فشرده‌گی در راستای شمالی-جنوبی به همراه یک دوران پادساعت گرد در نیمه باختری ایران ایجاد می‌کند. گسلش‌های بین صفحات عربستان، آفریقا و هند میدان سرعتی را در جهت جنوب باختر به سمت شمال خاور در ایران ایجاد می‌کنند که از جنوب ایران به سمت شمال میزان این سرعت کاهش می‌یابد. گسلش‌های فلات آناتولی دورانی را به صورت ساعت گرد با دامنه بسیار کم در ایران ایجاد می‌کنند که دامنه این مؤلفه‌ها در نواحی نزدیک به فلات آناتولی بزرگ‌تر از بقیه نواحی است. در حالت کلی دامنه میدان سرعت مدل ناشی از گسلش‌های صافه عربستان خیلی بیشتر از دامنه میدان سرعت مدل ناشی از گسلش‌های فلات آناتولی است. ترکیب گسلش‌های صفحات عربستان، هند و آفریقا با فلات آناتولی باعث افزایش میدان سرعت از جنوب باختر به سمت شمال خاور در نیمه شمالی و به‌ویژه در شمال باختر

از جنوب ایران به سمت شمال با فاصله گرفتن از گسلش‌ها، دامنه سرعت مدل کاهش می‌یابد. عادی‌بودن بیشتر مؤلفه‌های شیب لغز و چپ گرد بودن بیشتر مؤلفه‌های امتداد لغز گسلش‌های انتخابی، تأییدکننده راستای بردارهای سرعت حاصل از جنوب خاور به سمت شمال باختر ایران است.

در ادامه فقط گسلش‌های اطراف فلات آناتولی، (مطابق شکل ۴-الف)، وارد مدل شد. بردارهای سرعت ناشی از مدل با بزرگنمایی ۵ برابر در شکل ۴-ب نشان داده شده است. مطابق مدل‌سازی انجام‌شده، گسلش‌های اطراف فلات آناتولی دورانی به صورت ساعت گرد با دامنه بسیار کم در ایران ایجاد می‌کنند که دامنه این مؤلفه‌ها در نواحی نزدیک به فلات آناتولی یعنی شمال باختر ایران، بزرگ‌تر از دیگر ناحیه‌هاست. میدان سرعت حاصل با راست گرد بودن گسل آناتولی شمالی و چپ گرد بودن گسل آناتولی خاوری سازگار است.

در ادامه گسلش‌های اطراف صفحات هند، عربستان، آفریقا و فلات آناتولی به صورت همزمان مدل‌سازی شد. میدان سرعت حاصل در ستون‌های ۸ و ۹ جدول ۲ و شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق این مدل‌سازی، ترکیب گسلش‌های یادشده، باعث افزایش میدان سرعت از جنوب باختری به سمت شمال خاوری به ویژه در شمال باختر ایران می‌شود.

در ادامه، گسلش‌های داخلی ایران به تدریج وارد مدل‌سازی شد. نخست گسلش‌های منطقه مکران یعنی المان‌های شماره ۱۵۰، ۱۵۱، ۱۵۵، ۱۵۷ و ۱۶۳ از جدول ۱ وارد مدل شد. میدان سرعت حاصل به همراه گسلش‌های منطقه مکران در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این مدل‌سازی افزودن گسلش‌های منطقه فرورانش مکران در جنوب خاوری ایران، دامنه میدان سرعت مدل را در بخش جنوبی منطقه مکران افزایش داده و در بخش خاوری ایران کاهش می‌دهد که با وارون‌بودن مؤلفه‌های شیب لغز گسلش‌های منطقه مکران سازگار است. گسلش‌های خاوری منطقه مکران حالت چپ گرد دارند که دوران متناسب با این نوع گسلش‌ها در بخش شمالی منطقه مکران به صورت ساعت گرد و در جنوب منطقه مکران به صورت ساعت گرد مشاهده می‌شود. همچنین گسلش‌های باختری منطقه مکران حالت راست گرد دارند که باعث دوران پادساعت گرد در بخش مرکزی و باختری ایران می‌شوند که میزان این دوران در جنوب خاوری ایران بیشتر است.

سپس گسلش‌های مربوط به مرز برخورد صافه عربستان با اوراسیا در منطقه زاگرس یعنی المان‌های شماره ۱۰۷، ۱۱۲، ۱۱۵، ۱۱۸، ۱۱۹، ۱۳۱، ۱۳۷، ۱۳۸ و ۱۴۳ به مدل اضافه شد که نتیجه مدل‌سازی در شکل ۶ قابل مشاهده است. مطابق مدل‌سازی انجام‌شده، افزودن گسلش‌های مربوط به مرز برخورد عربستان و اوراسیا در منطقه زاگرس، باعث کاهش میدان سرعت مدل در درون ایران شده، اما همین میدان سرعت را در بخش جنوب باختری ایران افزایش می‌دهد که با وارون‌بودن گسلش‌های این منطقه سازگار است. همچنین دوران کمی به صورت پادساعت گرد در ایستگاه‌های جنوبی منطقه زاگرس مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن راست گرد بودن مؤلفه‌های امتداد لغز گسلش‌های اضافه‌شده در این منطقه قابل پذیرش است. دوران ساعت گردی در ایستگاه بحرین مشاهده می‌شود که علت آن احتمالاً بزرگ بودن مؤلفه چپ گرد المان شماره ۱۴۳ ($6/7 \text{ mm/yr}$) در مقایسه با مؤلفه راست گرد المان شماره ۱۳۸ ($0/1 \text{ mm/yr}$) است.

در ادامه، گسلش‌های انتخابی از خاور ایران یعنی المان‌های شماره ۱۴۷، ۱۵۲، ۱۵۳، ۱۵۴، ۱۵۶، ۱۶۰، ۱۵۹ و ۱۶۲ وارد مدل‌سازی شد. میدان سرعت حاصل در شکل ۸ قابل مشاهده است. مطابق نتایج حاصل، افزودن گسلش‌های انتخابی از منطقه خاوری ایران، دامنه میدان سرعت مدل را در همه ایستگاه‌ها غیر از ایستگاه‌های خاوری و شمال خاور ایران افزایش می‌دهد. همچنین با افزودن این گسلش‌ها دورانی به صورت پادساعت گرد در راستای بردارهای سرعت مشاهده می‌شود که با راست گرد بودن مؤلفه‌های امتداد لغز و وارون بودن بیشتر مؤلفه‌های شیب لغز و

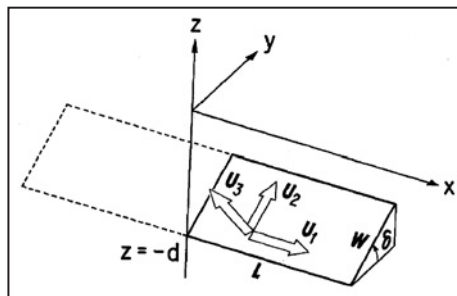
افزایش می‌دهند و آن را به صورت پادساعت گرد دوران می‌دهند تا با تقریب خوبی با بردارهای سرعت GPS منطبق شود.

