طراحی بهینه شبکه های ژئودتیک به روش الگوریتم ژنتیک

محمد سعادت سرشت[i]؛ محمود ذوالفقاری[ii]؛ فرهاد صمدزادگان[i]

چکیده

توجه ژئودزین‌ها به طراحی شبکهٔ ژئودتیک با معیارهایی مثل دقت ماکزیمم، هزینه حداقل و قابلیت اعتماد ماکزیمم، به دو دهه قبل برمی‌گردد که به علت طبیعت پیچیدهٔ مساله، قیود هندسی و مفهومی، ناپیوستگی تابع هدف و بالاخره محدودیت‌های ذاتی روش‌های مبتنی بر گرادیان، مثل همگرایی بهینه موضعی و نه سراسری، به ابزاری قوی نیازمند است. با گسترش مفاهیم هوش مصنوعی در دهه اخیر، امروزه توانایی و امکان حل مسایل پیچیده با ابزارهای هوشمند الهام گرفته از طبیعت فراهم شده است. گروهی از این ابزارها الگوریتم‌های تکاملی است که در اینجا برای بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های ژئودتیک به کار رفته است. در این روش، تعدادی شبکه ژئودتیک به صورت اتفاقی طراحی شده و با گذر از نسل‌های مختلف تکامل می‌یابد تا معیارهای بهینه‌سازی و قیود مندرج در آن برآورده شود. شبکه نهایی طراحی شده با این روش (با فرض تکرار کافی نسل‌ها)، شبکه بهینه سراسری بوده که رجحانی اساسی در مقایسه با روش‌های مبتنی بر گرادیان دارد و ملاحظه می‌شود که علاوه بر همخوانی نتایج، بهبود قابل ملاحظه‌ای در شبکه طراحی شده حاصل شده است.

کلمات کلیدی

شبکه ژئودتیک، طراحی شبکه، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تکاملی

Geodetic Network Design Optimization Using Genetic Algorithms

Mohammad Saadatseresht, Mahmoud Zolfaghari, Farhad Samdzadegan

ABSTRACT

In this paper a novel non-parametric approach for designing geodetic networks based on evolutionary algorithms is proposed. Since conventional analytical optimization methods are based on gradient approaches, they have some drawbacks including approximate parameters requirement and inability to work with discrete objective functions and/or constraints e.g. visibility matter. To prevent from above problems, the standard genetic algorithm method is utilized. Primary tests demonstrate the capability of proposed method to design the optimal network without approximate values and with visibility constraint satisfaction.

KEYWORDS

Geodetic network, Network design, Optimization, Genetic Algorithm, Evolutionary Algorithm

[i] استادیار گروه مهندسی نقشه برداری؛ دانشکده فنی؛ دانشگاه تهران

[ii] دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر و عضو هیئت علمی وابسته دانشگاه تهران

۱- مقدمه

طراحی شبکه، در تعیین دقیق ابعاد و شکل اشیا در کاربردهای صنعتی و موقعیت دقیق نقاط در کانواها و شبکه‌های نقاط کنترل و همچنین بررسی تغییر شکل سازه‌ها و اندازه‌گیریهای دقیق اهمیتی اساسی دارد. به همین خاطر برای حصول نتایج با دقت و صحت بالا به شبکه‌ای نیاز است که معیارهای دقت مجاز و قابلیت اعتماد بالا را برآورده سازد. این هدف با دو شرط زیر حاصل می‌شود:

- آگاهی کامل از رفتار فیزیکی دستگاه‌های مربوطه در شرایط اندازه‌گیری
- طراحی و برنامه‌ریزی مشاهدات به صورتی که با توجه به انتشار خطاها به دقت مطلوب منتهی شود

شرط اول، موضوع کالیبراسیون دستگاه‌ها را تشکیل می‌دهد که با تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی و تکنیک‌های خاص آن بررسی شده و مستقیم یا غیرمستقیم بر مشاهدات اعمال می‌شود ولی شرط دوم امری پیچیده است که هنوز راه حل جامع و کاملی برای آن موجود نیست.

