

مدل سازی تغییر مختصات مسطحاتی شبکه ژئودزی کلاسیک البرز در چارچوب مرجع ITRF

نسیم جعفری^{۱*}، بهزاد وثوقی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
n.jf26@yahoo.com

^۲دانشیار گروه ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
(عضو قطب علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی)
vosoghi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۲، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۳)

چکیده

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 مدل سازی وابسته به زمان جابه جایی و تغییر مختصات نقاط سطحی زمین در اثر حرکت صفحه های زمین ساختی در محدوده رشته کوه های البرز و تخمین جابجایی در نقاطی از یک شبکه ژئودزی کلاسیک در البرز است. این مدل سازی بر اساس بردارهای سرعت مشاهدات GPS جمور و همکاران بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸، انجام شده است. مدل سازی بر اساس روابط تحلیلی اکادا صورت گرفته است. در این تحقیق با استفاده از بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک مشخصات گسلی شامل عمق قفل شدگی و نابرجایی ها محاسبه کنیم برداری سرعت بین لرزه ای نقاط به گونه ای مدل سازی شده که با میدان سرعت ناشی از مشاهدات GPS منطقه بهترین انطباق را باهم داشته باشند. کمترین جذر خطای مربعی متوسط (RMSE) مدل سازی حرکات بین لرزه ای برای مدلی که بهترین انطباق را با مشاهدات GPS داشت برابر 0.97 mm/yr محاسبه گردید. پس از مدل سازی جابجایی ناشی از حرکات بین لرزه ای، جابجایی های ناشی از زمین لرزه های بزرگ تر از $5 M_w$ با استفاده از روابط تحلیلی اکادا مستقیماً محاسبه شد و با جمع کردن این دو جابجایی، جابجایی های کلی به دست آمد. با استفاده از این مدل سازی، جابجایی در نقاطی از یک شبکه ژئودزی کلاسیک که ۲۵ سال از تاریخ برداشت آن ها می گذرد تخمین زده شد و تغییراتی حداکثری تقریبی 80 سانتیمتری در برخی نقاط محاسبه گردید که قابل چشم پوشی نیستند.

واژگان کلیدی: میدان سرعت GPS، روابط تحلیلی اکادا، جذر خطای مربعی متوسط (RMSE)، شبکه ژئودزی کلاسیک، مختصات مسطحاتی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

اندازه‌گیری تغییر شکل پوسته به روش‌های مدرن امروزی تأثیرات مهمی در مطالعات زمین‌شناسی زمان حاضر دارند. با وجود اینکه این اندازه‌گیری‌ها اطلاعات بارزشی در مورد چگونگی تغییر شکل کنونی زمین در اختیار محققین قرار می‌دهند، ولی جوابی برای علت این تغییر شکل‌ها ندارند. در مطالعات تغییر شکل پوسته، مدل‌های گسلی که بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، ژئودتیکی و لرزه‌ای تنظیم شده‌اند دید بارزشی از ویژگی‌های یک گسل و رفتار آن در طول زمان فراهم می‌کنند. مدل‌ها بر اساس مشاهدات گذشته برآوردهایی از تغییر شکل‌های آینده و مخاطرات لرزه‌ای در اختیار محققین قرار می‌دهند که برای کلان‌شهرهای مجاور مناطق لرزه‌ای فعال بسیار بارزش هستند [۱].

هدف از تحقیق حاضر ارائه مدلی جهت پیش‌بینی تغییر مختصات نقاط سطحی زمین در اثر حرکت دائمی صفحه‌های زمین‌ساختی و زمین‌لرزه‌ها در محدوده رشته-کوه‌های البرز است.

از تحقیقات انجام‌گرفته در این زمینه می‌توان به مقاله رایلینگر و همکاران^۱ [۲] اشاره کرد که در آن فرض بر این است که ساختارهای زمین‌شناسی (گسل‌ها) منطقه مورد مطالعه را به بلوک‌های صلب تقسیم می‌کنند. همچنین در کار دیگری که توسط ورنانت و چری^۲ [۳] انجام شده، از مدل‌سازی به روش المان محدود برای توزیع تغییر شکل استفاده شده است. در تحقیق دیگری که توسط فلریت^۳ [۴] انجام شده از تئوری نابرجایی برای افراز نرخ لغزش استفاده شده است. در این مقاله از نابرجایی کشسان برای مدل‌سازی تغییر شکل پوسته استفاده می‌شود و نیازی به فرض بلوک‌های صلب در آن نیست.

مدل ارائه‌شده از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. در قسمت اول مؤلفه‌های افقی سرعت ناشی از حرکت‌های دائم و بین لرزه‌ای محاسبه می‌شوند. بدین منظور با استفاده از مشاهدات GPS و بر اساس نظریه نابرجایی، مدل قادر به پیش‌بینی مؤلفه‌های افقی سرعت در هر موقعیت از محدوده مورد مطالعه است، که در این قسمت

برای دستیابی به مدلی که بهترین مطابقت با مشاهدات داشته باشد از روش تکاملی الگوریتم ژنتیک استفاده کردیم. در قسمت دوم مؤلفه‌های افقی سرعت، ناشی از حرکت هم لرزه توسط مدل بر اساس نظریه نابرجایی محاسبه می‌شوند. جهت محاسبه تغییر مختصات مابین دو مقطع زمانی، سرعت پیش‌بینی‌شده توسط مدل در قسمت اول به اختلاف زمانی ضرب شده و با جابه‌جایی مرتبط با زمین‌لرزه‌های رخ داده در پی‌ریود زمانی مشخص شده که در قسمت دوم مدل محاسبه شده جمع برداری می‌شود.

