

بررسی اثر فاصله ایستگاه‌های GPS از خط گسل در دقت برآورد پارامترهای مکانیکی یک گسل

نوشته: لایلا کریمی دهکردی*، بهزاد وثوقی* و یحیی جمور**

* دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

** سازمان نقشه برداری کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۲/۱۵

چکیده

در این مقاله، یک شبکه GPS برای مطالعه پارامترهای مکانیکی گسل طراحی می‌شود. الگوی کشسان مورد استفاده، تابعی از پارامترهای مکانیکی گسل واقع در یک محیط کشسان و همگن است. پارامترهای مورد نظر عمق قفل شدگی و سرعت لغزش گسل است. با ذکر چند نمونه عددی، اثر فاصله ایستگاه‌های شبکه از خط گسل بر دقت برآورد پارامترهای فوق بررسی شده است. نتایج نمونه عددی نشان می‌دهد که فقط با تغییر محل ایستگاه‌ها در یک شبکه فرضی، دقت تعیین عمق قفل شدگی و سرعت لغزش گسل به ترتیب از $\sigma_v = \pm 16.1 \text{mm/yr}$ ، $\sigma_H = \pm 8.1 \text{km}$ به $\sigma_v = \pm 1.2 \text{mm/yr}$ ، $\sigma_H = \pm 1.3 \text{km}$ مقدار بهبود می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: فاصله از خط گسل، مدول گسل، شبکه آشکارسازی GPS، بهینه سازی، دقت پارامترهای مدل گسل.

مقدمه

به کارگیری فناوری ماهواره‌ای و استفاده از سامانه موقعیت‌یابی جهانی در سال‌های اخیر بر وسعت تحقیقات در زمینه زلزله افزوده و با در اختیار گذاشتن اطلاعات دقیق از دگرشکلی پوسته، سرعت و دقت بالا، حجم زیاد اطلاعات و مشاهده پیوسته از ویژگی‌های سامانه موقعیت‌یابی GPS است که می‌تواند مشکل نبود داده‌های دگرشکلی پوسته برای مطالعه ساز و کار زمین‌لرزه‌ها را تا حد زیادی برطرف کند. اولین گام برای ایجاد یک شبکه ژئودزی طراحی آن است. مسئله طراحی شامل تصمیم‌گیری در مورد تعداد و موقعیت نقاط شبکه و همچنین تعداد، نوع و دقت مشاهدات است. در یک طرح بهینه، موارد فوق به صورت مناسب و بهینه انتخاب می‌شوند. در سال‌های گذشته تحقیقات بسیاری راجع به طراحی بهینه شبکه‌های ژئودزی زمینی ارائه شده است.

Chen (1983) نمونه‌ای از بهینه‌سازی توزیع وزن مشاهدات را بر پایه دقت پارامترهای کرنش بیان نمود. Kuang (1991) برای طراحی شبکه‌های آشکارسازی یک روش تحلیلی را توسعه داد که به کمک آن می‌توان مسائل طراحی مرتبه اول، دوم و سوم را حل کرد. اساس کار او به این صورت است که ابتدا توابع غیرخطی بیان‌کننده کیفیت شبکه، به کمک بسط تیلور حول یک مقدار اولیه خطی می‌شوند سپس با استفاده از فنون بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی خطی (linear programming) و برنامه‌ریزی کوادراتیک (quadratic programming) تصحیحات برای مقادیر اولیه محاسبه می‌شود.

Grasimenko (2000) تحقیقات ارزشمندی درباره بهینه‌سازی شبکه‌های آشکارسازی دگرشکلی انجام داده است. وی در مقاله خود به بررسی نحوه بهینه‌سازی شبکه برای مطالعات سازوکارهای گسل پرداخته و برای بهینه‌سازی از روش گراداینت با توابع جریمه استفاده کرده است. Jicang (2004) روشی برای طراحی مرتبه اول بهینه یک شبکه GPS بر پایه تحلیل خطای پارامترهای استرین ارائه داد.