چرخش میدان سرعت از جهت جنوب باختری-شمال خاوری به سمت جنوبی-شمالی و جنوب جنوب خاوری-شمال شمال باختری با کاهش تدریجی سرعت از خاور به باختر و جنوب به شمال، نشان‌دهنده وجود بیشتر گسلش‌های وارون نسبت به عادی و بیشتر بودن گسلش‌های راست گرد نسبت به چپ گرد در محدوده ایران است. از مجموعه برآوردهای انجام شده می‌توان به پیوسته بودن بلوک‌های توران و هلمند با اوراسیا پی برد.

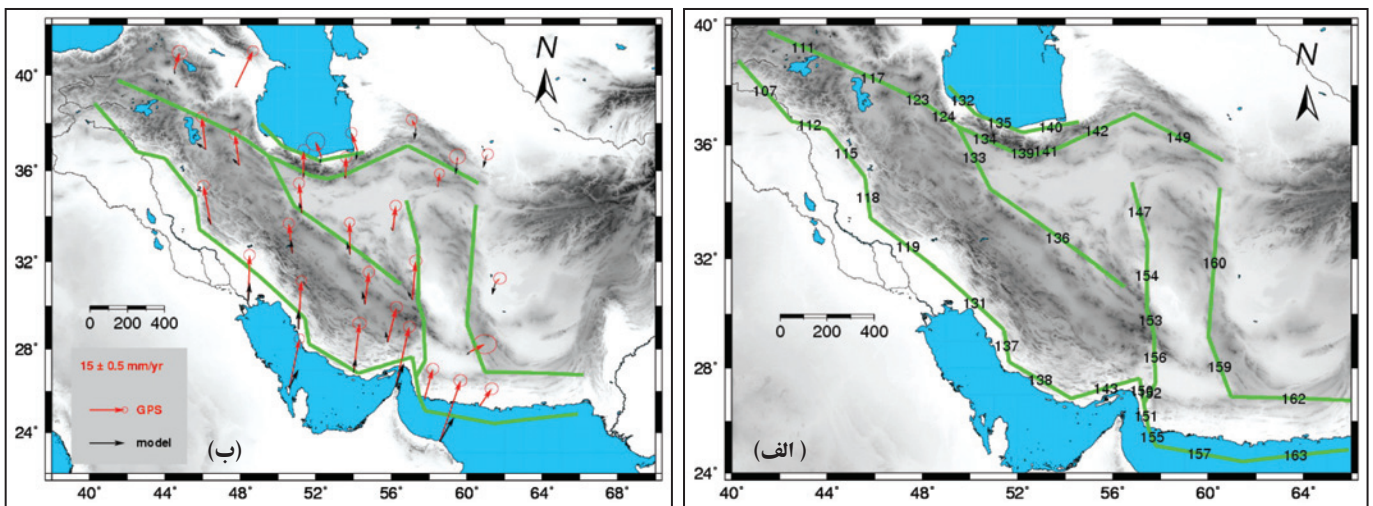
مدل‌سازی‌های انجام شده با افراز گسلش‌ها به صفحات مختلف نشان می‌دهد که حدود ۳۰ درصد مؤلفه‌های میدان سرعت GPS توسط گسلش‌های داخلی ایران، ۶۰ درصد توسط صفحه عربستان و ۱۰ درصد توسط گسلش‌های فلات آناتولی تأمین می‌شود.

برای مطالعه دقیق‌تر سهم گسلش‌ها در تولید میدان سرعت GPS در مناطق مختلف ایران، استفاده از شبکه‌های محلی GPS با تراکم بیشتر به همراه اطلاعات دقیق‌تر زمین‌شناسی از گسلش‌ها توصیه می‌شود.

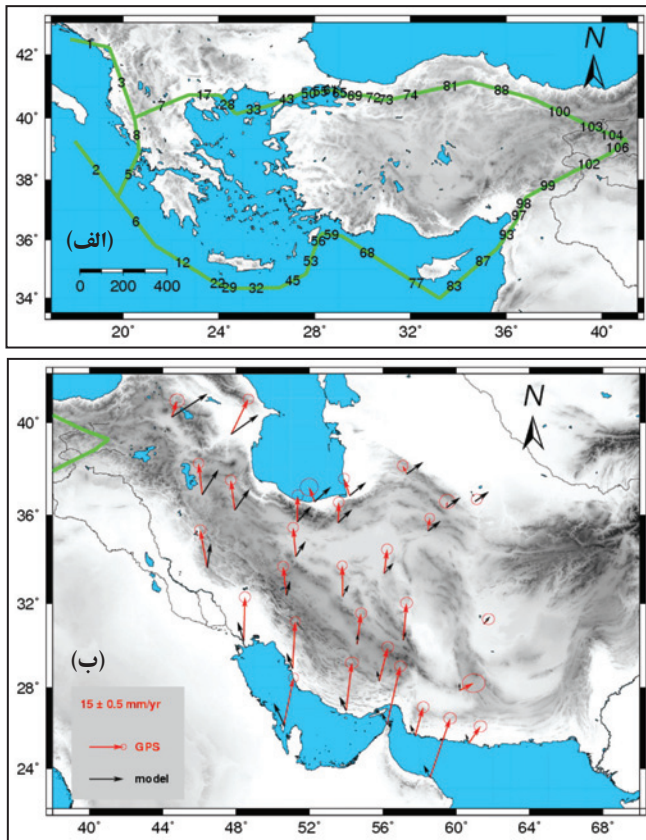
ایران می‌شود. جهت دوران ساعت گرد میدان سرعت مدل که توسط گسلش‌های فلات آناتولی ایجاد شده است و دامنه کمی دارد و همچنین راستای جنوب باختری-شمال خاوری میدان سرعت مدل که توسط صفحه عربستان ایجاد می‌شود، تا حد زیادی توسط گسلش‌های داخلی ایران خنثی و به راستای جنوبی-شمالی و جنوب جنوب خاوری-شمال شمال باختری برگردانده می‌شود. گسلش‌های منطقه فروانش مکران در جنوب خاوری ایران سرعت مدل را در بخش جنوبی منطقه مکران افزایش داده و در بخش خاوری ایران کاهش می‌دهد. گسلش‌های مربوط به مرز برخورد عربستان و اوراسیا در منطقه زاگرس باعث کاهش میدان سرعت مدل در داخل ایران شده، اما همین میدان سرعت را در بخش جنوب باختری ایران افزایش می‌دهد. گسلش‌های انتخابی از منطقه خاوری ایران میدان سرعت مدل را در همه ایستگاه‌ها غیر از ایستگاه‌های خاوری و شمال خاور ایران افزایش می‌دهد. گسلش‌های منطقه البرز، میدان سرعت مدل را اندکی از راستای جنوب باختری-شمال خاوری به راستای جنوبی-شمالی دوران می‌دهد و این میدان را در بخش باختری، مرکزی و جنوب ایران تقویت می‌کند و در بخش شمال خاوری ایران و شمال البرز کاهش می‌دهد. در پایان، کل گسلش‌ها میدان سرعت مدل را در ایران