۲- مدل‌سازی تغییر شکل با استفاده از روابط تحلیلی اکادا

کاربرد مدل‌های گسلس برای ژئودزی و لرزه‌نگاری پس از معرفی مدل جابجایی الاستیک توسط استگتی^۴ در سال ۱۹۵۸ میلادی آغاز شد که به متخصصان ژئوفیزیک امکان مطالعه ویژگی‌های گسل و درک سازوکار حرکت آن را می‌داد. به منظور مدل‌سازی جابجایی‌های ناشی از لغزش در گسل‌ها، از مدل تحلیلی اکادا استفاده شده است. مدل اکادا بر پایه تئوری نابرجایی فرموله شده است. در این مدل ابتدا مدل‌سازی میدان تغییر شکل حاصل از یک تک نیرو (منبع نقطه‌ای) انجام می‌گیرد و سپس با انتگرال‌گیری از روابط منبع نقطه‌ای، میدان تغییر شکل حاصل از یک منبع مستطیلی (صفحه گسلس) فرموله می‌شود [۵].

مدل غیرخطی اکادا، رابطه بین پارامترهای هندسی و فیزیکی گسل با مشاهدات جابجایی عمود بر هم را بیان می‌کند. با استفاده از مدل اکادا می‌توان جابه‌جایی‌های ناشی از یک منبع نقطه‌ای و مستطیل شکل محدود را در فضای نیمه محدود هموزن و ایزوتروپیک با استفاده از قانون‌های الاستیسیته خطی کلاسیک در سه امتداد x ، y و z به دست آورد. پارامترهای ورودی مدل به دو دسته پارامترهای هندسی و پارامترهای فیزیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. پارامترهای هندسی شامل طول، عرض، شیب، عمق گسل و بردارهای لغزش گسل (U_1, U_2, U_3) و پارامترهای فیزیکی شامل ضرایب لامه (μ و λ) برای ماده الاستیک ایزوتروپیک هستند. پارامترهای خروجی مدل نیز، بردارهای جابه‌جایی برای نقاط مشاهداتی است.

^۱ Reilinger et al

^۲ Vernant and chery, 2006b

^۳ Flerit et al., 2004

^۴ Steketee

۱-۲- روابط تحلیلی اکادا برای منبع نقطه‌ای

$$\int_0^L d \xi' \int_0^W d \eta' \quad (7)$$

بهتر است تغییر متغیرهای زیر را انجام دهیم:

$$\begin{cases} x - \xi' = \zeta \\ p - \eta' = \eta \end{cases} \quad (8)$$

همچنان که قبلاً گفته شد $p = y \cos \delta + d \sin \delta$ است. بنابراین انتگرال فرمول ۷ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\int_x^{x-L} d \xi' \int_p^{p-W} d \eta' \quad (9)$$

۳- الگوریتم ژنتیک و نحوه کاربرد آن در این تحقیق

روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق بهینه‌سازی تکاملی^۴ به روش الگوریتم ژنتیک پیوسته است که در آن متغیرهای مسئله مقادیر نامتناهی و پیوسته اختیار می‌کنند. الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند. این الگوریتم، هیچ محدودیتی برای تابع بهینه شونده، مثل مشتق پذیری یا پیوستگی لازم ندارد و در روند جستجو خود تنها به تعیین مقدار تابع هدف^۵ در نقاط مختلف نیاز دارد و هیچ اطلاعات کمکی دیگری، مثل مشتق تابع را استفاده نمی‌کند. لذا می‌توان در مسائل مختلف اعم از خطی، پیوسته یا گسسته استفاده شود [۶].

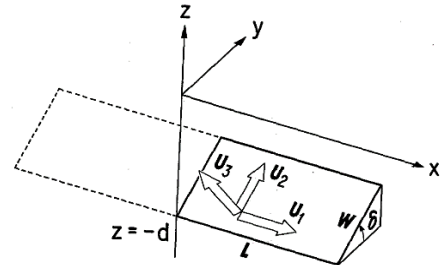
در این تحقیق مدل اکادا در تابع هدف الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده است. هر جواب یک کروموزوم^۶ (که در این تحقیق همان جذر خطای مربعی متوسط^۷ است) و مجهولات (که در این تحقیق نرخ لغزش‌ها و عمق قفل شدگی مجموعه گسل‌ها است) در این جا ژن‌ها^۸ هستند.

برای تعریف محدوده مجهولات مسئله برای الگوریتم ژنتیک از اطلاعات زمین‌شناسی موجود از گسل‌های

Steketee در سال ۱۹۵۸ نشان داد که میدان جابه‌جایی $u_i(x_1, x_2, x_3)$ ناشی از جابه‌جا شدگی $(\zeta_1, \zeta_2, -\zeta_3)$ در سرتاسر سطح Σ در یک محیط ایزوتروپیک با فرمول زیر است [۵]:

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_i \left[\lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_i^n}{\partial \zeta_k} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \zeta_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \zeta_j} \right) \right] v_k d \Sigma \quad (1)$$

که در آن δ_{ij} دلتای کرونیکر، λ و μ ضرایب لامه، v_k کسینوس هادی‌های امتداد نرمال بر المان سطحی $d \Sigma$ می‌باشند. u_i^j مؤلفه I-ام جابه‌جایی در نقطه (x_1, x_2, x_3) ناشی از امتداد J-ام نیروی نقطه‌ای با بزرگی F در $(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3)$ است.



شکل ۱- هندسه مدل منبع که در آن (U_1, U_2, U_3) مولفه‌های لغزش، L و W طول و عرض گسل و δ شیب گسل هستند [۵].

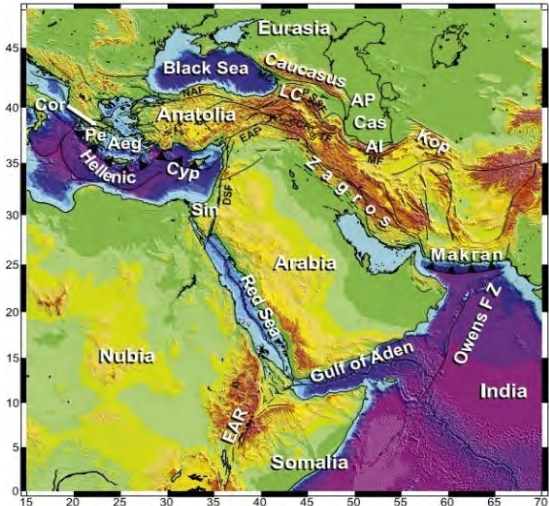
اینجا از سیستم مختصات کارتزینی که در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده می‌کنیم. محیط ارتجاعی و الاستیک منطقه $z \leq 0$ را اشغال می‌کند و محور x موازی امتداد لغزش گسل است. به علاوه المان‌های اصلی U_1 و U_2 را برای گسل‌های امتداد لغزش^۲، شیب لغزش^۳ و کششی^۳ در تعیین جابه‌جایی تعریف می‌کنیم.