در این مقاله، یک شبکه GPS برای مطالعه پارامترهای مکانیکی گسل طراحی می‌شود. با استفاده از مدل‌های کشسان و گرانیو-کشسان (Visco-elastic) می‌توان رابطه‌ای بین پارامترهای مکانیکی و زمین‌شناسی گسل مانند سرعت لغزش، ژرفای قفل شدگی و دوره بازگشت زمین‌لرزه با مشاهدات سطحی GPS یافت. یکی از ساده‌ترین این مدل‌ها، مدل نیم فضای امتدادلغز (Strike-slip) در پوسته کشسان است

باتوجه به قابلیت‌های بالای الگوریتم ژنتیک (Genetic algorithms)، از این روش برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

۲- طراحی شبکه GPS

طراحی یک شبکه ژئودزی را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود نمود (Grafarend, 1974):

- طراحی مرتبه صفر (zero order design): طراحی چارچوب مرجع مختصات
- طراحی مرتبه یک (first order design): طراحی شکل شبکه و تعداد و موقعیت ایستگاه‌ها

- طراحی مرتبه دو (second order design): طراحی وزن مشاهدات
- طراحی مرتبه سه (third order design): اضافه کردن مشاهدات به منظور گسترش شبکه باتوجه به این که در شبکه‌های GPS برخلاف شبکه‌های ژئودزی کلاسیک نیازی به دید مستقیم بین ایستگاه‌ها وجود ندارد، طراحی آنها تا حدودی آسان‌تر است و از آنجا که هدف اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها است طراحی مرتبه صفر در نوبت اول مشاهدات، اهمیت ندارد (Kuang, 1991).

در طراحی شبکه‌های آشکارسازی توابع هدفی باید تعیین شوند تا از کمینه‌سازی آنها، شبکه بهینه حاصل شود. این توابع هدف به شکل‌های مختلف با توجه به کاربرد شبکه و نوع پارامترهایی که از آنها استخراج می‌گردند، تعیین می‌شوند. چنانچه از مشاهدات GPS برای تعیین پارامترهای مکانیکی گسل استفاده شود، می‌توان دقت نهایی این پارامترها را به عنوان معیاری برای بهینگی شبکه در نظر گرفت. هدف ما طراحی مرتبه اول شبکه به گونه‌ای است که پارامترهای دگرشکلی گسل با دقت بهینه تعیین شوند. در مشاهده حرکات پوسته با استفاده از GPS در ابتدا بردار جابه‌جایی و ماتریس واریانس-کوواریانس آن با استفاده از دو نوبت مشاهده نسبت به یک سیستم مختصات مانند ITRF 2000 تعیین می‌شود. سپس پارامترهای تغییر شکل پوسته مانند استرین، برش، اتساع و محاسبه می‌شوند.

۳- تعیین تابع هدف مبتنی بر دقت پارامترهای مکانیکی گسل

با استفاده از مدل‌های کشسان و گرانیو-کشسان می‌توان رابطه‌ای بین پارامترهای

۵- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از شاخه‌های اصلی محاسبات تکاملی و حوزه‌ای از هوش مصنوعی است که به سرعت در حال رشد است. طرح یک الگوریتم بهینه‌سازی مؤثر برای مسئله خاص، به میزان اطلاعات ما در مورد آن مسئله بستگی دارد (Haupt & Haupt, 2004; Jin & Wang, 2001; Zhan et al., 2003)

ژنتیک را می‌توان به صورت زیر نمایش داد (Haupt & Haupt, 2004):

- ایجاد جامعه اولیه
- محاسبه و انتساب میزان شایستگی به هر عضو
- انتخاب اعضای شایسته برای تکثیر
- ایجاد نمونه جدید با ترکیب و جهش
- محاسبه شایستگی نمونه‌ها
- جایگزینی نمونه‌های کم سازگار در نسل جدید با اعضای سازگارتر
- با بررسی همگرایی جامعه به جواب‌های مورد انتظار، شرط توقف الگوریتم بررسی شود.

در این پژوهش از روش الگوریتم ژنتیک با پارامترهای پیوسته (واقعی) استفاده شده است (Haupt & Haupt, 2004).

اعضای جامعه اولیه هر کدام معرف یک شبکه هستند، ژن‌های هر کروموزوم شامل موقعیت و تعداد ایستگاه‌ها و وزن مشاهدات در هر ایستگاه (باتوجه به نوع مسئله) است. جامعه اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. تابع هدف باتوجه به مسئله تعیین می‌شود و به هر کروموزوم یک مقدار شایستگی نسبت می‌دهد. انتخاب به روش رقابتی و تلفیق به روش میانی صورت می‌گیرد. تعداد تکرار به عنوان شرط پایان برنامه استفاده شده است و نمودارهایی که روند تغییر کمترین مقدار تابع هدف و مقدار متوسط آن را در نسل‌های متوالی نشان می‌دهند بیانگر همگرایی الگوریتم هستند. پارامترهای الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است.

