

طراحی بهینه شبکه GPS برای مطالعه حرکات گسل مطالعه موردی: گسل بم

لیلا کریمی دهکردی^۱، بهزاد وثوقی^{۲*} و یحیی جمور^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۳ استادیار آموزشکده نقشه برداری - سازمان نقشه برداری کشور

(تاریخ دریافت ۸۶/۹/۲۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱۱/۲۷، تاریخ تصویب ۸۹/۲/۱۱)

چکیده

در این مقاله برای طراحی شبکه مانیتورینگ GPS برای گسل بم روشی بر مبنای بهینگی دقت برآورد پارامترهای مکانیکی و زمین‌شناسی گسل و هزینه ارائه شده است. الگوی الاستیک مورد استفاده تابعی از پارامترهای مکانیکی گسل واقع در یک محیط الاستیک و همگن است. این پارامترها عبارتند از عمق قفل شدگی و سرعت لغزش. تابع هدف برای بهینه سازی ترکیبی از دقت نهایی پارامترهای فوق و هزینه، باتوجه به قیود زمین شناسی است. باتوجه به اهمیت محل استقرار ایستگاه و پایداری نسبی محل نصب آنتن گیرنده GPS، با استفاده از نقشه‌های رقومی زمین‌شناسی قیود زمین‌شناسی در طراحی لحاظ شده و مکان‌های با استحکام بالا جهت نصب ایستگاه تعیین شده است. الگوریتم ژنتیک با پارامترهای پیوسته و مقید برای حل مساله بهینه سازی استفاده شده است و به کمک این ابزار که یک روش هوشمند جستجوی تصادفی است و از ساز و کار ژن‌ها و کروموزوم‌ها در موجودات زنده و نحوه تولید مثل آنها الهام گرفته است تابع هدف کمینه و پارامترهای مختلف از جمله موقعیت ایستگاه‌ها تعیین شده‌اند.

واژه های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی، شبکه آشکارسازی GPS، مدل الاستیک گسل، طراحی شبکه

مقدمه

روستاها و شهرهای کوچک از گل و مصالح ساختمانی با مقاومت کم ساخته شده‌اند که در برابر زلزله‌های بسیار ضعیف نیز احتمال فروریختن بالایی دارند که این امر نیز اهمیت پیش‌بینی زلزله‌ها را برای کشورمان دو چندان می‌کند. بکارگیری تکنولوژی ماهواره‌ای و استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی در سال‌های اخیر بر وسعت تحقیقات در زمینه زلزله افزوده و با در اختیار گذاشتن اطلاعات دقیق از دگرشکلی پوسته امکان بررسی نظریه‌های مختلف در این زمینه را فراهم ساخته‌است. سرعت و دقت بالا، حجم زیاد اطلاعات و مشاهده پیوسته از خصوصیات سیستم تعیین موقعیت GPS است که می‌تواند مشکل فقدان داده‌های دگرشکلی پوسته را جهت مطالعه سازوکار زلزله تا حد زیادی برطرف نماید.

باتوجه به اینکه در شبکه‌های مانیتورینگ موقعیت ایستگاه‌ها که در مرحله طراحی مشخص می‌گردد، از اهمیت زیادی برخوردار و به طور مستقیم بر نتایج اثرگذار است. در این تحقیق با در نظر گرفتن قیود زمین شناسی و همچنین هزینه، شبکه ای جهت مطالعه حرکات گسل بم

در میان بلایای طبیعی برای کشور ایران که با قرار گرفتن در کمربند زلزله آلپ-همیالیا یکی از پرخطرترین مناطق لرزه‌ای جهان به شمار می‌رود، زلزله از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین ترتیب بررسی و آنالیز این پدیده از هر لحاظ ضروری و با اهمیت شمرده می‌شود. زلزله‌ها از جمله پدیده‌های طبیعی هستند که هنوز تحت کنترل بشر در نیامده‌اند و هیچ کس تاکنون روشی قابل اعتماد جهت پیش بینی زمان، مکان و بزرگی آن ارائه نداده‌است. در اکثر کشورهای لرزه‌خیز چون ایالات متحده آمریکا مبنای کار در مورد زلزله‌ها بر کاهش خسارات ناشی از آن با مقاوم سازی سازه‌ها، جلوگیری از ساخت و سازه‌های غیراستاندارد در محدوده گسل‌ها و دیگر روش‌ها گذارده شده‌است. زمینه دیگر تحقیقات در امر زلزله مربوط به مطالعات امکان‌سنجی پیش بینی زلزله می باشد. تحقیقات با وسعت بسیار زیادی در زمینه پیش‌بینی زلزله ادامه دارد و تحقق این امر در کاهش خسارات جانی و مالی نقش بسزایی را ایفا خواهد کرد. از طرف دیگر کشور ایران، کشوری است که هنوز بسیاری از ساختمان‌ها در

طراحی خواهد شد.

نهایی این پارامترها را به عنوان معیاری جهت بهینگی شبکه در نظر گرفت. هدف ما در مورد گسل بم طراحی مرتبه اول شبکه به گونه‌ای است که پارامترهای تغییر شکل با دقت بهینه تعیین شوند.