۲-۲- روابط تحلیلی اکادا برای منبع مستطیلی

برای یک گسل مستطیل شکل محدود (متناهی)، با طول L و عرض W ، میدان تغییر شکل می‌تواند با قرار دادن $\xi - x$ و $y - \eta \cos \delta$ و $d - \eta \sin \delta$ به جای x و y و در معادلات به دست آمده برای منبع نقطه‌ای و با انجام انتگرال زیر به دست می‌آید [۵]:

۴ Evolutionary
 ۵ Fitness function
 ۶ chromosome
 ۷ RMSE
 ۸ Gene

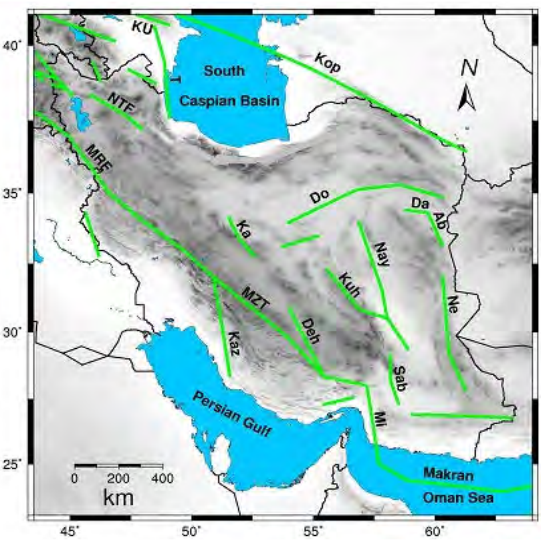
۱ Strike slip
 ۲ Dip slip
 ۳ tensile



شکل ۲- نقشه توپوگرافی و زمین ساخت ساده شده منطقه تأثیر گذار بر روی سرعت منطقه مورد مطالعه [۲]



الف



ب

شکل ۳- انتخاب گسل های فعال عمده در منطقه: (الف) گسل های منطقه عربستان و آناتولی، (ب) گسل های فعال عمده انتخابی داخل فلات ایران با کمی تغییر (حذف گسل های منطقه البرز) [۱]

مربوطه و همچنین اعداد به دست آمده از مدل بلوک برای نرخ لغزش و عمق قفل شدگی استفاده کرده ایم و هندسه گسل ها ثابت فرض شده است.

در این تحقیق هدف حل مسئله بهینه سازی در جایی است که ما به دنبال کمینه کردن مسئله با متغیرهایش هستیم. در ابتدای کار کروموزمها را تعریف می کنیم که آرایه ای از متغیرهای ما هستند. اگر کروموزومها N_{var} متغیر داشته باشند (مسئله بهینه سازی N -بعدی) با P_1, P_2, \dots, P_{var} نشان داده می شوند و در آرایه های $1 \times N_{var}$ ارائه می گردند:

$$chromosome = [P_1, P_2, \dots, P_{var}] \quad (10)$$

هر کروموزم یک مقدار برازشی دارد که با استفاده از تابع هزینه f در متغیرهای P_1, P_2, \dots, P_{var} ارزیابی می شود.

$$costfunction = f(chromosome) = f(P_1, P_2, \dots, P_{var}) \quad (11)$$

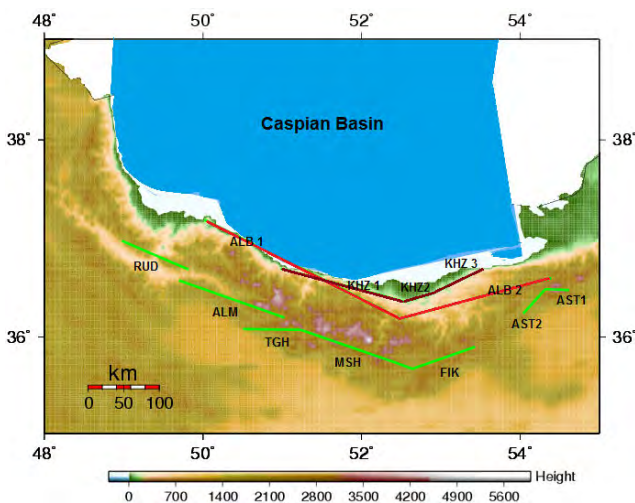
ما در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک پیوسته استفاده می کنیم و متغیرهایمان در یک بازه معرفی می گردند [۶]. در نهایت با ۳۰۰ دور تکرار الگوریتم ژنتیک و ۵۰ عدد تعداد جمعیت در هر بازه به الگوریتم ژنتیک خاتمه می دهیم. و کمترین جذر خطای مربعی متوسط جواب این بهینه سازی است.

۴- مدل سازی

المان های گسلی مدل به ۳ بخش تقسیم شدند: (۱) المان های مابین صفحات زمین ساختی عربستان، اوراسیا، آفریقا و هند برگرفته از مقاله رایلینگر و همکاران ۲۰۰۶ (۲) المان های داخل صفحه ای ایران بجز ناحیه البرز برگرفته از مقاله راست بود و همکاران ۱۳۹۱ (۳) المان های گسلی مربوط به ناحیه البرز. المان های گسلی شماره مربوط به ناحیه البرز که شامل عمق قفل شدگی و لغزش ها است در این تحقیق با روش بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک به دست می آید.