۶- نمونه شبیه‌سازی

در این مثال یک شبکه منظم با ۸ ایستگاه که در فاصله‌های ۴ کیلومتری از هم و در فواصل $\pm 2, \pm 10$ کیلومتری از یک گسل فرضی - پارامترهای گسل $v=30 \text{ mm/yr}$; $H=10 \text{ km}$ قرار دارند در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳).

فرض می‌شود فن اندازه‌گیری GPS قادر به تعیین جابه‌جایی به موازات گسل با دقت $\sigma_{dx} = \pm 1 \text{ mm/yr}$ است (Wyatt, 1989).

مختصات اولیه ایستگاه‌های GPS در این شبکه فرضی در جدول ۲ آمده است (سیستم مختصات محلی است). با استفاده از فرمول‌های ۲ تا ۵ دقت پارامترهای گسل در این شبکه محاسبه می‌شود. دیده می‌شود که این شبکه قادر به تعیین پارامترهای گسل با دقت $\sigma_v = \pm 16.1 \text{ mm/yr}$; $\sigma_H = \pm 8.1 \text{ km}$ است.

حالت اول: در این حالت بهینه‌سازی را با هدف تغییر موقعیت نقاط جهت دستیابی به دقت بهتر برای برآورد عمق گسل انجام می‌دهیم. تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_H \rightarrow \min \quad \text{cost} = \sigma_H \quad (7)$$

روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل شبکه به صورت شکل ۵ اصلاح می‌شود، همان‌طور که دیده می‌شود، بیشتر نقاط در فاصله نزدیکی به گسل قرار دارند، ۶ ایستگاه در فاصله کمتر از ۱۰ و ۲ ایستگاه در فاصله ۹۵-۱۰۰ km از گسل قرار گرفته‌اند. مختصات جدید نقاط شبکه و فاصله عمودی نقاط تا مرز گسل در جدول ۳ نشان داده شده است

مکانیکی و زمین‌شناسی گسل مانند سرعت لغزش، ژرفای قفل‌شدگی و دوره بازگشت زمین‌لرزه با مشاهدات سطحی GPS یافت (Savag & Prescott, 1978). یکی از ساده‌ترین این مدل‌ها، مدل امتدادلغز در پوسته کشسان است، که در این مقاله از آن به صورت زیر استفاده شده است (Grasimenco et al., 2000; Johnson & Wyatt, 1994):

$$dx = -\frac{v}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{H}\right) \quad (1)$$

که در آن: x فاصله قائم تا خط گسل برحسب کیلومتر، H عمق قفل‌شدگی برحسب کیلومتر، v سرعت لغزش گسل در اعماق برحسب m/yr و dx نرخ لغزش در ایستگاه‌های GPS برحسب m/yr است.

نمودار جابه‌جایی برحسب فاصله از خط گسل برای یک گسل فرضی امتدادلغز راستگرد با سرعت لغزش 10 mm/yr و عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ کیلومتر در شکل ۲ نشان داده شده است.

در صورت وجود n ایستگاه مشاهداتی، رابطه ۱ به شکل ماتریسی زیر قابل نمایش است:

$$l = A \delta X, \quad l = \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ \vdots \\ dx_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \frac{\partial dx_1}{\partial v} & \frac{\partial dx_1}{\partial H} \\ \frac{\partial dx_2}{\partial v} & \frac{\partial dx_2}{\partial H} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial dx_n}{\partial v} & \frac{\partial dx_n}{\partial H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{x_1}{H}\right) & \frac{v}{\pi} \frac{x_1}{H^2 + x_1^2} \\ -\frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{x_2}{H}\right) & \frac{v}{\pi} \frac{x_2}{H^2 + x_2^2} \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{x_n}{H}\right) & \frac{v}{\pi} \frac{x_n}{H^2 + x_n^2} \end{bmatrix} \delta X = \begin{bmatrix} \delta v \\ \delta H \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن پارامترهای $\delta v, \delta H$ مجهول مسئله هستند. جواب حل کمترین مربعات ۲ به صورت زیر است:

$$\delta X = (A^T \Sigma_{dx}^{-1} A)^{-1} A^T l, \quad X = X_0 + \delta X \quad (3)$$