طراحی شبکه GPS

اولین گام برای ایجاد یک شبکه مانیتورینگ طراحی آن می باشد. در طراحی با توجه به اینکه پارامترهای مجهول کدام هستند، دقت قابل قبول برای این پارامترها چقدر است و همچنین میزان بودجه قابل صرف، طرح نهایی پروژه که شامل تعداد ایستگاه‌ها، موقعیت آنها و طرح نهایی مشاهدات می باشد ارائه می گردد.

طراحی یک شبکه ژئودزی را می توان به صورت زیر طبقه بندی نمود [۱]:

طراحی مرتبه صفر: طراحی چارچوب مرجع مختصات طراحی مرتبه یک: طراحی شکل شبکه و تعداد و موقعیت ایستگاه‌ها

طراحی مرتبه دو: طراحی وزن مشاهدات طراحی مرتبه سه: اضافه کردن مشاهدات به منظور گسترش شبکه

در مشاهده حرکات پوسته با استفاده از GPS در ابتدا بردار جابجایی و ماتریس واریانس-کواریانس متناظر با آن با استفاده از دو نوبت مشاهده نسبت به یک سیستم مختصات مانند ITRF 2000 تعیین می شود. سپس پارامترهای تغییر شکل پوسته مانند استرین، برش، اتساع و... محاسبه می گردند. با توجه به اینکه در شبکه‌های GPS برخلاف شبکه‌های ژئودزی کلاسیک نیازی به دید مستقیم بین ایستگاه‌ها وجود ندارد طراحی آنها تا حدودی آسان تر است. در طراحی این شبکه‌ها طراحی مرتبه دو به آن معنا که در طراحی شبکه‌های ژئودتیکی دیده می شود وجود ندارد و از آنجا که هدف اندازه‌گیری جابجایی‌ها است طراحی مرتبه صفر در نوبت اول مشاهدات، اهمیت ندارد [۲].

در طراحی شبکه‌های مانیتورینگ توابع هدفی باید تعیین گردند تا از کمینه‌سازی آنها شبکه بهینه حاصل گردد. این توابع هدف به صورت مختلف با توجه به کاربرد شبکه و نوع پارامترهایی که از آنها استخراج می گردند تعیین می شوند. به عنوان مثال چنانچه از شبکه جهت تعیین پارامترهای استرین استفاده شود می توان دقت نهایی این پارامترها را به عنوان معیاری برای بهینگی در نظر گرفت و یا چنانچه از مشاهدات GPS جهت تعیین پارامترهای مکانیکی گسل استفاده شود، می توان دقت

تعیین تابع هدف مبتنی بر دقت پارامترهای مکانیکی گسل

با استفاده از مدل های الاستیک و ویسکوالاستیک می توان رابطه‌ای بین پارامترهای مکانیکی و زمین‌شناسی گسل مانند سرعت لغزش، عمق قفل‌شدگی و دوره بازگشت زلزله با مشاهدات سطحی GPS یافت [۳]. یکی از ساده‌ترین این مدل‌ها، مدل امتداد لغز^۵ در پوسته الاستیک است، که در این مقاله از آن به صورت زیر استفاده شده است [۴،۵]:

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

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



شکل ۱: گسل امتداد لغز چپگرد [۶].

در صورت وجود n ایستگاه مشاهداتی، روابط فوق در فرم ماتریسی زیر قابل نمایش است:

$$l = AX, l = \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ \vdots \\ dx_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} \frac{\partial dx_1}{\partial v} & \frac{\partial dx_1}{\partial H} \\ \frac{\partial dx_2}{\partial v} & \frac{\partial dx_2}{\partial H} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial dx_n}{\partial v} & \frac{\partial dx_n}{\partial H} \end{bmatrix} = \quad (2)$$

برای حصول به این هدف از نقشه‌های زمین‌شناسی رقومی در طراحی شبکه استفاده شده‌است. این نقشه‌ها اطلاعات مفیدی در مورد ساختارهای زمین‌شناسی در اختیار قرار می‌دهند که با مشخص بودن خواص هر کدام می‌توان در مورد محل مناسب برای ساخت ایستگاه تصمیم گرفت. در هر صورت ساختارهای حاوی سنگ‌های آذرین و دگرگونی مانند: آندزیت^۶، گرانیت^۷، رونداسیت^۸، بازالت^۹، اسیدیک^{۱۰}، دیوریت^{۱۱} جهت استقرار ایستگاه‌های GPS مناسب‌تر می‌باشند.

تابع هدف

پس از بررسی شرایط مختلف در طراحی نوبت به ارائه تابع هدف ترکیبی که دربرگیرنده تمام قیود فوق باشد می‌رسد. باتوجه به حداقل هزینه و حداکثر دقت ممکن در طراحی بادر نظر گرفتن قیود زمین‌شناسی رابطه تابع هدف به صورت زیر است:

$$\forall (x_i, y_i) \in \Gamma$$

$$\sum (P_{x_i} + P_{y_i}) + \lambda_1 \sigma_v^2 + \lambda_2 \sigma_H^2 \rightarrow \min$$

$$P_{x_i} = \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \quad P_{y_i} = \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \quad (۶)$$

$$0 \leq P_{x_i} \leq P_{x_{\max}} \quad , \quad 0 \leq P_{y_i} \leq P_{y_{\max}}$$

$$\Gamma = \gamma_1(x_l, y_l, x_u, y_u) \cup \gamma_2(x_l, y_l, x_u, y_u) \cup \dots \cup \gamma_m(x_l, y_l, x_u, y_u)$$