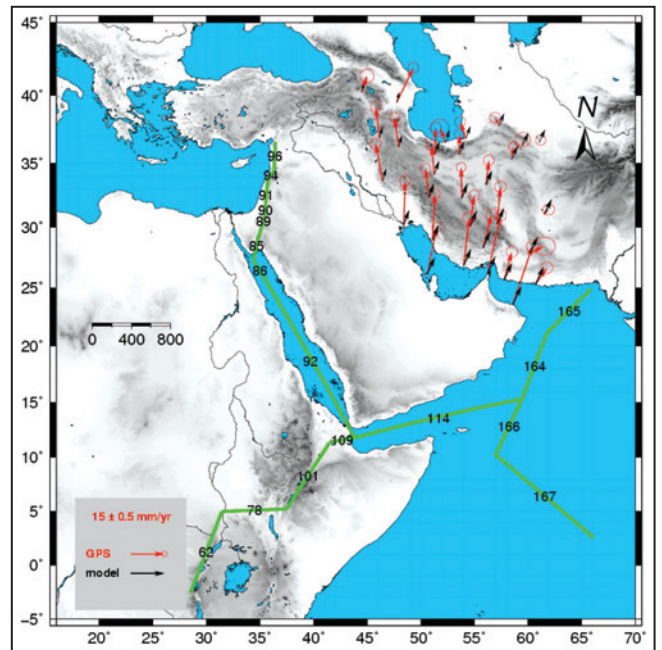
شکل ۱- هندسه گسل و نمادهای مورد استفاده در مدل‌سازی (Okada, 1985).



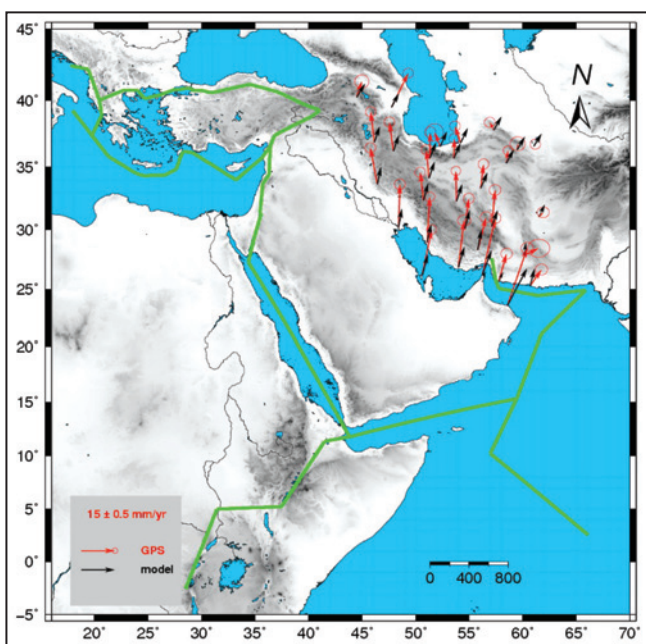
شکل ۲- الف) گسلش‌های انتخابی از داخل ایران همراه با شماره و ب) گسلش‌های داخلی ایران به همراه میدان سرعت مدل‌سازی شده و میدان سرعت GPS. فشردگی در راستای شمالی-جنوبی به همراه یک دوران پادساعت گرد در نیمه باختری ایران در اثر میدان سرعت حاصل از مدل‌سازی گسلش‌های انتخابی داخل ایران مشاهده می‌شود.



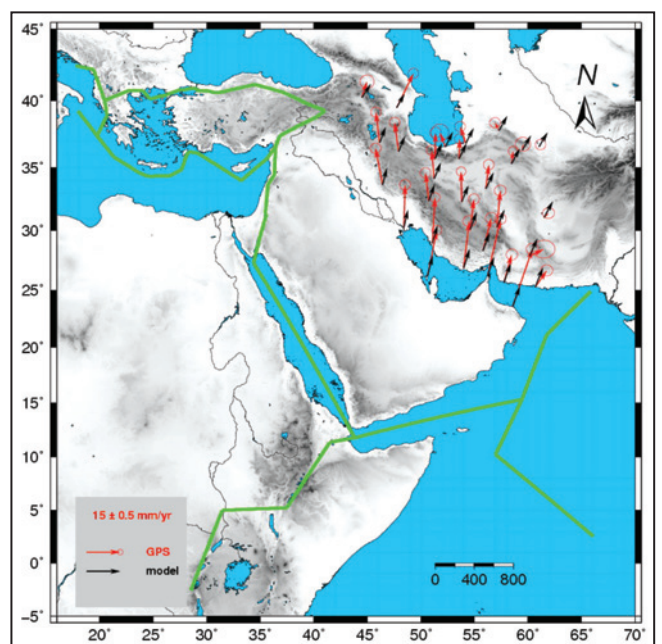
شکل ۴- الف) گسلش‌های انتخابی از فلات آناتولی همراه با شماره و ب) اثر گسلش‌های انتخابی از فلات آناتولی در ایستگاه‌های GPS ایران به همراه میدان سرعت مدل‌سازی شده و میدان سرعت مشاهداتی GPS. دوران ساعت گرد با دامنه بسیار کم در ایران با دامنه بزرگ‌تر در منطقه شمال باختر ایران نزدیک به فلات آناتولی در اثر گسلش‌های انتخابی از فلات آناتولی مشاهده می‌شود (بردارهای سرعت ناشی از مدل در این شکل تا پنج برابر بزرگ‌نمایی شده است).