در زمینه طراحی شبکه‌های ژئودتیک تا کنون تحقیقات مفیدی به عمل آمده [۱]، [۲]، [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]، [۸] که در آنها مساله تعیین شکل شبکه، وزن لازم برای مشاهدات و درجه اعتمادپذیری به نتایج حاصل از شبکه، توجه شده است؛ ولی نبود تکنیکی مشخص و صریح برای حل مساله، دستیابی به شبکه‌ای را که قیدها و معیارهای لازم را تامین کند به تجربه فردی و میزان هوشمندی طراح و به کارگیری روش آزمون و خطا متکی کرده است. بنابراین کارایی روش آزمون و خطای محض در طراحی شبکه پایین است و اصولا بدون دخالت همه جانبهٔ اپراتور خبره به نتیجه نمی‌رسد.

در دیگر روش‌های محاسباتی هم فرض برآن است که شکل شبکه معلوم است و با معیاری مشخص وزنهای مشاهدات تعیین می‌شود [۱] یا فرض بر این است که وزن مشاهدات مشخص است و با تعریف مسیر جابجایی ایستگاه‌ها موقعیت بهینه آنها را مشخص می‌شود [۲]. در روشهای اخیر وزن مشاهدات و شکل شبکه مجهول درنظر گرفته می‌شود که برای حل به آگاهی از شکل اولیه شبکه نیاز است [٦] ، [۸]. کلیهٔ روش‌های فوق گرچه نسبت به روش پیشنهادی در این مقاله از سرعت نسبتا بالاتری برخوردار است؛ ولی همگی آنها به علت متکی بودن بر روش گرادیان، در تعیین نقطهٔ بهینه دو ضعف اساسی دارند:

- شبکهٔ طراحی شدهٔ نهایی، ممکن است یک شبکهٔ بهینهٔ موضعی باشد؛ به عبارت دیگر، اگر مقادیر اولیهٔ پارامترهای مساله تغییر یابد ممکن است پاسخ بهینه نیز تغییر یابد.
- با توجه به لزوم حفظ مشتق‌پذیری تابع مطلوبیت، مدل‌سازی قیدهای ناپیوسته (مثل قابلیت دید) امکان ندارد.

با توسعه و گسترش هوش مصنوعی که الهام گرفته از عملکرد درونی و برونی مغز و تکامل موجودات در طبیعت بوده است، امکان حل مسایل سخت[۱]؛ مانند مساله فوق؛ به وسیله الگوریتم‌های تکاملی[۲] تا حد زیادی حاصل شده است. مسایل سخت به مسایلی اطلاق می‌شود که پیچیدگی محاسباتی آنها با افزایش ابعادشان به صورت توانی و حتی نمایی افزایش می‌یابد [۱۵]. طراحی شبکه های ژئودتیک هم نمونه ای از این نوع مسایل است که با افزایش ایستگاه‌های اندازه گیری، پیچیدگی محاسباتی برای یافتن شبکه بهینهٔ سراسری به صورت توانی افزایش می‌یابد. از آنجاکه الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر گرادیان نیست، مشکلات ذکرشده در آن وجود ندارد.

روشی که در این تحقیق به کار گرفته شده است نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی به نام الگوریتم ژنتیک است که در آن جمعیتی از شبکه‌های ژئودتیک به صورت اتفاقی تولید شده و با اعمال اپراتورهای انتخاب، لقاح و جهش در گذر از نسل‌های متوالی تحت قیود مربوطه، معیار مشخصی را بهینه می‌سازد. یکی از ضعف‌های الگوریم ژنتیک، تنظیم پارامترهای آن است که اگر درست انجام نگیرد، کارایی را کم می‌کند و حتی ممکن است همگرایی در یافتن پاسخ بهینه حاصل نشود [۹]. اگرچه روش‌های متنوعی برای این تنظیم‌ها پیشنهاد شده است [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]؛ اما بهرحال طراح باید تا حدی با نحوه کار الگوریتم ژنتیک و اصول حاکم بر آن آشنایی کافی داشته باشد تا بتواند با این روش، به بهینه سراسری دست یابد.

در ادامه، ابتدا اصول طراحی شبکه‌های ژئودتیک و روش‌های معمول در آن به اختصار تشریح شده و پس از شرح کلیاتی از الگوریتم ژنتیک، به کارگیری آن در طراحی چندین شبکه ژئودتیک تست شده و نقاط ضعف و قوت آن بیان گردیده است. در انتها نتایج و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده در این زمینه از نظر خواهد گذشت.