در رابطه فوق σ_v^2, σ_H^2 واریانس پارامترهای گسل، λ_i ها مقادیر ثابت و مثبتی که عمل وزن دهی به هر یک از جملات را در تابع هدف ترکیبی به عهده‌دارند، P_{x_i}, P_{y_i} وزن مشاهدات، Γ مجموعه مناطق مناسب زمین‌شناسی و (x_l, y_l, x_u, y_u) مختصات گوشه‌های آن مناطق هستند.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از شاخه‌های اصلی محاسبات تکاملی و حوزه‌ای از هوش مصنوعی است که به سرعت در حال رشد است. این تئوری که با هدف جستجو و بهینه‌سازی مسائل و با الهام از تئوری تکامل داروین توسعه‌یافت اولین بار توسط جان هلند در سال ۱۹۷۵ ارائه شد پس از آن شاگرد وی دیوید گلدبرگ تحقیق در این زمینه را ادامه داد. الگوریتم‌های ژنتیک با داشتن ویژگی‌هایی چون انعطاف پذیری، استحکام و سازگاری در مسائل پیچیده عملکرد موفقی داشته و به‌نظر می‌رسد از

$$= \begin{bmatrix} -\frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{x_1}{H}\right) & \frac{v}{\pi} \frac{x_1}{H^2 + x_1^2} \\ -\frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{x_2}{H}\right) & \frac{v}{\pi} \frac{x_2}{H^2 + x_2^2} \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{x_n}{H}\right) & \frac{v}{\pi} \frac{x_n}{H^2 + x_n^2} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} V \\ H \end{bmatrix}$$

که در آن V, H پارامترهای مجهول مسئله هستند. جواب حل کمترین مربعات معادلات (۲) به صورت زیر است:

$$\delta X = (A^T \sum_{dx}^{-1} A)^{-1} A^T L, \quad X = X_0 + \delta X \quad (۳)$$

در صورتی که از وابستگی بین مشاهدات GPS صرف نظر کنیم ماتریس واریانس-کوواریانس مشاهدات یک ماتریس قطری خواهد بود:

$$\sum_{dx} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{dx_1}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{dx_2}^2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & \dots & \dots & \frac{1}{\sigma_{dx_n}^2} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

با توجه به رابطه (۳) ماتریس واریانس-کوواریانس پارامترهای مجهول بدین صورت به دست می‌آید:

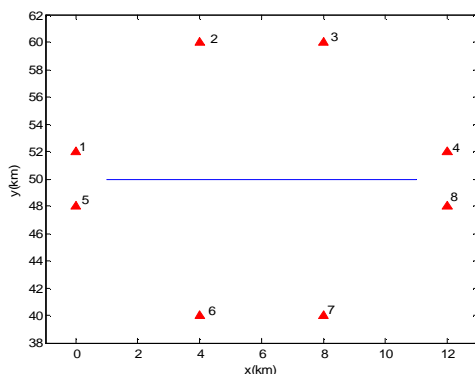
$$\sum_{XX} = (A^T \sum_{dx}^{-1} A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & \sigma_{HV} \\ \sigma_{HV} & \sigma_H^2 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

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

قیود زمین‌شناسی

نکته مهم در شبکه‌های ژئودینامیک محل استقرار ایستگاه است که باید از پایداری خوبی برخوردار باشد و در حین مطالعه نمایانگر جابجایی واقعی تکتونیکی باشد. برای این منظور باید ایستگاه‌ها دور از مناطق شهری، سفره‌های آب زیرزمینی در حال برداشت و همچنین مناطق با لرزه‌خیزی بالا بناشوند و جابجایی آنها نسبت به عوارض اطراف نباید بیش از 0.5 میلی‌متر در سال باشد. درضمن این ایستگاه‌ها در مکان‌هایی با دید باز باید بناشوند تا حداکثر استفاده از ماهواره‌های موجود در افق به‌عمل آید.

می‌شود (شکل ۲). فرض می‌شود تکنیک اندازه‌گیری GPS قادر به تعیین جابجایی به موازات گسل با دقت $Sd = \pm 1mm/yr$ است [۱۰].



شکل ۲: خط گسل و موقعیت اولیه نقاط شبکه.

مختصات اولیه ایستگاه‌های GPS در این شبکه فرضی در جدول (۲) آمده است (سیستم مختصات محلی است). با استفاده از فرمول‌های (۲) الی (۵) دقت پارامترهای گسل در این شبکه محاسبه می‌گردد. دیده می‌شود که این شبکه قادر به تعیین پارامترهای گسل با دقت $\sigma H = \pm 24.3km$, $\sigma v = \pm 16.1mm/yr$ است.