۴-۲- مدل سازی حرکات بین لرزه‌ای

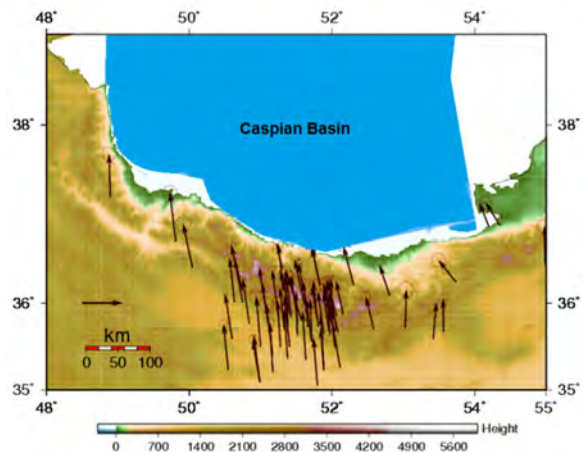
در مدل سازی انجام شده فرض بر این است که گسل‌ها ساختارهای المان‌های مستطیلی هستند که از عمق ۱۵ کیلومتر تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر (عمق بی‌نهایت) در یک نیم فضای کُشسان امتداد دارند. نسبت پواسن نیم فضا ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است [۸]. برای تطابق جابجایی به دست آمده ناشی از گسل‌ها با استفاده از مدل تحلیلی اکادا و جابجایی‌های مشاهدات بردار سرعت GPS در این منطقه از الگوریتم ژنتیک استفاده کردیم. برای معرفی محدوده مجهولات در این تحقیق از تحقیقات انجام شده در این ناحیه استفاده کردیم (جدول ۱). به دلیل حساسیت بیشتر جابجایی‌ها، به مؤلفه‌های نابرجایی و عمق قفل شدگی [۹]، در این تحقیق مشخصات هندسی گسل‌ها را ثابت فرض کردیم و نرخ لغزش‌ها و عمق قفل شدگی را مجهول در نظر گرفتیم. برای عمق قفل شدگی ما محدوده ۰ تا ۱۵ کیلومتر را در نظر گرفته‌ایم، در جدول زیر فهرستی از نرخ لغزش‌های برآورد شده از مقالات مختلف آورده شده است.



شکل ۵- گسل‌های فعال در نظر گرفته شده در منطقه البرز (KZH): خزر، ALB: البرز، AST: آستانه، FIK: فیروزکوه، MSH: مشاء، TGH: طالقان، ALM: الموت، RUD: رودبار

در جدول زیر فهرستی از مؤلفه‌های لغزش امتداد لغز و قائم به دست آمده از مقالات زمین‌شناسی و ژئودزی آورده شده است، الگوریتم ژنتیک برای اجراء شدن نیاز به معرفی محدوده مجهولات دارد، این محدوده باید طوری انتخاب شود که جواب در داخل محدوده وجود داشته باشد در غیر این صورت عملکرد ژنتیک به نادرستی صورت می‌گیرد.

با توجه به در دست داشتن بردار های سرعت محاسبه شده نسبت به اوراسیاء مشاهدات یک شبکه GPS (شکل ۴)، به عنوان قید در این مدل سازی و کم کردن تأثیر گسل های فعال منطقه از آنها، می‌خواهیم رفتار گسل‌های منطقه البرز با جزئیات بیشتر را با استفاده از روابط تحلیلی اکادا طوری مدل سازی کنیم، که خطای مربعی متوسط بین بردارهای جابجایی به دست آمده از مدل سازی و مشاهدات GPS به کمترین مقدار خود برسد. که ما برای رسیدن به مقدار بهینه از روش تکاملی الگوریتم ژنتیک در استفاده کرده‌ایم.



شکل ۴- مشاهدات بردار سرعت GPS محاسبه شده نسبت به اوراسیاء

۴-۱- منطقه مورد مطالعه

رشته‌کوه‌های البرز به طول ۶۰۰ و پهنای ۱۰۰ کیلومتر در طول ساحل جنوبی خزر، از دره سفیدرود تا کپه داغ گسترده شده‌اند. روند عمومی البرز تقریباً شرقی- غربی است ولی تحت تأثیر هسته مقاوم خزر جنوبی، بخش مرکزی آن تحذب آشکاری به طرف جنوب پیدا کرده است. به طوری که مجموعه البرز را از نظر جغرافیایی می‌توان به سه بخش غربی، مرکزی و شرقی تقسیم کرد. [۷] قابل توجه است شهر پرجمعیت تهران واقع در جنوب این کمربند توسط چندین گسل فعال احاطه گشته است. بنابراین ایجاد شبکه‌های GPS موردی در این منطقه به منظور آشکار سازی حرکات گسل‌ها و تعیین چگونگی تغییر شکل آن امری ضروری به نظر می‌رسید. در این تحقیق بعد از اطمینان از صحت نسبی مدل سازی از آن به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی تغییرات جابجایی در یک شبکه ژئودزی کلاسیک که در سال ۱۳۶۷ توسط سازمان نقشه‌برداری و با استفاده از سه دستگاه GPS تک فرکانس برداشت شده است، به کار گرفته می‌شود.

جدول ۱- فهرستی از نرخ لغزش‌های به دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی و ژئودزی در منطقه مورد مطالعه البرز

اسم گسل	نرخ لغزش (به دست آمده از)			نرخ لغزش (به دست آمده از)		
	مدل بلوک		منبع	مطالعات زمین‌شناسی		منبع
	Left lateral(mm/yr)	Closing (mm/yr)		Left lateral(mm/yr)	Closing (mm/yr)	
KHZ _۱	۳/۱	۵/۸	[۱۰]	-	-	-
KHZ _۲	۳/۷	۴/۸	[۱۰]	-	-	-
KHZ _۳	۵/۶	۱/۸	[۱۰]	-	-	-
ALB _۱	۰/۲	۷	[۱۰]	-	-	-
ALB _۲	-	-	-	-	-	-
MSH	۱/۲	۱/۲	[۱۰]	۲	-	[۱۱]
TGH	۱/۵	-۰/۱	[۱۰]	۰/۶-۱/۶	-	[۱۲]
FIK	۲/۱	۰/۴	[۱۰]	۲	-	[۱۳]
AST _۱	۱/۶	۱/۸	[۱۰]	۳/۳	-	[۱۴]
AST _۲	۲/۲	۰/۷	[۱۰]	۳/۳	-	[۱۴]
RUD	۱/۳	-۰/۳	[۱۰]	-	-	-
ALM	۱/۲	۰/۶	[۱۰]	-	-	-

کروموزوم برتر یا همان مؤلفه‌های گسلی مجهول، مربوط به این جذر خطای مربعی متوسط، در جدول ۲ فهرست شدند.