در صورتی که از وابستگی بین مشاهدات GPS صرف‌نظر کنیم، ماتریس واریانس-کواریانس مشاهدات، یک ماتریس قطری خواهد بود:

$$\Sigma_{dx} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{dx1}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{dx2}^2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{1}{\sigma_{dxn}^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن σ_{dx1}^2 واریانس آهنگ لغزش در ایستگاه ۱ ام است.

با توجه به رابطه ۳، ماتریس واریانس-کواریانس پارامترهای مجهول بدین صورت به دست می‌آید:

$$\Sigma_{XX} = (A^T \Sigma_{dx}^{-1} A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & \sigma_{Hv} \\ \sigma_{Hv} & \sigma_H^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

معادله ۵ بیانگر ارتباط شکل شبکه (ماتریس A) با دقت پارامترهای گسل (Σ_{XX}) است. در این تحقیق از این رابطه برای طراحی مرتبه اول شبکه برای گسل امتدادلغز استفاده شده است.

۴- تابع هدف

پس از بررسی شرایط مختلف در طراحی نوبت به ارائه تابع هدف ترکیبی می‌رسد. باتوجه به حداکثر دقت ممکن در طراحی رابطه، تابع هدف به صورت زیر است:

$$\lambda_1 \sigma_v^2 + \lambda_2 \sigma_H^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

در رابطه فوق σ_v^2, σ_H^2 واریانس پارامترهای گسل، λ_1, λ_2 مقادیر ثابت و مثبتی که عمل وزن دهی به هر یک از جملات را در تابع هدف ترکیبی به هستند.

از آقای مهندس منوچهر شیرزایی کارشناس ارشد ژئودزی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی مهندسی زلزله و آقای دکتر محمدعلی شریفی عضو هیئت علمی گروه مهندسی نقشه برداری و ژئوماتیک دانشگاه تهران، به‌خاطر در اختیار گذاشتن تجربیات ارزشمند و رهنمودهای راهگشایشان تشکر نمایم.

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم ژنتیک مورد استفاده

Pop size	40
Generation	1000
Mutation	0.01
Selection	0.50

جدول ۲- مختصات نقاط شبکه اولیه قبل از بهینه‌سازی

شماره ایستگاه	X(m)	Y(m)	فاصله از خط گسل (m)
۱	۰	۵۲۰۰۰	۲۰۰۰
۲	۴۰۰۰	۶۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
۳	۸۰۰۰	۶۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
۴	۱۲۰۰۰	۵۲۰۰۰	۲۰۰۰
۵	۰	۴۸۰۰۰	۲۰۰۰
۶	۴۰۰۰	۴۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
۷	۸۰۰۰	۴۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
۸	۱۲۰۰۰	۴۸۰۰۰	۲۰۰۰

جدول ۳- مختصات نقاط شبکه بعد از بهینه‌سازی

شماره ایستگاه	X(m)	Y(m)	فاصله از خط گسل (m)
۱	۰	۱۴۹۵۳۸	۹۹۵۳۸
۲	۴۰۰۰	۵۷۲۲۹	۷۲۲۹
۳	۸۰۰۰	۵۷۱۳۱/۱	۷۱۳۱/۱
۴	۱۲۰۰۰	۱۴۹۶۸۷	۹۹۶۸۷
۵	۰	۴۲۹۴۷/۷	۷۰۵۲/۳
۶	۴۰۰۰	۴۲۸۴۵/۶	۷۱۵۴/۴
۷	۸۰۰۰	۴۲۸۵۴/۴	۷۱۴۵/۶
۸	۱۲۰۰۰	۵۶۹۲۴	۶۹۲۴

دقت حاصل از این شبکه برای عمق گسل برابر $\sigma_H = \pm 1.22 km$ خواهد بود (مقدار اولیه $\sigma_H = \pm 8.1 km$)