جدول ۲: موقعیت اولیه ایستگاه‌ها (Xh فاصله عمودی از خط گسل).

| Station no. | X(m) | Y(m) | Xh(m) |
|-------------|-------|-------|--------|
| 1 | 0 | 52000 | 2000 |
| 2 | 4000 | 60000 | 10000 |
| 3 | 8000 | 60000 | 10000 |
| 4 | 12000 | 52000 | 2000 |
| 5 | 0 | 48000 | -2000 |
| 6 | 4000 | 40000 | -10000 |
| 7 | 8000 | 40000 | -10000 |
| 8 | 12000 | 48000 | -2000 |

جدول ۳: موقعیت بهینه ایستگاه‌های شبکه.

| Station No. | X(m) | Y(m) | Distance from the Fault(m) |
|-------------|-------|--------|----------------------------|
| 1 | 0 | 57745 | 7745 |
| 2 | 4000 | 149759 | 99759 |
| 3 | 8000 | -48901 | -98901 |
| 4 | 12000 | 41502 | -8498 |
| 5 | 0 | 42341 | 7659 |
| 6 | 4000 | 57735 | 7735 |
| 7 | 8000 | 149860 | 99860 |
| 8 | 12000 | 57758 | 7758 |

توانایی خوبی در بهینه‌سازی مسائل پیچیده ترکیبی، بویژه وقتی که تعداد پارامترهای مساله بسیار زیاد است، برخوردار باشند. طرح یک الگوریتم بهینه‌سازی موثر برای مسائل خاص، به میزان اطلاعات ما در مورد آن مساله بستگی دارد [۹،۷،۸]. یک الگوریتم ژنتیک را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۷]:

- ایجاد جامعه اولیه
 - محاسبه و انتساب میزان شایستگی به هر عضو
 - انتخاب اعضا جهت تکثیر
 - ایجاد نمونه جدید با ترکیب و جهش
 - محاسبه شایستگی نمونه‌ها
 - جایگزینی نمونه‌ها در نسل جدید
 - 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 [۷].

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) می‌باشد. 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 [۷] 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.

جدول ۱: پارامترهای الگوریتم ژنتیک.

| | |
|------------|------|
| Pop size | 40 |
| Generation | 1000 |
| Mutation | 0.01 |
| Selection | 0.50 |

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 قرار دارند در نظر گرفته $v = 10mm/yr$, $H = 10km$

$$\sigma H \rightarrow \min, \sigma V \rightarrow \min$$

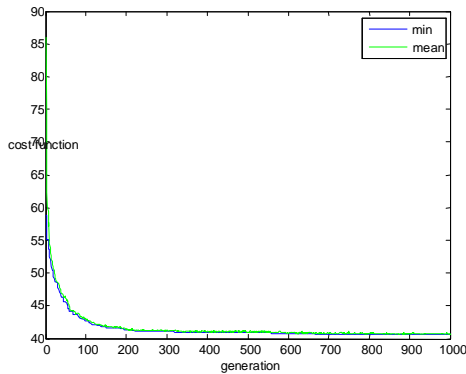
$$\sigma v \leq \pm 2 \text{ mm/yr}, \sigma H \leq \pm 2 \text{ km}$$

$$\sum_i^n (P_{x_i} + P_{y_i}) \rightarrow \min, P_{x_i} = \frac{1}{\sigma_{x_i}^2}, P_{y_i} = \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{x_i} \leq P_{x_{\max_i}}, 0 \leq P_{y_i} \leq P_{y_{\max_i}}$$

$$\text{cost} = \sum_i^n (p_{x_i} + p_{y_i}) + \sigma V + \sigma H$$

شکل (۵) همگرایی تابع هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۵: کمترین مقدار تابع هدف و متوسط آن به ازای تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک.

جدول ۴: موقعیت بهینه ایستگاه‌های شبکه.

| Station No. | X(m) | Y(m) | Distance from the Fault(m) |
|-------------|-------|--------|----------------------------|
| 1 | 872 | 57513 | 7513 |
| 2 | 1675 | 58404 | 8404 |
| 3 | 2221 | 56850 | 6850 |
| 4 | 2862 | 57868 | 7868 |
| 5 | 3306 | 58152 | 8152 |
| 6 | 6604 | 57626 | 7626 |
| 7 | 7401 | 56743 | 6743 |
| 8 | 7822 | 57510 | 7510 |
| 9 | 1780 | 42237 | -7763 |
| 10 | 2136 | 42323 | -7677 |
| 11 | 3455 | 42652 | -7348 |
| 12 | 4688 | 42707 | -7293 |
| 13 | 5193 | 42022 | -7978 |
| 14 | 6260 | 42554 | -7446 |
| 15 | 6798 | 42295 | -7705 |
| 16 | 9047 | 42146 | -7854 |
| 17 | 9641 | 42481 | -7519 |
| 18 | 10103 | 42492 | -7508 |
| 19 | 2004 | 149301 | 99301 |
| 20 | 2560 | 148604 | 98604 |
| 21 | 4620 | 149101 | 99101 |
| 22 | 6581 | 149080 | 99080 |
| 23 | 7697 | 149940 | 99940 |
| 24 | 6166 | -49098 | -99098 |
| 25 | 7580 | -49936 | -99936 |
| 26 | 10457 | -48121 | -98121 |