با استفاده از روش معکوس الگوریتم ژنتیک بعد از اجرا و به دست آمدن کمترین جذر خطای مربعی متوسط به دست آمده، مساوی با ۰/۹۷mm/yr، ژن‌های مربوط به این

جدول ۲- ابتدا و انتهای گسل‌های مورد مطالعه در منطقه البرز در این تحقیق به دست آمده از مقالات زمین‌شناسی [۱۵] و نرخ لغزش‌ها و عمق قفل شدگی‌های مدل‌سازی شده در این تحقیق، ts در منبع مربوط به اطلاعات به دست آمده از این تحقیق است.

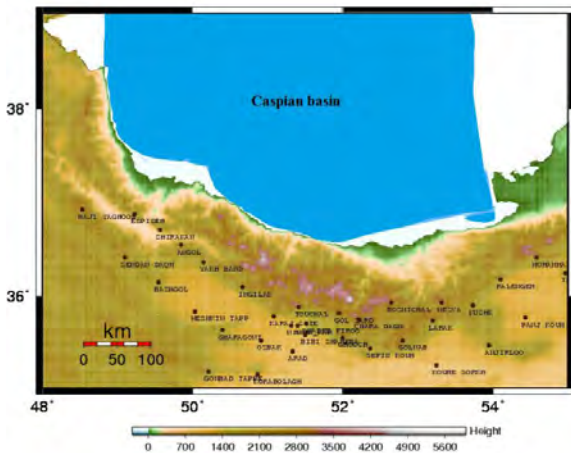
اسم گسل	شروع گسل		انتهای گسل		نرخ لغزش (mm/year)	نرخ لغزش (mm/year)		منبع
	عرض (°N)	طول (°E)	عرض (°N)	طول (°E)		leftlateral	closing	
KHZ _۱	۶۹/۳۶	۵۰/۹۸	۳۶/۳۶	۵۲/۵۴	۱۳/۰۵	۱/۰۱	۴/۲	ts
KHZ _۲	۳۶/۳۵	۵۲/۵۴	۳۶/۶۸	۵۲/۸۸	۱۰/۳۲	۳/۲	۴/۰۷	ts
KHZ _۳	۳۶/۴۴	۵۲/۸۸	۳۶/۶۸	۵۲/۵۲	۱۴/۵۴	۳/۵	۲/۰۳	ts
ALB _۱	۳۷/۱۹	۵۰/۰۱	۳۶/۱۸	۵۲/۴۸	۹/۳۷	۰/۸	۷/۵	ts
ALB _۲	۳۶/۱۸	۵۲/۴۸	۳۶/۶۰	۵۴/۳۹	۹/۵	۴/۴	۵/۶۷	ts
MSH	۳۶/۰۷	۵۱/۲۳	۳۵/۶۷	۵۲/۶۴	۱۴/۸۲	۲/۲	۱/۰۴	ts
TGH	۳۶/۰۸	۵۰/۵۰	۳۶/۰۷	۵۱/۲۳	۱۳/۷۵	۲/۶	۰/۹	ts
FIK	۳۵/۶۷	۵۲/۶۴	۳۵/۸۹	۵۳/۴۳	۱۴/۲۵	۲/۱	۰/۴	ts
AST _۱	۳۶/۴۸	۵۴/۳۱	۳۶/۴۷	۵۴/۶۱	۱۰/۶۲	۱/۳	۰/۶	ts
AST _۲	۳۶/۲۴	۵۴/۰۴	۳۶/۴۸	۵۴/۳۱	۱۱/۰۱	۳/۷	۰/۳	ts
RUD	۳۶/۹۸	۴۸/۹۷	۳۶/۶۸	۴۹/۸۱	۱۴/۲۱	۲/۴	۰/۰۸	ts
ALM	۳۶/۵۷	۴۹/۶۹	۳۶/۱۹	۵۱/۰۲	۱۳/۵۲	۳/۵	۱/۴	ts

ایستگاه GPS محاسبه شد و نتایج به دست آمده از این مدل‌سازی که در شکل زیر ارائه شده است نشان‌دهنده صحت نسبی مدل‌سازی است.

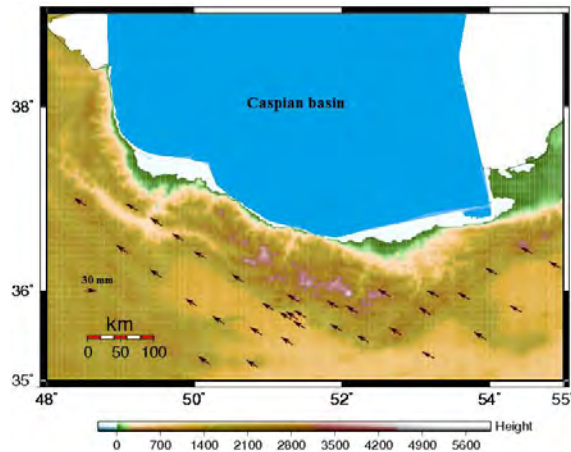
برای اینکه مدل‌سازی از صحت نسبی برخوردار باشد باید بردار باقیمانده بردار سرعت مدل‌سازی شده و بردار سرعت مشاهدات GPS در داخل بیضی خطای مشاهدات GPS قرار گیرد. در شکل ۶ بردار باقیمانده‌های در ۷۷