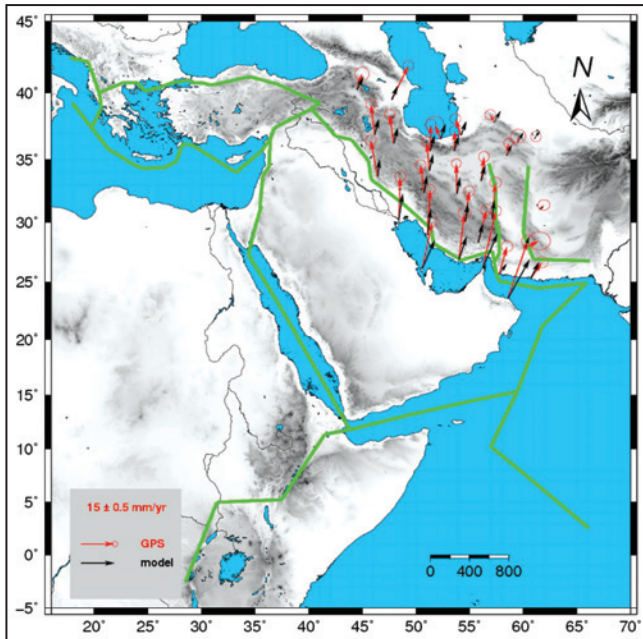
شکل ۳- میدان سرعت در جهت جنوب باختر به سمت شمال خاور در ایران با کاهش میزان آن از جنوب ایران به سمت شمال در اثر گسلش‌های بین صفحات عربستان، هند و آفریقا.



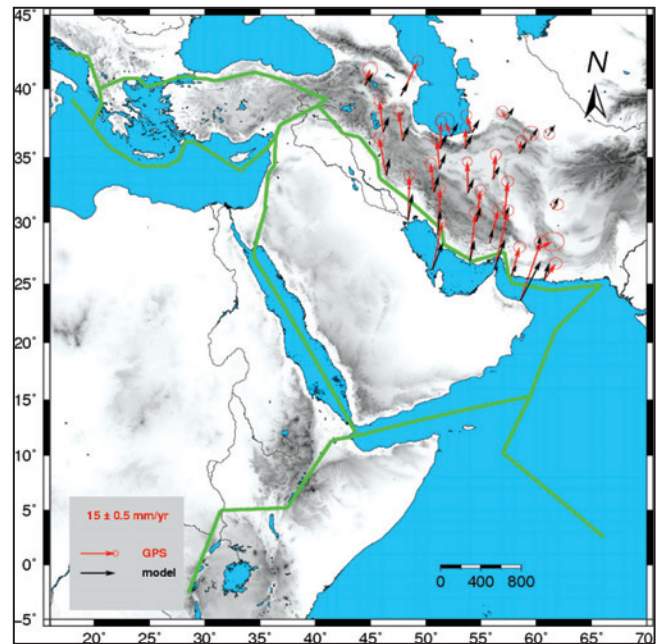
شکل ۶- افزایش سرعت مدل در بخش جنوبی منطقه مکران و کاهش آن در بخش خاوری ایران با افزودن گسلش‌های منطقه فروانش مکران در جنوب ایران.



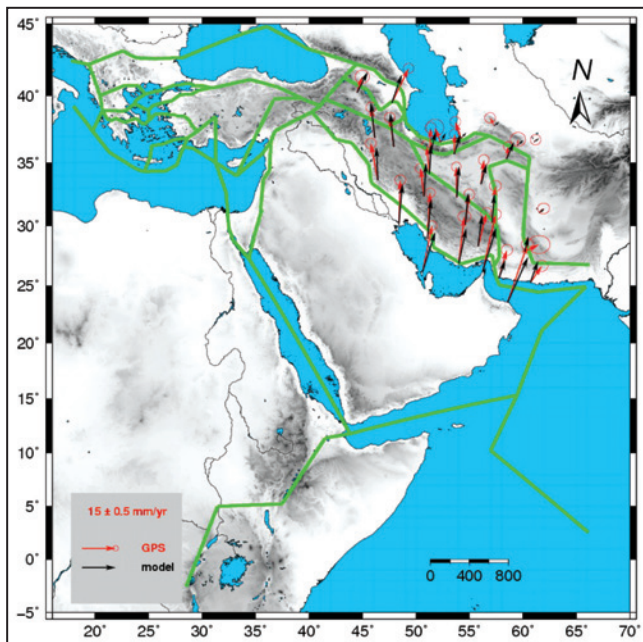
شکل ۵- افزایش میدان سرعت مدل از جنوب باختر به سمت شمال خاور در نیمه شمالی و به‌ویژه در شمال باختر ایران در اثر ترکیب گسلش‌های صفحه عربستان با فلات آناتولی.



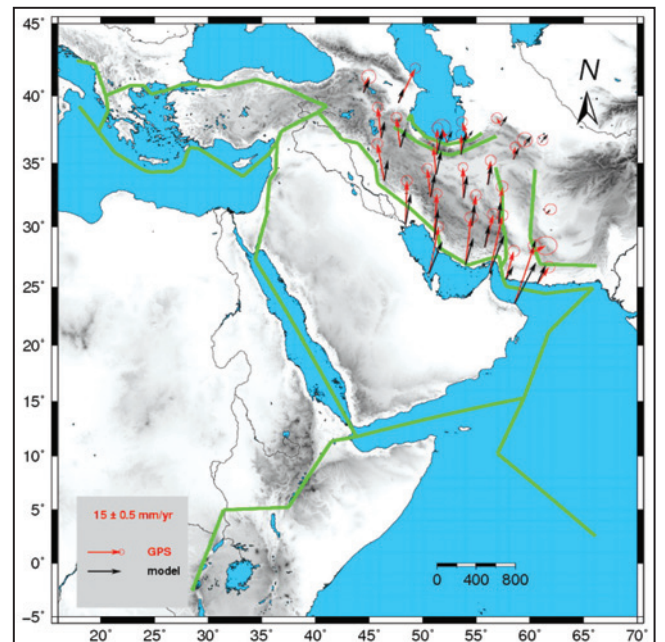
شکل ۸- کاهش سرعت مدل در ایستگاه‌های خاوری و شمال خاور ایران و افزایش آن در بقیه مناطق در اثر افزودن گسلش‌های منطقه خاوری ایران.



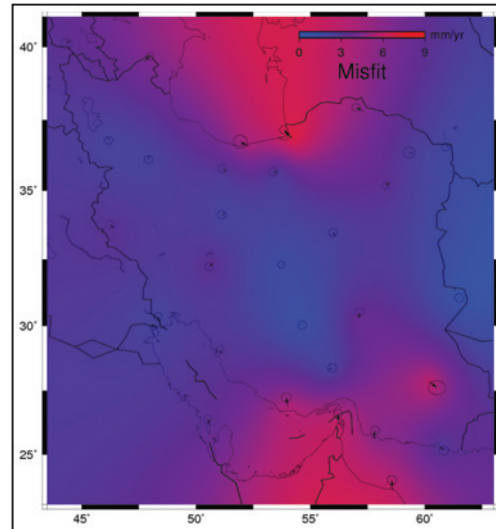
شکل ۷- کاهش میدان سرعت مدل در داخل ایران و افزایش آن در بخش جنوب باختری در اثر افزودن گسلش‌های مربوط به مرز برخورد صفحات عربستان و اوراسیا در منطقه زاگرس.