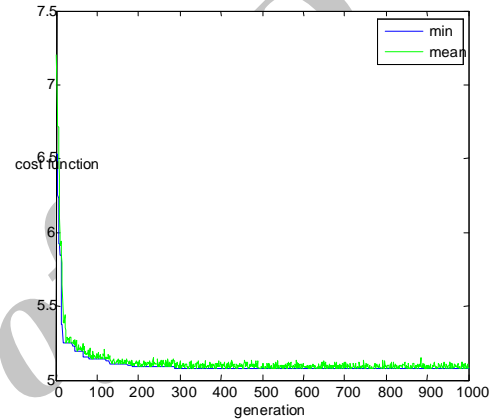
در صورتی که هدف افزایش توام دقت برآورد پارامترهای V, H باشد، تابع هدف بدین صورت تعریف می‌گردد:

$$\sigma V \rightarrow \min, \sigma H \rightarrow \min \quad (9)$$

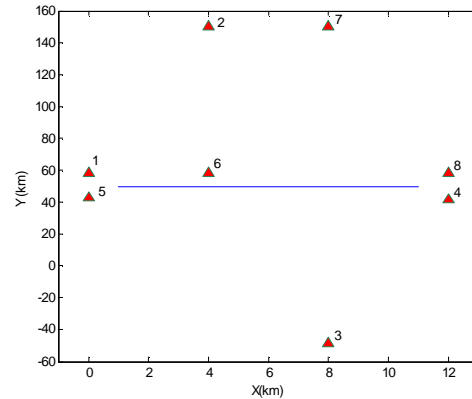
$$\text{cost} = \sigma V + \sigma H$$

شکل (۳) نشان‌دهنده روند همگرایی الگوریتم

ژنتیک می‌باشد. شکل (۴) شبکه اصلاح شده و جدول (۳) مختصات ایستگاه‌ها و فواصل آنها تا خط گسل را نشان می‌دهد. دقت حاصل از این شبکه برای پارامترهای گسل برابر $\sigma v = \pm 1.4 \text{ mm/yr}, \sigma H = \pm 3.7 \text{ km}$ خواهد بود.



شکل ۳: کمترین مقدار تابع هدف و متوسط آن به ازای تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک.



شکل ۴: موقعیت بهینه ایستگاه‌های شبکه.

در صورتی که بخواهیم پارامترهای گسل را با دقت خاصی مثلا $\sigma v \leq \pm 2 \text{ mm/yr}, \sigma H \leq \pm 2 \text{ km}$ برآورد کنیم با توجه به آنکه شبکه فعلی در بهترین حالت دقت $\sigma v = \pm 1.4 \text{ mm/yr}, \sigma H = \pm 3.7 \text{ km}$ را تامین می‌کند لازم است تعداد ایستگاه‌ها را افزایش دهیم. تابع هدف به صورت زیر است:

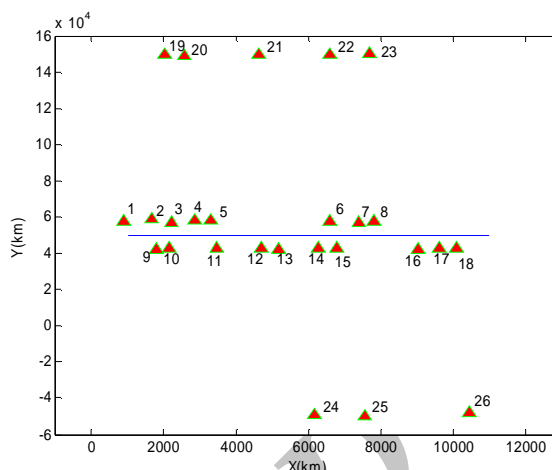
$$\sigma_v = \pm 0.8 \text{ mm/yr}, \sigma_H = \pm 2.0 \text{ km}$$

محاسبه می‌گردد.

مطالعه موردی: طراحی شبکه GPS برای گسل بام

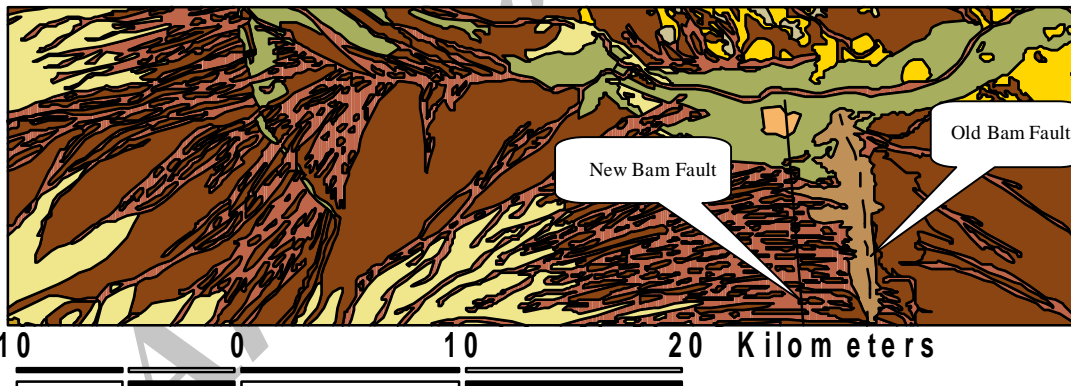
در شکل (۷) حدود منطقه مورد مطالعه آمده است. محدوده طوری انتخاب شده است که تنها گسل فعال بام در آن قرار دارد. فرض می‌شود جابجایی نقاط مانتورینگ فقط در اثر فعالیت این گسل هستند. جهت تعیین محل‌های مناسب برای ساخت ایستگاه از داده‌های زمین‌شناسی و نقشه‌های رقومی ۱/۲۵۰۰۰۰ منطقه استفاده شده است.