۴-۴- پیاده‌سازی مدل در شبکه ژئودزی کلاسیک البرز

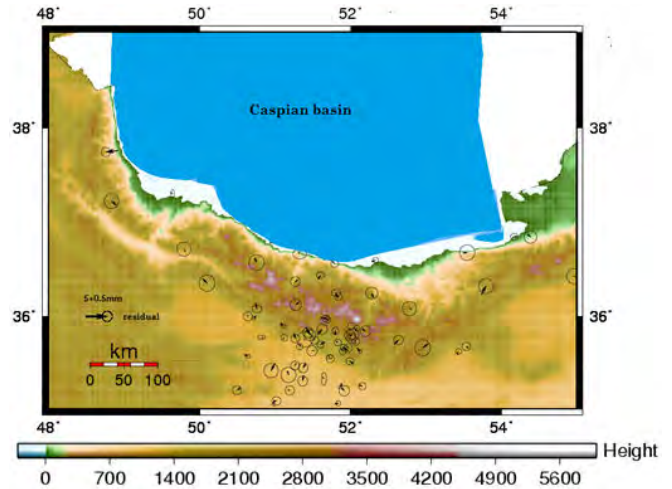
با در دست داشتن موقعیت ایستگاه‌های یک شبکه ژئودزی کلاسیک، با مدل‌سازی انجام‌شده می‌توان سرعت سالیانه نقاط را پیش‌بینی کرد. در این تحقیق از یک شبکه ژئودزی کلاسیک درجه یک برداشت‌شده در سال ۱۳۶۷ توسط سازمان نقشه‌برداری استفاده شده است (شکل ۷). این شبکه با استفاده از سه دستگاه GPS تک فرکانس برداشت شده است [۱۷]. با توجه به بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌های اتفاق افتاده طی این سال‌ها در این منطقه که زمین‌لرزه‌های رودبار ۱۳۶۹ و بلده ۱۳۸۲، با بزرگی $M_w 7.3$ و $M_w 6.3$ (جدول ۴)، با توجه به مؤلفه‌های به دست آمده از روابط تجربی ولز و کوپر اسمیت [۱۸] و همچنین اطلاعات گرفته‌شده از مقالات زمین‌شناسی، جابجایی ناشی از این زمین‌لرزه‌ها در این نقاط با استفاده از روابط تحلیلی اکادا محاسبه‌شده و در ستون مربوطه در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۷- ایستگاه‌های شبکه ژئودزی کلاسیک



شکل ۸- بردار سرعت پیش‌بینی شده در چارچوب ITRF با استفاده از مدل



شکل ۶- مقادیر باقیمانده و بیضی خطای ۹۵٪ مشاهدات GPS در ایستگاه‌های مشاهداتی

۴-۳- مدل و کاربردهای آن

در این بخش به بررسی کاربردهای مدل ارائه‌شده می‌پردازیم که شامل پیش‌بینی سرعت و پیش‌بینی جابجایی است:

پیش‌بینی سرعت در هر موقعیت از سطح زمین در محدوده منطقه مورد نظر کاربرد مدل ارائه شده است. در این قسمت اطلاعات بین لرزه‌ای به مدل اعمال‌شده و جابجایی‌های بین لرزه‌ای متناظر با آن‌ها با قید میدان سرعت GPS شبکه استفاده‌شده در هر نقطه با روابط تحلیلی اکادا محاسبه می‌شود.

روابط ریاضی تبدیل میدان سرعت حرکت دائم و بین لرزه‌ای صفحه‌های زمین ساختی از چارچوب ITRF2000 به بردار سرعت نسبت به اوراسیا در رابطه ۱۰ آورده شده است [۱۶]:

$$\begin{aligned} V_N &= w \sin(\lambda - \lambda_{EP}) \cos \varphi_{EP} \\ V_E &= w [\cos \varphi_{EP} \sin \varphi \cos(\lambda - \lambda_{EP}) - \sin \varphi_{EP} \cos \varphi] \end{aligned} \quad (10)$$

در این رابطه V_N و V_E عبارت‌اند از مؤلفه‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی بردارهای سرعت نسبت به هم، φ و λ مختصات کروی ایستگاهی که بردار سرعت مورد نظر در آنجا مشاهده شده است، φ_{EP} و λ_{EP} مختصات کروی محل قطب اولر و w نیز نرخ را نشان می‌دهد. پیش‌بینی جابجایی در یک نقطه مابین دو مقطع زمانی T_1 و T_2 با ضرب سرعت مدل‌سازی شده برای آن نقطه در فاصله زمانی دو مقطع و سپس اضافه کردن جابجایی‌های لحظه‌ای نقطه در اثر زمین‌لرزه‌های احتمالی در بازه زمانی مورد نظر انجام می‌شود.

جدول ۴- مشخصات زمین لرزه های بزرگ تر از M_w ۵ در بازه زمانی مورد نظر

منبع	Strike (درجه)	عمق (Km)	بزرگی گشتاوری (M_w)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	تاریخ
[۱۹]	۲۹۲	۱۴	۷/۳	۳۶/۹۵	۴۹/۴۰	۱۹۹۰/۰۶/۲۰
[۲۰]	۳۱۶	۱۲	۶/۳	۳۶/۲۷	۵۱/۵۷	۲۰۰۴/۰۵/۲۸

جدول ۵- مختصات ها و بردارهای سرعت و جابجایی های هم لرزه در شبکه ژئودزی کلاسیک درجه یک در منطقه البرز در چارچوب ITRF