حالت دوم: در این حالت بهینه‌سازی به منظور تغییر موقعیت نقاط جهت دستیابی به دقت بهتر برای برآورد سرعت لغزش گسل انجام می‌شود. تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_v \rightarrow \min$$

$$\text{cost} = \sigma_v \quad (8)$$

روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل ۶ نشان داده شده است. جدول ۴ حاوی اطلاعات مختصات نقاط و فاصله آنها از مرز گسل است. شکل شبکه به صورت شکل ۷ اصلاح می‌شود، همان‌گونه که در شکل هم دیده می‌شود، نقاط در فاصله دورتری از مرز گسل قرار گرفته‌اند. از ۸ ایستگاه، ۷ ایستگاه در فاصله ۹۵-۱۰۰ km و ۱ ایستگاه در فاصله کمتر از ۱۰ km از گسل قرار دارد.

دقت حاصل از این شبکه برای سرعت گسل برابر $\sigma_v = \pm 1.0^{mm}/yr$ محاسبه می‌شود. در صورتی که هدف افزایش توام دقت برآورد پارامترهای V,H باشد، تابع هدف بدین صورت تعریف می‌شود:

$$\sigma_H \rightarrow \min, \sigma_v \rightarrow \min$$

$$\text{cost} = \sigma_v + \sigma_H \quad (9)$$

شکل ۸ نشان‌دهنده روند همگرایی الگوریتم ژنتیک است. شکل ۹ شبکه اصلاح شده و جدول ۵ مختصات ایستگاه‌ها و فواصل آنها تا خط گسل را نشان می‌دهد. دقت حاصل از این شبکه برای پارامترهای گسل برابر $\sigma_H = \pm 1.3 km$ ، $\sigma_v = \pm 1.2 mm/yr$ خواهد بود.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از ابزار بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، روشی برای طراحی شبکه ارائه شده است که در آن، شبکه‌ای برای رسیدن به دقت مطلوب برآورد پارامترهای گسل طراحی می‌شود. نتایج نمونه‌های عددی، آشکارا حاکی از لزوم در نظر داشتن مدل حرکت گسل در طراحی شبکه هستند. در مورد یک شبکه منظم با ۸ ایستگاه که در فاصله‌های ۴ کیلومتری از هم و در فواصل $\pm 10, \pm 2$ کیلومتری گسل قرار دارند، با فرض مقادیر $v = 30 mm/yr$ ، $H = 10 km$ برای پارامترهای گسل و همچنین با فرض این که فن اندازه‌گیری GPS قادر به تعیین جابه‌جایی به موازات گسل با دقت $\sigma_{\Delta} = \pm 1 mm/yr$ است، فقط با تغییر محل ایستگاه‌های شبکه، دقت پارامتر از $\sigma_v = \pm 16.1 mm/yr$ ، $\sigma_H = \pm 8.1 km$ به مقدار $\sigma_v = \pm 1.2 mm/yr$ ، $\sigma_H = \pm 1.3 km$ بهبود می‌یابد.

مقایسه نتایج نمونه‌های عددی، اثر فاصله عمودی ایستگاه‌ها بر دقت برآورد پارامترهای گسل را نشان می‌دهد. در شبکه طراحی شده با هدف افزایش دقت برآورد سرعت لغزش گسل از ۸ ایستگاه، ۷ ایستگاه در فاصله ۹۵-۱۰۰ km و ۱ ایستگاه در فاصله کمتر از ۱۰ km از گسل قرار دارد و در حالتی که در شبکه‌ای که با هدف دستیابی به دقت بهتری برای برآورد عمق قفل شدگی طراحی شده است، ۶ ایستگاه در فاصله کمتر از ۱۰ km و ۲ ایستگاه در فاصله ۹۵-۱۰۰ km از گسل قرار گرفته‌اند که می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای برآورد دقیق سرعت لغزش گسل، لازم است ایستگاه‌ها در فاصله دورتری از خط گسل قرار داشته باشند. این امر در مورد ژرفای گسل برعکس است و نقاط نزدیک‌تر، به خط گسل، منجر به تعیین ژرفای گسل با دقت بهتری می‌شوند.