طبق مطالعات صورت گرفته، گسل فعال بام در ۵ کیلومتری گسل قدیم بام و دقیقاً جنوب شهر بام قرار دارد که این موضوع توجه کننده شدت خسارات وارده به شهر بام است [۱۱، ۱۲، ۱۳]. در شکل (۷) موقعیت گسل فعال بام (گسل جدید) و گسل سابق بام - که بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی وجود دارد - نشان داده شده است.



شکل ۶: موقعیت بهینه ایستگاه‌های شبکه (تعداد ایستگاه‌ها = ۲۶).

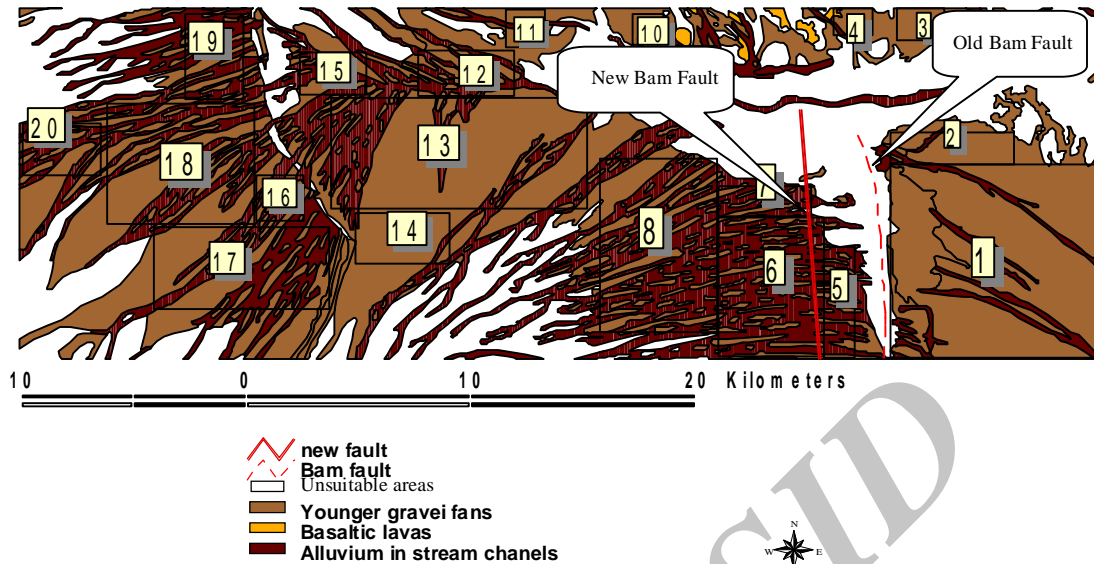
تعداد ایستگاه‌های لازم جهت دستیابی به دقت‌های $\sigma_v \leq \pm 2 \text{ mm/yr}, \sigma_H \leq \pm 2 \text{ km}$ برابر ۲۶ ایستگاه محاسبه شده است که موقعیت آنها در جدول (۴) درج شده است و در شکل (۶) دیده می‌شود. دقت حاصل از این شبکه برای پارامترهای گسل برابر



- new fault.shp
- bam fault
- geological layer
- Alluvium in stream channels.
- Ash-flow tuffs, well bedded, subordinate trachyandesitic and basalt lavas.
- Ash flow tuffs.
- Bam
- Basaltic lavas.
- Marl with rare sandstone and limestone.
- Older gravel fans.
- Silt of argil.
- Silts to ne, sandstone.
- Younger gravel fans.



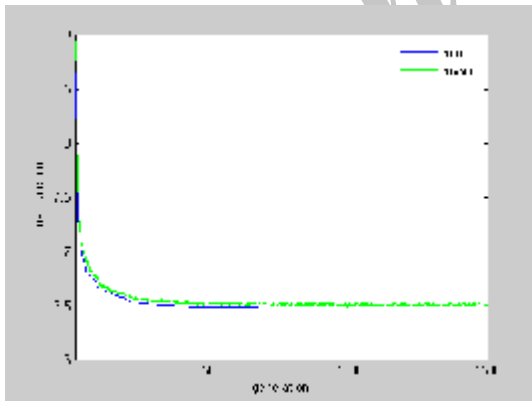
شکل ۷: نقشه زمین‌شناسی منطقه بام.



شکل ۸: نقشه زمین شناسی منطقه بزم، مناطق با استحکام مناسب به صورت مستطیل نشان داده شده اند.

در رابطه فوق λ_i ها مقادیر ثابت و مثبتی هستند که عمل وزن دهی به هریک از جملات را در تابع هدف ترکیبی به عهده دارند و Γ شامل مجموعه های مناسب زمین شناسی می باشد.

پس از تعیین تابع هدف، نوبت به حل مساله بهینه سازی و تعیین کمینه تابع هدف می رسد. در شکل (۹) روند کاهش تابع هدف به سمت کمینه آمده است.