اسم ایستگاه	عرض جغرافیایی (N°)	طول جغرافیایی (E°)	بردار سرعت بین لرزه ای		تأثیر زمین لرزه بلده (mm)		تأثیر زمین لرزه رودبار (mm)	
			V_x (mm/yr)	V_y (mm/yr)	dx	dy	dx	dy
			ANGOL	۳۶/۵۵	۴۹/۸۵	-۲۶/۴۱	۱۶/۹۳	۰/۲
ANJIRLOO	۳۵/۴۶	۵۲/۹۵	-۲۸/۷۰	۱۷/۹۹	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۱/۱۶	-۳/۰۹
ARAD	۳۵/۴	۵۱/۳۳	-۲۷/۷۰	۱۸/۳۶	۰/۶۱	۱/۳۴	۱۴/۷۸	-۴۱/۲۷
BANK_KAR	۳۵/۶۸	۵۱/۴	۲۸/۰۷	۱۸/۷۵	۱/۳۷	۲/۹۸	۲۹/۷	-۷۹/۷۸
BASHGOL	۳۶/۱۵	۴۹/۵۵	-۲۷/۵۷	۱۸/۸۰	۰/۲۷	۰/۱۰	۲۶/۵	۹/۳۱
BIBI SHAHRBA	۳۵/۵۸	۵۱/۵	-۲۸/۳۶	۱۷/۸۴	۰/۷۲	۲/۰۲	۲۴/۳۳	-۶۷/۵۳
BOZMICHAL	۳۵/۹۳	۵۲/۶۵	-۲۸/۵۷	۱۹/۵۷	-۰/۱۳	-۰/۱۳	-۶/۲۰	-۱۰/۱۴
ESPISEH	۳۶/۸۸	۴۹/۲۳	-۲۷/۷۹	۱۵/۹۶	۰/۰۷	۰/۰۲	۳/۳۶	۶/۱۹
CHARA DAGH	۳۵/۷۵	۵۲/۲۱	-۲۷/۸۰	۱۸/۰۶	۰/۱۱	۰/۰۰	۱۶/۳۹	-۳۱/۳۹
GHRAGONI	۳۵/۶۳	۵۰/۴	-۲۷/۸۷	۱۸/۸۰	۰/۸۲	۰/۶۳	۲۹/۸۷	۹/۹۳
GHASRE FIROO	۳۵/۷	۵۱/۵۱	-۲۸/۳۸	۱۷/۱۴	۱/۰۷	۳/۰۰	۳۳/۲۳	۹۰/۲۳
GHOOSH	۳۵/۵۵	۵۲	-۲۷/۶۸	۱۷/۰۲	۰/۱۱	۰/۴۶	۲۲/۱۹	-۴۴/۷۲
GOL ZARD	۳۵/۸۱	۵۱/۹۵	-۲۶/۷۳	۱۶/۶۳	۰/۱۹	۰/۴۸	۳۴/۹۱	-۶۴/۷۷
GOLNAB	۳۵/۵۱	۵۲/۸	-۲۸/۱۹	۱۸/۱۸	۰/۰۰	-۰/۰۳	۴/۲۲	-۱۱/۴۴
GONBAD TAPPE	۳۵/۱۸	۵۰/۲۱	-۲۸/۰۳	۱۹/۸۸	۰/۴۲	۰/۴۱	۱۲/۵۱	۳/۰۷
HAJI YAGHOOB	۳۶/۹۳	۴۸/۵۳	-۲۸/۳۶	۱۸/۳۳	۰/۰۵	۰/۱۸	۲/۹۳	۳/۱۹
INGILAK	۳۶/۱	۵۰/۶۶	-۲۷/۷۱	۱۸/۴۴	۱/۶۵	۰/۷۶	۱۱۰/۸	۲۵/۰۳
KARAJ SITE	۳۵/۷۸	۵۰/۰۸	-۲۸/۰۴	۱۸/۳۱	۲/۴۳	۲/۷۶	۴۱/۰۸	-۵۱/۹۱
KORABOLAGH	۳۵/۱۵	۵۰/۸۶	-۲۷/۷۶	۱۷/۴۰	۰/۴۸	۰/۷۲	۸/۹۹	-۱۲/۶۵
KOUHE SORKH	۳۵/۲۵	۵۳/۲۵	-۲۸/۶۱	۱۵/۱۹	۰/۰۰	-۰/۰۱	۲/۴۲	-۶/۸۹
KUSHK	۳۵/۹	۵۳/۷۳	-۲۷/۵۵	۱۵/۸۲	-۰/۱۰	-۰/۰۴	-۴/۸۰	-۳/۰۷
LARAK	۳۵/۷۳	۵۳/۲	-۲۷/۹۲	۱۸/۰۹	-۰/۰۶	-۰/۰۵	-۲/۵۲	-۵/۶۴
MESHKIN TAPP	۳۵/۸۳	۵۰/۰۳	-۲۶/۴۶	۱۶/۹۱	۰/۵۶	۰/۳۱	۳۸/۰۹	۱۷/۶۳
MOHAMMAD HAN	۳۶/۴۱	۵۴/۵۸	-۲۸/۶۸	۱۴/۷۶	-۰/۱۰	-۰/۰۵	-۵/۲۳	-۱/۸۷
N.C.C	۳۵/۶۸	۵۱/۳۱	-۲۷/۹۹	۱۷/۵۰	۱/۶	۲/۹۲	۲۸/۸۵	-۷۱/۴۳
NEZVA	۳۵/۹۳	۵۳/۳۱	-۲۸/۷۲	۱۵/۲۵	-۰/۱۳	-۰/۰۷	-۶/۱۹	-۴/۴۰
OZBAK	۳۵/۵۱	۵۰/۹۱	-۲۸/۴۷	۱۸/۵۲	۱/۰۵	۱/۳۰	۱۸/۸۷	-۲۰/۲۶
PANJ KOUH	۳۵/۷۶	۵۴/۴۳	-۲۷/۵۸	۱۵/۵۳	-۰/۰۶	-۰/۰۲	-۲/۸۵	-۱/۹۴
RALENGEH	۳۶/۱۸	۵۴/۱	-۲۷/۶۳	۱۵/۶۱	-۰/۱۲	-۰/۰۵	-۵/۹۳	-۲/۳۵
SEFID KOUH	۳۵/۴۳	۵۲/۳۶	-۲۷/۷۴	۱۶/۵۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۱۲/۱۱	-۲۳/۱۴
SENDAN DAQH	۳۶/۴۱	۴۹/۱	-۲۷/۹۹	۲۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۰۴	۱۲/۴۷	۴/۶۹
SHIRAKAN	۳۶/۷۱	۴۹/۵۶	-۲۸/۴۴	۲۰/۳۹	۰/۱۱	۰/۰۴	۸/۳۴	۸/۱۵
TAL	۳۶/۲۵	۵۴/۹۶	-۲۷/۶۹	۱۵/۹۴	-۰/۰۷	-۰/۰۳	-۳/۸۱	-۱/۴۶
TOUCHAL	۳۵/۸۸	۵۱/۴۱	-۲۸/۱۳	۱۷/۰۸	۳/۵۹	۶/۷۴	۵۶/۳۹	-۱۳۳/۳
YAKH BAND	۳۶/۳۶	۵۰/۱۵	-۲۸/۳۶	۱۵/۸۳	۰/۴۳	۰/۱۴	۶۵/۵۲	۲۱/۷۰

مدلسازی و مشاهدات GPS در محدوده بیضی خطای ۹۵٪ مشاهدات GPS، می‌توانیم ادعا کنیم که مدلسازی ما به خوبی جواب داده است و همچنین نزدیک بودن مقدار عددی به دست آمده از این مدلسازی با تحقیقات انجام‌شده قبلی می‌تواند دلیلی برای صحت مدلسازی باشد.