۸- سپاسگزاری

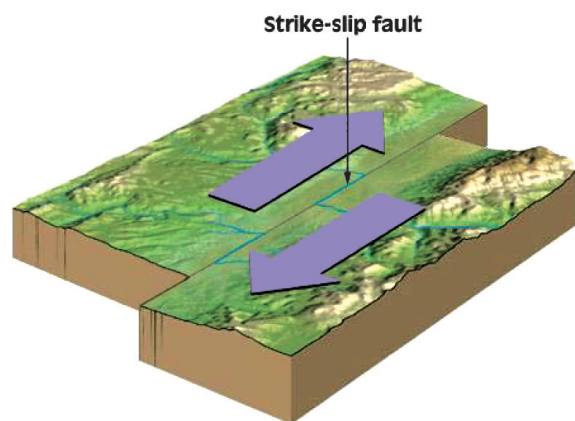
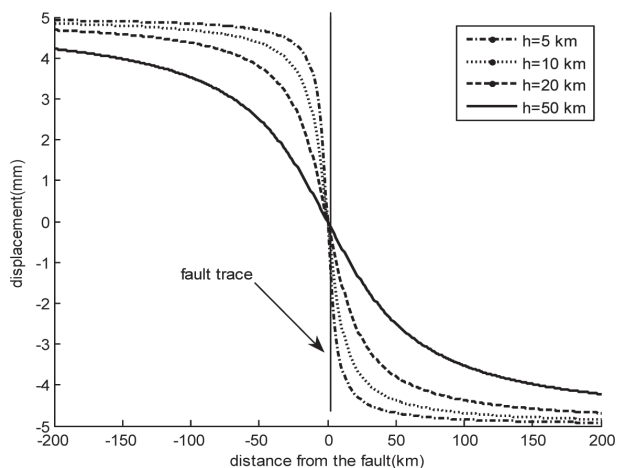
در اینجا لازم است از همه کسانی که ما در انجام این پژوهش یاری نمودند، بخصوص

جدول ۴- مختصات نقاط شبکه بعد از بهینه‌سازی

شماره ایستگاه	X(m)	Y(m)	فاصله از خط گسل (m)
۱	۰	-۴۸۶۳۹	۹۸۶۳۹
۲	۴۰۰۰	۱۴۸۸۷۰	۹۸۸۷۰
۳	۸۰۰۰	۱۴۹۲۹۶	۹۹۲۹۶
۴	۱۲۰۰۰	-۴۹۸۷۲	۹۹۸۷۲
۵	۰	۱۴۸۳۱۴	۹۸۳۱۴
۶	۴۰۰۰	-۴۹۵۳۳	۹۹۵۳۳
۷	۸۰۰۰	۵۸۹۲۱/۲	۸۹۲۱/۲
۸	۱۲۰۰۰	۱۴۸۵۴۳	۹۸۵۴۳

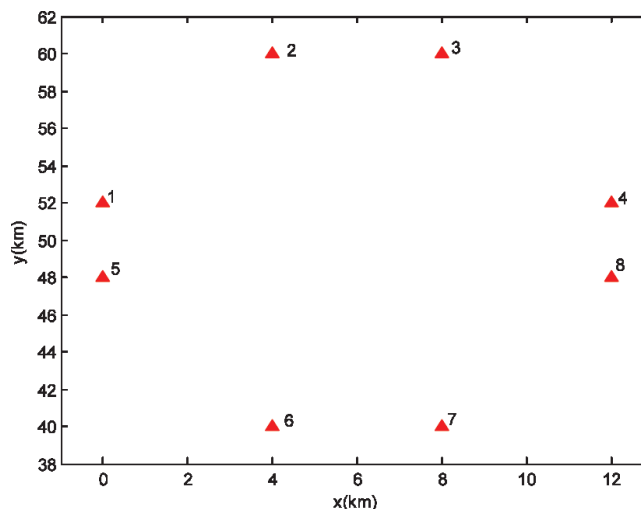
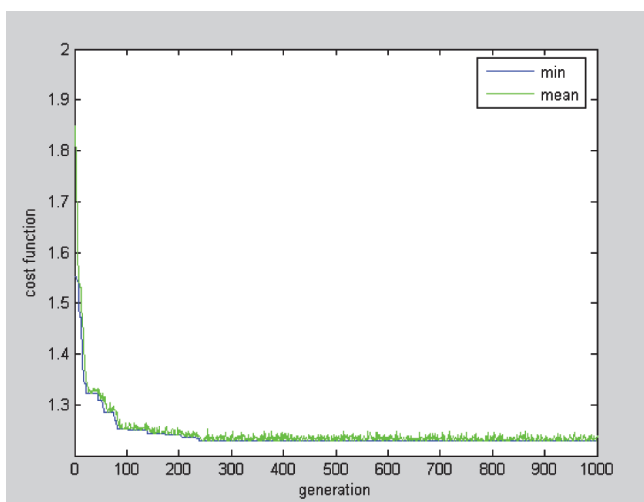
جدول ۵- مختصات نقاط شبکه بعد از بهینه‌سازی