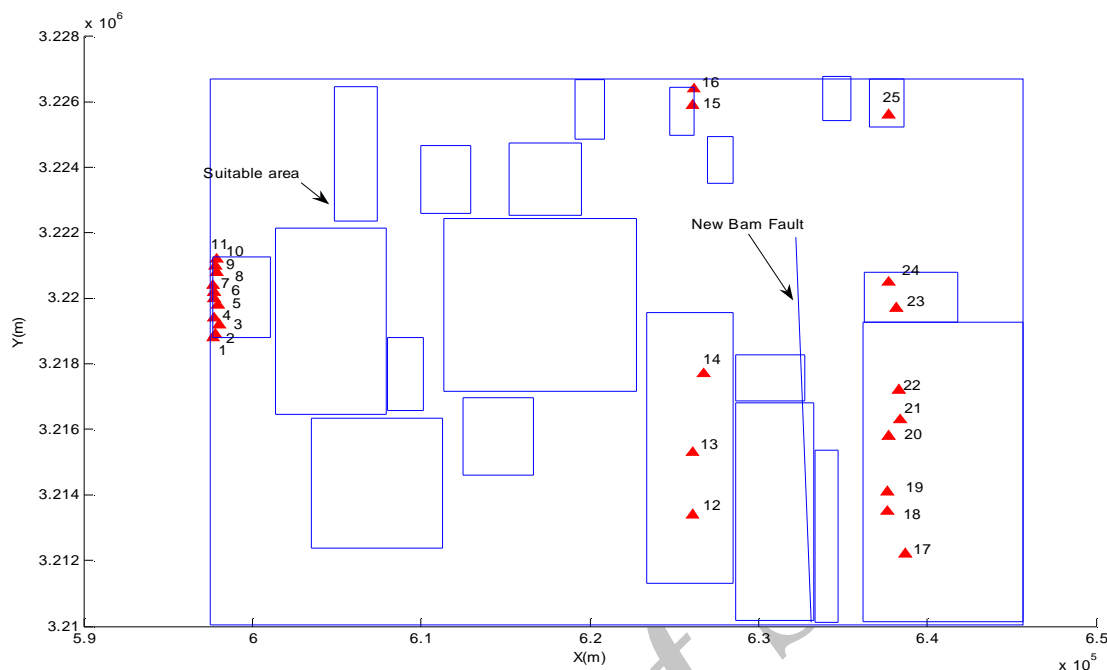


شکل ۹: کمترین مقدار تابع هدف و متوسط آن به ازای تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک.

دقت حاصل از این شبکه برای پارامترهای گسل بزم برابر $\sigma_{V_{max}} = \pm 1.9 \text{ mm/yr}$ و $\sigma_{H_{max}} = \pm 4.5 \text{ km}$ محاسبه می شود. مختصات ایستگاهها در جدول (۵) آمده است. موقعیت نقاط در شکل (۱۰) دیده می شود.

از روی نقشه های زمین شناسی، مناطق مستحکم و مناسب جهت ساخت ایستگاهها (ساختارهای آذرین و دگرگونی) بر روی نقشه به صورت مناطق رنگی مشخص شد (شکل ۸). جهت سهولت در برنامه نویسی این مناطق به صورت مستطیل در نظر گرفته شد و مجموعه Γ تعیین شد (در نرم افزار Arc view) که این مناطق در شکل (۸) نشان داده شده اند. هدف تعیین موقعیت ۲۵ ایستگاه جهت دستیابی به بهترین دقت برای عمق و سرعت لغزش گسل بزم می باشد. در این حالت به منظور تعیین موقعیت ایستگاهها در محل هایی که از لحاظ زمین شناسی پایدار بوده و حرکات مشاهده شده در آنها ناشی از عوامل تکتونیک باشند تا عوامل دیگر، قیود زمین شناسی در تعیین تابع هدف در نظر گرفته می شود. اجزای هریک از اعضای جامعه اولیه با توجه به مختصات اولیه ایستگاهها (۲۵ ایستگاه) و دقت ۲ میلی متری بردارهای جابجایی [۱۰]، در این حالت تعداد ژن هر کروموزوم ۵۰ خواهد بود. تابع هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \forall (x_i, y_i) \in \Gamma \\ \lambda_1 \sigma_V^2 + \lambda_2 \sigma_H^2 \rightarrow \min \\ P_{x_i} = \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \quad P_{y_i} = \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \quad (9) \\ \Gamma = \gamma_1(x_l, y_l, x_u, y_u) \cup \gamma_2(x_l, y_l, x_u, y_u) \\ \cup \dots \cup \gamma_m(x_l, y_l, x_u, y_u) \end{aligned}$$



شکل ۱۰: موقعیت بهینه ایستگاه های شبکه.

جدول ۵: موقعیت بهینه ایستگاه های شبکه (UTM).

| Station no. | X (m) | y (m) | Distance from the Fault(m) |
|-------------|--------|---------|----------------------------|
| 1 | 597690 | 3218800 | 34665 |
| 2 | 597810 | 3218900 | 34538 |
| 3 | 598050 | 3219200 | 34277 |
| 4 | 597780 | 3219400 | 34532 |
| 5 | 597980 | 3219800 | 34304 |
| 6 | 597710 | 3220000 | 34559 |
| 7 | 597710 | 3220200 | 34544 |
| 8 | 597690 | 3220400 | 34550 |
| 9 | 597870 | 3220800 | 34341 |
| 10 | 597800 | 3221000 | 34397 |
| 11 | 597910 | 3221200 | 34272 |
| 12 | 626110 | 3213400 | 6711 |
| 13 | 626100 | 3215300 | 6583 |
| 14 | 626760 | 3217700 | 5751 |
| 15 | 626100 | 3225900 | 5816 |
| 16 | 626130 | 3226400 | 5750 |
| 17 | 638680 | 3212200 | -5739 |
| 18 | 637670 | 3213500 | -4825 |
| 19 | 637620 | 3214100 | -4819 |
| 20 | 637710 | 3215800 | -5032 |
| 21 | 638390 | 3216300 | -5746 |
| 22 | 638350 | 3217200 | -5771 |
| 23 | 638150 | 3219700 | -5753 |
| 24 | 637710 | 3220500 | -5372 |
| 25 | 637690 | 3225600 | -5721 |

نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از ابزار بهینه سازی الگوریتم ژنتیک روشی جهت طراحی شبکه ارائه شده است که در آن با در نظر داشتن قیود زمین شناسی، شبکه ای جهت رسیدن به دقت مطلوب برآورد پارامترهای گسل طراحی می شود. الگوریتم ژنتیک ابزار قدرتمندی است که علی رغم پیچیده بودن تابع هدف و در شرایطی که پارامترها مقید هستند می توان از آن بهره برد. اگرچه به علت اعمال قیود زمین شناسی ممکن است دقت پارامترها کاهش یابد ولی از آنجا که حرکت نقاط با احتمال بیشتری ناشی از حرکات تکتونیک خواهد بود جوابها صحت بیشتری خواهند داشت. نتایج نمونه عددی شبیه سازی به وضوح حاکی از لزوم در نظر داشتن مدل حرکت گسل در طراحی شبکه است، نتایج نشان می دهد که فقط با تغییر محل ایستگاه های شبکه، دقت پارامترها از $\sigma_v = \pm 16.1 \text{ mm/yr}$, $\sigma_H = \pm 24.3 \text{ km}$ به مقدار $\sigma_v = \pm 1.2 \text{ mm/yr}$, $\sigma_H = \pm 1.3 \text{ km}$ بهبود می یابد.

تقدیر و تشکر

در اینجا لازم است از تمام کسانی که ما در انجام این پژوهش یاری نمودند به خصوص از آقای مهندس منوچهر

تهران به خاطر دراختیار گذاشتن تجربیات ارزشمند و رهنمودهای راهگشایشان تشکر نمایم.

شیرزایی کارشناس ارشد ژئودزی پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و آقای دکتر محمدعلی شریفی عضو هیئت علمی گروه مهندسی نقشه برداری و ژئوماتیک دانشگاه

مراجع

- 1 - Grafarend, E. (1974). "Optimization of geodetic networks." *Bolletino di geodesi a science affini*, Vol. 33, No. 4, PP. 351-406.
- 2 - Kuang Shan-long. (1991). "Optimization and design of deformation monitoring schemes." *Technical Report*, University of New Brunswick. Dept. of Surveying Engineering ; No. 157 .
- 3 - Savag, J. C. and Prescott, W. H. (1978). "Asthenospheric readjustment and the earthquake cycle." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, PP. 3369-3376.
- 4 - Grasimenco, M. D. et al., (2000). "On optimal geodetic network design for fault-mechanics studies." *Earth Planets Space*, Vol. 52, No. 11, PP. 985-987.
- 5 - Johnson, H. O. and Wyatt, F. K. (1994). "Geodetic network design for fault-mechanics studies." *Manuscripta Geodaetica*, Vol. 19, PP. 309-323.
- 6 - [http:// www.vojoudi.com/earthquake/education](http://www.vojoudi.com/earthquake/education)
- 7 - Haupt, L. R. and Haupt, S. E. (2004). *Practical genetic algorithm*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- 8 - Jin, Y. Q. and Wang, Y. (2001). "A genetic algorithm to simultaneously retrieve land surface roughness and soil wetness." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, No. 16, PP. 3093-3099.
- 9 - Zhan, H. G., Lee, Z. P., Shi, P., Chen, C. Q. and Carder, K. L. (2003). "Retrieval of water optical properties for optically deep waters using genetic algorithms." *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 5, PP. 1123-1128.
- 10 - Wyatt, F. (1989). "Displacement of surface monuments: vertical motion." *Journal of Geophysical Research* Vol. 94, PP. 1655-1664.
- 11 - Talebian, M. et al., (2004). "The 2003 Bam (Iran) earthquake- rupture of 'truly blind' fault." *Geophys. Res. Lett.*, 31, L11, 611, doi:10.1029/2004GL020, 058.
- 12 - Wang, R., Xia, Y., Grosser, H., Wetzell, H.U., Kaufmann, H. and Zschau, J. (2004). "The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry." *Geophys. J. Int.*, Vol. 159, PP. 917-922.
- 13 - Funning, G. J., Parsons, B., Wright, T. J., Fielding, E. J. and Jackson, J. A. (2005). "Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat ASAR imagery." *J. Geophys. Res.*, Vol. 110(B9),B09406,doi: 10.1029/2004JB003338.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | | |
|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 - Zero Order Design | 2 - First Order Design | 3 - Second Order Design |
| 4 - Third Order Design | 5 - Strike- Slip | 6 - Andesite |
| 7 - Granite | 8 - Rhyondacite | 9 - Basalt |
| 10 - Acidic | 11 - Diorite | |