شکل ۱۰- مدل‌سازی میدان سرعت حاصل از گسلش‌های منطقه خاورمیانه با استفاده از مدل تحلیلی Okada و مقایسه آن با میدان سرعت حاصل از مشاهدات GPS.



شکل ۹- دوران میدان سرعت مدل از راستای جنوب باختری- شمال خاوری به راستای جنوبی- شمالی و تقویت این میدان در بخش باختری، مرکزی و جنوب ایران و کاهش آن در بخش شمال خاوری ایران و شمال البرز در اثر افزودن گسلش‌های منطقه البرز.



شکل ۱۱- میزان انطباق مدل‌سازی تحلیلی میدان سرعت ناشی از حرکت صفحات عربستان، هند و آفریقا و گسلش‌های فلات آناتولی و گسلش‌های داخلی ایران با میدان سرعت مشاهداتی GPS شبکه غیردائم ژئودینامیک سراسری ایران.

جدول ۱- گسلش‌های منطقه خاورمیانه از مقاله (Reilinger et al. (2006). ستون اول شماره گسلش، ستون‌های دوم و سوم مختصات جغرافیایی نقطه شروع گسلش برحسب درجه، ستون‌های چهارم و پنجم مختصات جغرافیایی نقطه انتهایی گسلش برحسب درجه، ستون ششم عمق قفل‌شدگی گسلش برحسب کیلومتر، ستون هفتم آهنگ لغزش امتدادلغز برحسب میلی‌متر در سال، ستون هشتم آهنگ لغزش شیب‌لغز برحسب میلی‌متر در سال و ستون نهم شیب برحسب درجه را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که در ستون هفتم اعداد مثبت نشان‌دهنده آهنگ لغزش امتدادلغز چپ‌گرد و اعداد منفی نشان‌دهنده آهنگ لغزش امتدادلغز راست‌گرد هستند. همچنین در ستون هشتم اعداد مثبت نشان‌دهنده آهنگ لغزش شیب‌لغز وارون و اعداد منفی نشان‌دهنده آهنگ لغزش شیب‌لغز عادی هستند.

No.	long.1 (°E)	lat.1 (°N)	long.2 (°E)	lat.2 (°N)	depth (km)	SS (mm/yr)	NS (mm/yr)	Dip (°)
۳۹	۲۵/۴۱۲	۳۹/۳۱۱	۲۶/۰۷۴	۳۹/۴۶۰	۱۵	-۱/۱	-۲/۷	۹۰
۴۰	۲۵/۶۰۴	۳۸/۶۷۴	۲۶/۵۶۴	۳۸/۶۷۸	۱۵	-۲/۱	-۱۴/۳	۹۰
۴۱	۲۵/۶۱۲	۴۲/۶۲۵	۲۸/۱۷۰	۴۲/۶۸۹	۱۵	-۰/۱	-۱/۸	۹۰
۴۲	۲۶/۰۷۴	۳۹/۴۶۰	۲۷/۱۹۶	۳۹/۶۵۱	۱۵	-۰/۹	-۴/۴	۹۰
۴۳	۲۶/۱۶۷	۴۰/۴۱۴	۲۷/۴۹۹	۴۰/۷۹۵	۱۵	-۲۶/۵	۵/۴	۹۰