شماره ایستگاه	X(m)	Y(m)	فاصله از خط گسل (m)
۱	۰	۴۱۸۵۹/۶	۸۱۴۰/۴
۲	۴۰۰۰	۱۴۷۴۵۳	۹۷۴۵۳
۳	۸۰۰۰	-۴۹۲۵۴	۹۹۲۵۴
۴	۱۲۰۰۰	۴۱۸۵۹/۸	۷۹۸۷/۲
۵	۰	۵۸۰۴۴/۱	۸۰۴۴/۱
۶	۴۰۰۰	-۴۹۸۶۷	۹۹۸۶۷
۷	۸۰۰۰	۱۴۹۷۸۴	۹۹۷۸۴
۸	۱۲۰۰۰	۵۷۹۷۹/۹	۷۹۷۹/۹



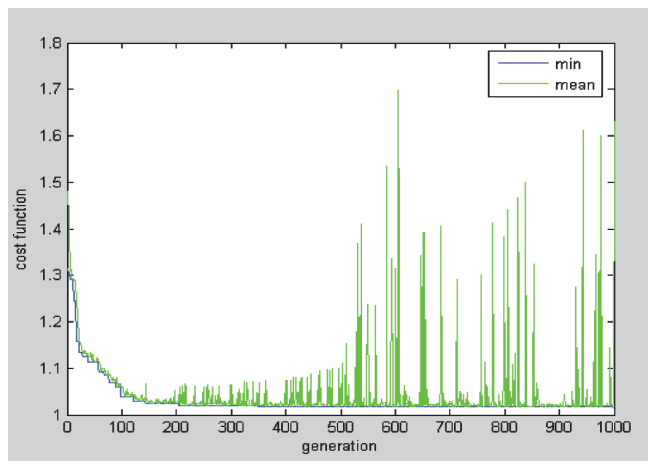
شکل ۲- نمودار جابه‌جایی برحسب فاصله از گسل برای گسل فرضی امتدادلغز راست‌گرد با عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ کیلومتر.

شکل ۱- گسل امتدادلغز راست‌گرد (وجودی)

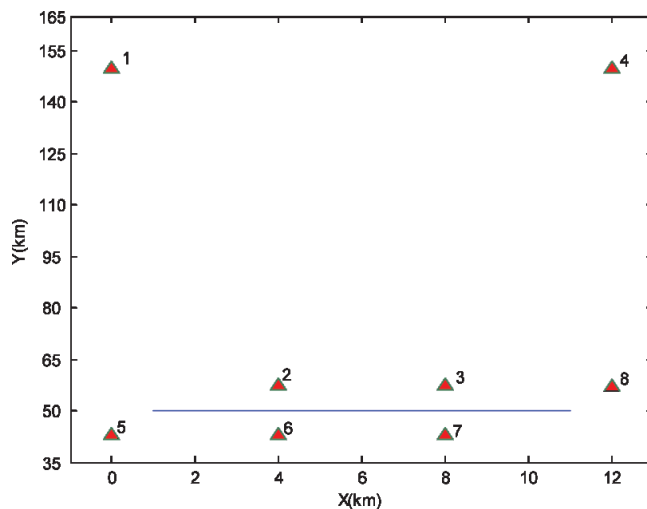


شکل ۴- روند همگرایی الگوریتم ژنتیک با هدف افزایش دقت برآورد ژرفای گسل (حالت اول)