مدل ارائه شده در این تحقیق یک مدل پویاست چون ما را قادر می‌سازد تا با استفاده از آن روی زمین پویا تعیین موقعیت وابسته به زمان انجام دهیم، با وارد کردن دیگر انواع حرکت‌های پوسته زمین از جمله فعالیت‌های آتشفشانی، نشست زمین، بارگذاری و یا کاهش بار از پوسته می‌توان مدل را کامل‌تر کرد.

با توجه به مقادیر به دست آمده با استفاده از مدلسازی در شبکه ژئودزی کلاسیک، در صورت استفاده از نقاط این شبکه، در صورت نیاز، نمی‌توان از تغییرات مختصاتی آن‌ها چشم‌پوشی کرد.

بعد از مدلسازی بردار سرعت بین لرزه‌ای، برای محاسبه جابجایی باید این بردار سرعت مدلسازی شده را در فاصله زمانی برداشت مشاهدات تا زمان حال ضرب کنیم تا جابجایی‌های ناشی از حرکات هم لرزه در این ناحیه محاسبه گردد و سپس با جمع بستن آن‌ها با جابجایی‌های هم لرزه، موقعیت نقاط شبکه را در زمان حال پیش‌بینی کرد. از آنجایی که ۲۵ سال از زمان برداشت این شبکه می‌گذرد و با توجه به اندازه این جابجایی‌ها، نمی‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد. مثلاً در برخی نقاط جابجایی‌هایی تقریباً ۸۰ سانتیمتری نیز محاسبه گردید.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ما با مدلسازی میدان جابجایی ناشی از حرکت بین لرزه‌ای گسل‌های منطقه البرز و به دست آوردن جذر خطای مربعی متوسط برابر 0.97 mm/yr و با قرار گرفتن بردار باقیمانده ناشی از تفاضل بردارهای

مراجع

- [۱] راست بود، اصغر، و ثوقی، ب.، ۱۳۹۱، مدلسازی تغییر مختصات مسطحاتی نقاط سطحی زمین در چارچوب‌های مرجع ITRF در -محدوده فلات ایران، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۶، شماره ۱، صفحه ۱۲-۳۳.
- [2] Reilinger, Robert., et al. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, vol. 111, B05411, doi: 10.1029/2005JB004051.
- [3] Vernant, P. and Chéry, J. (2006a). Low Fault Friction in Iran Implies Localized Deformation for the Arabia-Eurasia Collision Zone. Earth and Planetary Science Letters, vol. 246, pp 197-206.
- [4] 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, vol. 224, pp. 347-362.
- [5] Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 75, No. 4, pp.1135-1154.
- [6] Haupt, R. L., H.S.E. (2004). Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- [۷] خرمی، ف.، ۱۳۸۹، استفاده از اندازه‌گیری‌های دائمی GPS در تعیین میزان و نحوه تغییر شکل کنونی پوسته زمین در کوه‌های البرز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- [8] Savage, J.C. and Burford, R.O. (1970). Accumulation of Tectonic Strain in California. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 60, No. 6, pp. 1877-1896.
- [۹] نوری، س.، و ثوقی، ب.، ابوالقاسم، ا.، ۱۳۸۸، مدلسازی میدان جابه‌جایی هم لرزه یک گسل و تعیین حساسیت پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل به میدان جابه‌جایی آن، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۵، شماره ۱، صفحه ۵۹-۷۳.

- [10] Djamour, Y et al. (2010). GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz Mountain range, Iran, *Geophys. J. Int.*, 183, 1287–1301.
- [11] Bachmanov, D.M., Trifonov, V.G., Hessami, Kh.T., Kozhurin, A.I., Ivanova, T.P., Rogozhi, E.A., Hademi, M.C., Jamali, F.H. (2004). Active faults in the Zagros and central Iran. *Tectonophysics*, 380, 221–241.
- [12] Nazari, H., Ritz, J.F., Salamati, R., Shafei, A., Ghassemi, A., Michelot, J.L., Massault, M., Ghorashi, M., (2009). Morphological and Paleoseismological analysis along the Taleghan fault (Central Alborz, Iran). *Geophysical Journal International*. 178, 1028–1041.
- [13] Nazari, H., Ritz, J.F., Salamati, R., Solaymani, S., Balescu, S., Michelot, J.L., Ghassemi, A., Talebian, M., Lamothe, M., Massault, M. (2007). Paleoseismological analysis in Central Alborz, Iran. 50th Anniversary earthquake conference commemorating the 1957 Gobi-Altay earthquake, July - August 2007- Ulaanbaatar-Mongolia.
- [14] Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., and Nazari, H. (2008). Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma. *Geology*. v. 36, pp. 763–766, doi: 10.1130/G25008A.1.
- [15] 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.
- [16] Cox, A.V and Hart, R B. (1988). *Plate Tectonics: How it works*, Blackwell Scientific Publications. Palo Alto Calif. 392 pp.
- [۱۷] صدیقی، م.، ۱۳۷۵، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، سرشکنی مجدد شبکه ژئودزی کلاسیک درجه یک ایران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک.
- [18] 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*, vol. 84, No. 4, 974-1002, A1001-A1004, B1001-B1011, C1001-C10.
- [19] Berberian, M and Walker, B. (2010). The Rudbar $M_w = 7.3$ earthquake of 1990 June 20; seismotectonics, coseismic and geomorphic displacements, and historic earthquakes of the western 'High-Alborz', Iran. *Geophys. J. Int.* 10.1111/j.1365-246X.2010.04705.x,
- [20] Aghamohammadi, A., Nankali, H.R., Djamour, Y. (2007). Transformation from ITRF2000 to WGS84 (case study: Iranian Permanent GPS Network, IPGN). 14th National Geomatic Conference, Tehran, Iran.