۴۴	۲۶/۳۴۹	۳۶/۴۴۲	۲۷/۳۶۵	۳۶/۷۵۹	۱۵	۴/۷	-۱۶/۱	۹۰
۴۵	۲۶/۵۲۶	۳۴/۳۶۰	۲۷/۶۵۰	۳۴/۸۳۹	۱۵	۳۴/۷	۳۲/۸	۳۰
۴۶	۲۶/۵۶۴	۳۸/۶۷۸	۲۶/۹۲۲	۳۸/۶۴۰	۱۵	۰/۰	-۱۵/۲	۹۰
۴۷	۲۶/۹۲۲	۳۸/۶۴۰	۲۷/۵۲۰	۳۸/۶۱۰	۱۵	-۱/۲	-۱۵/۶	۹۰
۴۸	۲۷/۱۹۶	۳۹/۶۵۱	۲۷/۸۸۰	۴۰/۰۷۰	۱۵	-۳/۲	-۵/۱	۹۰
۴۹	۲۷/۳۶۵	۳۶/۷۵۹	۲۸/۶۵۰	۳۶/۹۰۶	۱۵	۸/۶	-۲/۲	۹۰
۵۰	۲۷/۴۸۹	۴۰/۷۹۵	۲۷/۹۹۷	۴۰/۸۰۰	۱۵	-۲۷/۵	-۰/۹	۹۰
۵۱	۲۷/۵۲۰	۳۸/۶۱۰	۲۷/۵۹۴	۳۸/۵۵۱	۱۵	۹/۷	-۱۲/۸	۹۰
۵۲	۲۷/۵۹۴	۳۸/۵۵۱	۲۸/۳۳۴	۳۸/۵۰۳	۱۵	-۱/۲	-۱۶/۵	۹۰
۵۳	۲۷/۶۵۰	۳۴/۸۳۹	۲۸/۰۰۶	۳۵/۷۰۶	۱۵	۴۹/۵	۳/۳	۳۰
۵۴	۲۷/۸۸۰	۴۰/۰۷۰	۲۸/۹۹۰	۴۰/۱۲۰	۱۵	۰/۷	-۷/۶	۹۰
۵۵	۲۷/۹۹۷	۴۰/۸۰۰	۲۸/۴۹۷	۴۰/۸۹۰	۱۲	-۲۶/۹	۶/۸	۹۰
۵۶	۲۸/۰۰۶	۳۵/۷۰۶	۲۸/۲۷۲	۳۶/۲۱۵	۱۵	۴۹/۰	۱۰/۶	۳۰
۵۷	۲۸/۱۷۰	۴۲/۶۸۹	۳۳/۷۱۴	۴۴/۳۱۰	۱۵	-۰/۶	-۰/۳	۹۰
۵۸	۲۸/۲۷۲	۳۶/۲۱۵	۲۸/۶۵۰	۳۶/۹۰۶	۱۵	۱۸/۳	۱۴/۱	۹۰
۵۹	۲۸/۲۷۲	۳۶/۲۱۵	۲۹/۱۴۳	۳۶/۱۲۵	۱۵	۶/۱	۲۷/۵	۳۰
۶۰	۲۸/۳۵۴	۳۸/۵۰۳	۲۸/۸۴۶	۳۸/۱۹۲	۱۵	۸/۴	-۱۵/۱	۹۰
۶۱	۲۸/۴۹۷	۴۰/۸۹۰	۲۸/۸۸۱	۴۰/۸۹۴	۱۲	-۲۷/۹	۲/۳	۹۰
۶۲	۲۸/۵۲۴	-۲/۵۴۰	۳۱/۴۴۵	۵/۰۰۱	۱۵	۲/۹	-۴/۷	۹۰
۶۳	۲۸/۶۵۰	۳۶/۹۰۶	۲۹/۵۳۳	۳۷/۳۳۳	۱۵	۳/۱	۳/۶	۹۰
۶۴	۲۸/۸۴۶	۳۸/۱۹۲	۲۸/۹۳۳	۳۷/۹۵۲	۱۵	۱۵/۸	-۷/۹	۹۰
۶۵	۲۸/۸۸۱	۴۰/۸۹۴	۲۹/۲۳۵	۴۰/۷۱۳	۱۲	-۲۶/۶	-۱۲/۷	۹۰
۶۶	۲۸/۹۳۳	۳۷/۹۵۲	۲۹/۵۳۳	۳۷/۳۳۳	۱۵	۱۰/۹	-۱۴/۵	۹۰
۶۷	۲۸/۹۹۰	۴۰/۱۲۰	۲۹/۷۰۰	۴۰/۴۰۰	۱۵	-۲/۹	-۸/۸	۹۰
۶۸	۲۹/۱۴۳	۳۶/۱۲۵	۳۱/۲۶۷	۳۵/۰۱۷	۱۵	-۴/۷	۱۷/۸	۳۰
۶۹	۲۹/۲۳۵	۴۰/۷۱۳	۳۰/۱۴۲	۴۰/۷۲۲	۱۵	-۲۷/۱	۵/۸	۹۰
۷۰	۲۹/۵۳۳	۳۷/۳۳۳	۳۱/۲۵۵	۳۸/۴۸۷	۱۵	-۱۱/۲	-۰/۸	۹۰
۷۱	۲۹/۷۰۰	۴۰/۴۰۰	۳۰/۷۷۰	۴۰/۵۸۰	۱۵	-۰/۵	-۱۰/۸	۹۰
۷۲	۳۰/۱۴۲	۴۰/۷۲۲	۳۰/۷۷۰	۴۰/۵۸۰	۱۵	-۲۸/۰	۰/۱	۹۰
۷۳	۳۰/۷۷۰	۴۰/۵۸۰	۳۱/۲۰۰	۴۰/۶۰۰	۱۵	-۲۶/۶	-۰/۶	۹۰
۷۴	۳۱/۲۰۰	۴۰/۶۰۰	۳۲/۸۵۰	۴۲/۸۹۰	۱۵	-۲۶/۲	۵/۵	۹۰
۷۵	۳۱/۲۵۵	۳۸/۴۸۷	۳۱/۲۶۷	۳۵/۰۱۷	۱۵	۴/۲	-۲/۴	۹۰
۷۶	۳۱/۲۶۷	۳۵/۰۱۷	۳۲/۲۶۰	۳۲/۶۴۰	۱۵	۲/۴	۰/۱	۹۰