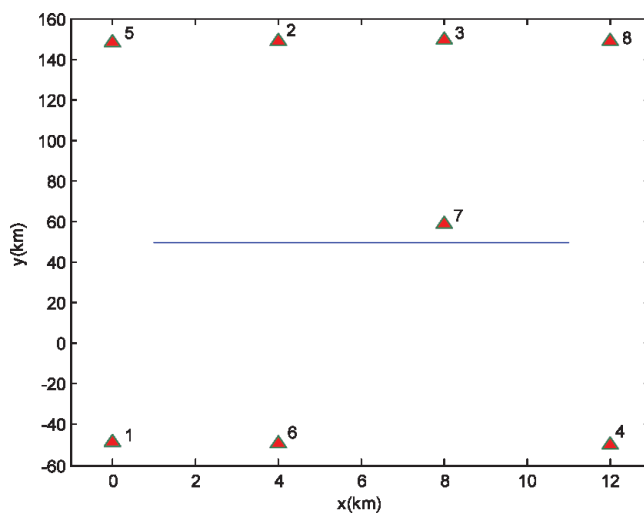
شکل ۳- شبکه اولیه با ۸ ایستگاه که در دو طرف گسل، در فاصله‌های ± 10 و ± 20 کیلومتری قرار دارند



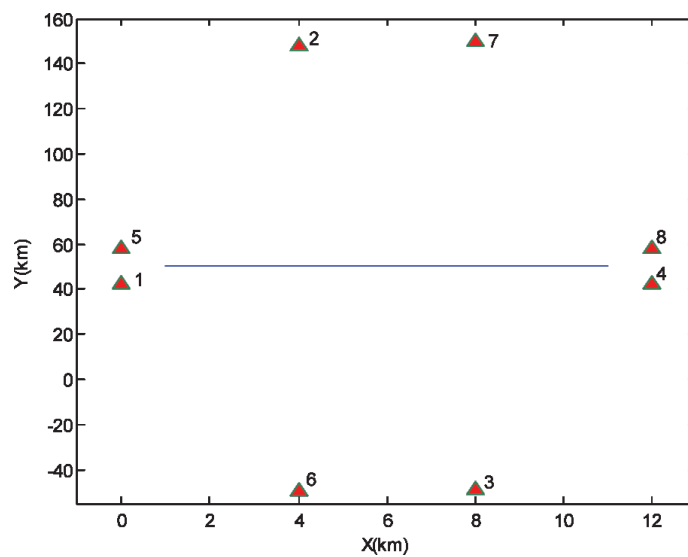
شکل ۶- روند همگرایی الگوریتم ژنتیک با هدف افزایش دقت برآورد سرعت لغزش گسل (نمونه ۲ حالت دوم)



شکل ۵- موقعیت نقاط بعد از بهینه سازی



شکل ۷- موقعیت نقاط بعد از بهینه سازی



شکل ۸- روند همگرایی الگوریتم

References

- Chen et al., 1983 - Design considerations in deformation monitoring. FIG XVII International congress, Sofia, Bulgaria, paper No. 608.2
- Grafarend, E., 1974 - Optimization of geodetic networks. Bolletino di geodesia e scienze affini, V.33, N.4, PP.351-406
- Grasimenco M. D. et al., 2000- "on optimal geodetic network design for fault-mechanics studies", Earth Planets Space, 52, PP.985-987
- Haupt, L. R. & Haupt, S. E., 2004 - Practical genetic algorithm. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- Jicang, W. U., 2004 - First-order optimization for GPS crustal deformation monitoring. The Hong Kong Polytechnic University
- Jin, Y. Q. & Wang, Y., 2001- A genetic algorithm to simultaneously retrieve land surface roughness and soil wetness. International Journal of remote sensing, 22(16), PP. 3093-3099.
- Johnson, H. O., Wyatt, F. K., 1994 - Geodetic network design for fault-mechanics studies. Manuscripta Geodaetica, 19, PP. 309-323
- Kuang, S-I, 1991- Optimization and design of deformation monitoring schemes. Department of Surveying Engineering University of New Brunswick.
- Savag, J. C. & Prescott, W.H., 1978 - Asthenospheric readjustment and the earthquake cycle. journal of Geophysical Research Letters., 83. [http:// www.vojoudi.com/earthquake/education](http://www.vojoudi.com/earthquake/education)
- Wyatt, F., 1989 - Displacement of surface monuments: vertical motion, 94, P.1655-1664
- Zhan, H.G., Lee, Z.P., Shi, P., Chen, C.Q. & Carder, K.L., 2003- Retrieval of water optical properties for optically deep waters using genetic algorithms. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 41(5), pp.1123-1