No.	long.1 (°E)	lat.1 (°N)	long.2 (°E)	lat.2 (°N)	depth (km)	SS (mm/yr)	NS (mm/yr)	Dip (°)
۱	۱۷/۷۸۹	۴۲/۴۸۰	۱۹/۴۲۰	۴۲/۲۲۸	۱۵	۰/۳	۳/۸	۹۰
۲	۱۷/۹۸۰	۳۹/۲۶۰	۱۹/۷۶۰	۳۷/۴۱۵	۱۵	-۳/۶	-۳/۸	۹۰
۳	۱۹/۴۲۰	۴۲/۲۲۸	۲۰/۴۶۸	۴۰/۰۱۹	۱۵	-۷/۳	۳/۰	۹۰
۴	۱۹/۴۲۰	۴۲/۲۲۸	۲۲/۶۲۳	۴۳/۱۷۲	۱۵	-۱/۳	-۳/۵	۹۰
۵	۱۹/۷۶۰	۳۷/۴۱۵	۲۰/۶۷۶	۳۸/۹۲۱	۱۵	-۴۱/۳	۲/۷	۹۰
۶	۱۹/۷۶۰	۳۷/۴۱۵	۲۱/۳۲۰	۳۵/۸۱۳	۱۵	-۱۹/۸	۳۳/۳	۳۰
۷	۲۰/۴۶۸	۴۰/۰۱۹	۲۲/۷۲۲	۴۰/۷۴۰	۱۵	۲/۴	-۳/۸	۹۰
۸	۲۰/۴۶۸	۴۰/۰۱۹	۲۰/۶۷۶	۳۸/۹۲۱	۱۵	-۷/۶	۰/۵	۹۰
۹	۲۰/۶۷۶	۳۸/۹۲۱	۲۱/۱۴۲	۳۸/۳۰۵	۱۵	۱۶/۶	-۱۹/۳	۹۰
۱۰	۲۰/۶۷۶	۳۸/۹۲۱	۲۲/۲۷۷	۳۸/۹۰۴	۱۵	-۹/۰	-۵/۴	۹۰
۱۱	۲۱/۱۴۲	۳۸/۳۰۵	۲۱/۶۴۲	۳۸/۱۸۱	۰۲	۱/۶	-۲۱/۲	۹۰
۱۲	۲۱/۳۲۰	۳۵/۸۱۳	۲۳/۶۵۰	۳۴/۶۲۰	۱۵	-۶/۷	۳۶/۵	۳۰
۱۳	۲۱/۶۴۲	۳۸/۱۸۱	۲۱/۸۱۸	۳۸/۳۸۶	۰۲	-۱۸/۰	-۵/۹	۹۰
۱۴	۲۱/۸۱۸	۳۸/۳۸۶	۲۲/۷۵۵	۳۸/۰۰۴	۰۲	۱/۰	-۱۴/۹	۹۰
۱۵	۲۲/۲۷۷	۳۸/۹۰۴	۲۲/۷۸۸	۳۸/۸۹۳	۱۵	-۸/۹	-۹/۹	۹۰
۱۶	۲۲/۶۲۳	۴۳/۱۷۲	۲۳/۲۹۷	۴۲/۸۶۸	۱۵	۱/۶	-۲/۶	۹۰
۱۷	۲۲/۷۲۲	۴۰/۷۴۰	۲۴/۰۲۸	۴۰/۷۳۱	۱۵	۴/۸	-۷/۲	۹۰
۱۸	۲۲/۷۵۵	۳۸/۰۷۴	۲۳/۱۰۲	۳۸/۱۷۳	۱۵	-۷/۰	-۷/۶	۹۰
۱۹	۲۲/۷۸۸	۳۸/۸۹۳	۲۳/۶۸۰	۳۹/۴۲۶	۱۵	-۱۳/۹	-۵/۰	۹۰
۲۰	۲۳/۱۰۲	۳۸/۱۷۳	۲۳/۸۳۷	۳۸/۴۲۳	۱۵	-۶/۸	-۳/۶	۹۰
۲۱	۲۳/۲۹۷	۴۲/۸۶۸	۲۳/۹۵۳	۴۲/۶۷۸	۱۵	۱/۱	-۲/۶	۹۰
۲۲	۲۳/۶۵۰	۳۴/۶۲۰	۲۴/۲۶۹	۳۴/۳۹۴	۱۵	-۱/۴	۳۵/۹	۳۰
۲۳	۲۳/۶۸۰	۳۹/۴۲۶	۲۴/۹۸۲	۳۸/۹۴۱	۱۵	۱۶/۷	-۷/۱	۹۰
۲۴	۲۳/۶۸۰	۳۹/۴۲۶	۲۳/۸۹۰	۳۹/۷۵۲	۱۵	-۱۶/۳	۱۷/۶	۹۰
۲۵	۲۳/۸۳۷	۳۸/۴۲۳	۲۴/۵۱۹	۳۸/۸۸۲	۰۲	-۲/۷	-۳/۰	۹۰
۲۶	۲۳/۸۹۰	۳۹/۷۵۲	۲۴/۷۰۰	۴۰/۱۳۹	۱۵	-۲۳/۷	۱۰/۶	۹۰
۲۷	۲۳/۹۵۳	۴۲/۶۷۸	۲۵/۶۱۲	۴۲/۶۲۵	۱۵	۰/۲	-۲/۵	۹۰
۲۸	۲۴/۰۲۸	۴۰/۷۳۱	۲۴/۷۰۰	۴۰/۱۳۹	۱۵	۹/۸	-۳/۶	۹۰
۲۹	۲۴/۲۶۹	۳۴/۳۹۴	۲۴/۶۰۹	۳۴/۳۳۵	۱۵	۶/۲	۳۵/۱	۳۰
۳۰	۲۴/۵۱۹	۳۷/۸۸۲	۲۵/۰۶۸	۳۸/۲۴۱	۱۵	۰/۰	۵/۳	۹۰
۳۱	۲۴/۶۰۹	۳۴/۳۳۵	۲۵/۱۱۷	۳۵/۳۳۶	۱۵	-۳/۳	-۱/۷	۹۰
۳۲	۲۴/۶۰۹	۳۴/۳۳۵	۲۶/۵۲۶	۳۴/۳۶۰	۱۵	۱۷/۱	۳۸/۸	۳۰
۳۳	۲۴/۷۰۰	۴۰/۱۳۹	۲۶/۱۶۷	۴۰/۴۱۴	۱۵	-۲۶/۸	-۲/۸	۹۰
۳۴	۲۴/۹۸۲	۳۸/۹۴۱	۲۵/۰۶۸	۳۸/۲۴۱	۱۵	۱۹/۴	۴/۵	۹۰
۳۵	۲۴/۹۸۲	۳۸/۹۴۱	۲۵/۴۱۲	۳۹/۳۱۱	۱۵	-۲/۰	-۰/۷	۹۰
۳۶	۲۵/۰۶۸	۳۸/۲۴۱	۲۵/۶۰۴	۳۸/۶۷۴	۱۵	-۱۱/۲	-۷/۸	۹۰
۳۷	۲۵/۱۱۷	۳۵/۳۳۶	۲۵/۲۹۳	۳۶/۳۱۳	۱۵	-۴/۴	-۶/۸	۹۰
۳۸	۲۵/۲۹۳	۳۶/۳۱۳	۲۶/۳۴۹	۳۶/۴۴۲	۱۵	۷/۷	-۹/۶	۹۰

Site	long. (°E)	lat. (°N)	V_e _(Masson) (mm/yr)	V_n _(Masson) (mm/yr)	σ_e (mm/yr)	σ_n (mm/yr)	corr.	V_e _(IRAN) (mm/yr)	V_n _(IRAN) (mm/yr)	V_e _(AIA) (mm/yr)	V_n _(AIA) (mm/yr)	V_e _(all) (mm/yr)	V_n _(all) (mm/yr)
CHAB	۶۰/۶۹۴	۲۵/۳۰۰	۵/۰۵	۰۷/۲۳	۱/۱۱	۱/۰۲	۰/۰۲۴	۰/۲۲۰	۰/۵۷۱	۳/۳۸۵	۸/۶۷۵	۳/۳۱۳	۹/۳۶۸
DAMO	۴۷/۷۴۴	۳۹/۵۱۳	۷/۴۵	۱۵/۳۱	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۰۱۳	۱/۰۸۸	۰/۳۸۰	۳/۵۱۸	۶/۲۳۹	۴/۳۳۹	۱۲/۴۳۳
HARA	۵۴/۶۰۸	۳۰/۰۷۹	۱/۶۸	۱۳/۵۸	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۰۲۳	-۱/۱۸۵	۵/۴۸۸	۲/۸۸۶	۷/۷۷۰	۱/۳۲۲	۱۴/۱۶۲
ILAM	۴۶/۴۲۷	۳۳/۶۴۸	-۳/۱۴	۱۶/۴۶	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۰۱۶	-۱/۴۹۴	۳/۲۴۶	۱/۹۳۱	۶/۵۹۲	-۰/۶۳۸	۱۴/۶۰۶
JASK	۵۷/۷۶۷	۲۵/۶۳۶	۳/۵۲	۱۲/۶۲	۱/۰۴	۱/۰۰	۰/۰۲۶	۰/۰۴۴	-۱/۲۰۰	۳/۰۹۶	۸/۷۱۷	۲/۷۴۶	۸/۰۵۲
KASH	۵۸/۴۶۴	۳۵/۲۹۳	۰/۷۴	۰۵/۷۱	۰/۸۷	۰/۸۴	۰/۰۱۹	۰/۰۲۳	۰/۵۰۹	۳/۷۱۰	۶/۸۴۱	۳/۲۷۴	۷/۵۵۸
KERM	۵۷/۱۱۹	۳۰/۲۷۷	۱/۴۲	۱۶/۳۰	۱/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۲۴	-۱/۹۹۱	۳/۶۸۹	۳/۲۳۸	۷/۶۸۰	۰/۹۵۵	۱۲/۶۴۰
KHAS	۵۶/۲۳۳	۲۶/۲۰۸	۵/۷۹	۲۵/۵۰	۱/۰۱	۰/۹۸	۰/۰۲۵	۳/۵۲۹	۱۰/۰۷۳	۲/۹۳۰	۸/۶۲۳	۶/۰۹۰	۱۹/۵۲۱
KHOS	۴۸/۴۰۹	۳۰/۲۴۶	۰/۵۸	۱۹/۱۰	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۰۱۸	۰/۶۶۰	۷/۵۹۷	۱/۸۵۸	۷/۹۶۵	۱/۵۶۱	۱۷/۴۸۸
KORD	۵۴/۱۹۹	۳۶/۸۶۰	-۲/۵۳	۰۷/۴۸	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۰۱۷	-۰/۵۴۳	-۴/۲۲۸	۳/۴۵۷	۶/۷۵۴	۲/۳۲۵	۲/۵۶۴
KSHA	۵۱/۲۵۵	۳۴/۱۵۰	-۱/۱۸	۱۲/۶۹	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۰۱۷	-۱/۱۸۹	۴/۵۱۱	۲/۸۹۳	۷/۲۱۱	۰/۷۳۳	۱۳/۰۲۵
LAMB	۵۴/۰۰۴	۲۶/۸۸۳	۲/۵۲	۲۰/۹۶	۱/۱۸	۱/۰۰	۰/۰۱۹	۰/۹۵۱	۶/۰۳۲	۲/۶۷۱	۸/۵۳۹	۳/۲۹۷	۱۵/۵۹۵
MAHM	۵۲/۲۸۵	۳۶/۵۸۸	-۲/۴۳	۰۶/۴۵	۱/۶۰	۱/۵۶	۰/۰۱۳	-۰/۵۶۶	-۲/۹۶۸	۳/۲۹۹	۶/۸۲۲	۲/۲۴۴	۴/۰۲۰
MIAN	۴۶/۱۶۲	۳۶/۹۰۸	-۱/۶۶	۱۳/۷۰	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۰۱۳	-۴/۰۴۴	۲/۷۲۵	۲/۶۵۱	۶/۹۷۹	-۱/۷۶۵	۱۵/۶۶۲
MSHN	۵۹/۴۸۰	۳۶/۳۳۵	۰/۲۹	۰۲/۷۰	۱/۳۶	۱/۲۸	۰/۰۱۶	-۰/۶۴۶	-۵/۱۰۴	۳/۷۹۲	۶/۲۶۶	۲/۶۱۸	۳/۲۳۳
MUSC	۵۸/۵۶۹	۲۳/۵۶۴	۸/۸۵	۲۵/۹۵	۱/۱۱	۱/۰۲	۰/۰۲۲	۶/۰۶۷	۱۰/۴۶۰	۳/۳۰۸	۹/۲۴۷	۹/۰۱۸	۲۰/۰۷۰
NSSP	۴۴/۵۰۳	۴۰/۲۲۶	۲/۲۳	۰۷/۱۷	۱/۲۹	۱/۲۱	۰/۰۰۷	۰/۱۵۵	-۲/۱۴۱	۳/۹۳۵	۶/۰۳۱	۴/۷۰۱	۹/۳۲۴
RAZD	۵۵/۸۰۰	۲۸/۳۳۰	۳/۷۶	۱۴/۷۰	۱/۰۴	۱/۰۰	۰/۰۲۲	-۰/۹۱۸	۴/۴۹۷	۲/۹۱۹	۸/۱۱۳	۱/۸۳۷	۱۳/۸۴۹
ROBA	۵۶/۰۷۰	۳۳/۳۶۹	۱/۳۰	۱۰/۶۷	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۰۲۰	-۰/۶۳۴	۱/۴۰۰	۳/۳۸۵	۷/۲۲۰	۲/۴۵۰	۸/۸۵۷
SEMN	۵۳/۵۶۴	۳۵/۶۶۲	۰/۲۸	۰۹/۰۴	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۰۱۸	-۰/۲۳۵	۱/۴۵۷	۳/۲۳۳	۶/۹۵۱	۲/۸۶۲	۸/۸۵۴
SHAH	۵۳/۷۴۸	۳۲/۳۶۷	-۱/۴۷	۱۲/۶۵	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۰۱۸	-۰/۶۳۹	۵/۸۰۴	۲/۵۶۰	۷/۴۶۳	۰/۹۲۷	۱۴/۸۲۲
SHIR	۵۷/۳۰۸	۳۷/۸۱۴	-۱/۸۰	۰۳/۵۴	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۰۱۸	-۰/۷۶۹	-۴/۹۹۰	۳/۶۵۸	۶/۵۲۱	۲/۳۳۳	۱/۶۱۶
TEHN	۵۱/۳۳۴	۳۵/۶۹۷	۰/۱۹	۱۱/۶۳	۱/۰۱	۱/۰۰	۰/۰۱۵	۰/۳۲۸	۲/۲۱۵	۳/۱۱۰	۶/۹۸۰	۲/۴۹۵	۱۰/۰۲۳
YAZT	۶۱/۰۳۴	۳۶/۶۰۱	۰/۷۲	۰۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۰۱۸	-۱/۲۷۷	-۴/۷۷۶	۳/۸۸۲	۶/۴۶۹	۲/۲۷۱	۱/۶۳۷
ZABO	۶۱/۵۱۷	۳۱/۰۴۹	۱/۹۷	۰۲/۰۱	۱/۰۸	۰/۹۸	۰/۰۲۲	-۱/۴۱۹	-۵/۰۶۳	۳/۸۴۸	۷/۲۳۹	۲/۲۸۷	۱/۸۷۶

کتابنگاری

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، دوره ۳۵، شماره ۱، ۵۹-۷۳.

References

- Armijo, R., Flerit, F., King, G. & Meyer, B. 2003- Linear elastic fracture mechanics explains the past and present evolution of the Aegean, Earth and Planetary Science Letters 217, 85-95.
- Flerit, F., Armijo, R., King, G. C. P., Meyer, B. & Barka, A., 2003- Slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart determined from GPS velocity vectors, *Geophys. J. Int.* (2003) 154, 1-7.
- Flerit, F., Armijo, R., King, G. & 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.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignieres, M., Nankali, H. & Van Gorp, S., 2007- Large-scale 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.
- 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. & 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.
- Okada, Y., 1985- Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. seism. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- 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., Dmitrova, A., Filikova, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. & 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, doi:10.1029/2005JB004051.
- Savage, J. & Burford, R., 1973- Geodetic determination of relative plate motion in Central California, *J. geophys. Res.*, 78, 832-845.
- Segall, P., 2010- Earthquake and volcano deformation, Princeton University Press, 458 pp.
- Steketee, J. A., 1958- On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, *Can. J. Phys.* 36, 192-205.