۲- اصول طراحی شبکه های ژئودتیک

تحقیقات متعدد تا دو دهه اخیر در طراحی شبکه های ژئودتیک برای دو هدف عمده اندازه‌گیری شکل، ابعاد و موقعیت یک شیء یا تعیین تغییر شکل آن بوده است. در تمامی این موارد از مختصات که عنصری ریاضی است، برای بیان شکل، ابعاد، موقعیت و تغییر شکل استفاده می‌شود. تعیین مختصات به وسیله مشاهدات فیزیکی مانند طول و زاویه صورت می‌گیرد، بنابراین مدل ریاضی چیزی جز رابطه‌ای بین مشاهدات فیزیکی

و مختصات ریاضی نیست. هدف از طراحی شبکه‌های ژئودتیک[۲] بررسی انتشارخطای مشاهدات روی مختصات یا تابعی از آنها است به طوری که قبل از انجام عملیات زمینی از نوع، تعداد، دقت و شکل مشاهدات برای کسب نتیجه دلخواه اطمینان حاصل شود. قبل از طراحی باید معیار بهینه‌سازی و قیود منطقی و فیزیکی مشخص شود تا طراحی بر اساس تعاریف اولیهٔ مشخصی انجام پذیرد. معیار بهینگی در طراحی می‌تواند با توجه به هدف ایجاد شبکه ژئودتیک، دقت، قابلیت اطمینان و هزینه تعدادی از نقاط یا تابعی ترکیبی از آنها باشد. قیود فیزیکی، مانند محدودیت‌های دستگاهی مثل حداکثر برد طولیاب، دقت تئودولیت و نظایر آن است. قیود منطقی مانند قابلیت دید نقاط به هم، نوع تجهیزات مشاهداتی دردسترس و موقعیت مناسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری است.

موضوع بهینه‌سازی در طراحی شبکه‌های ژئودتیک را می‌توان برای سادگی بیشتر و روشمندتر کردن آن، تحت قالب چهار مسألهٔ مشخص و مرتبط با هم بررسی کرد [۳]. طبق جدول (۱) A ماتریس طرح مبین شکل شبکه، C_l ماتریس کوواریانس مشاهدات مبین وزن و وابستگی آماری بین مشاهدات و C_x ماتریس کوواریانس مختصات است که بر اساس رابطه اساس انتشار خطاها (۱) محاسبه می‌شود.

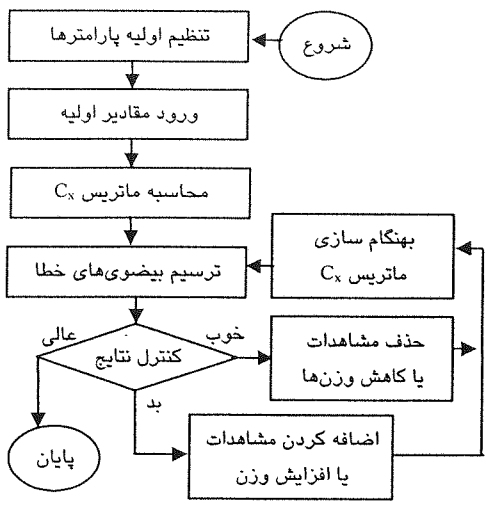
$$C_x=(A^tC_l^{-1}A)^- \qquad \text{رابطه (۱)}$$

جدول (۱): مراتب طراحی شبکه های ژئودتیک

هدف	مجهولات	معلومات	مرتبه طراحی
تعیین سیستم مختصات با حداقل خطا	x , C_x	A , C_l	ZOD
تعیین شکل شبکه	A	C_x , C_l	FOD
تعیین وزن مشاهدات	C_l	C_x , A	SOD
بهبود شبکه با تغییر در وزن‌ها و شکل شبکه	A , C_l	C_x	THOD

۲-۱- روش‌های طراحی شبکه

دو روش اصلی به طور معمول برای طراحی شبکه‌های ژئودتیک به کار می‌رود [۱]: روش تکراری و روش مستقیم. در روش تکراری یا آزمون و خطا، طراح با معرفی شکل و وزن‌های اولیه به برآوردی تقریبی از C_x می‌رسد. سپس از مقایسه نتیجه با C_x موردنظر، به تغییر در طراحی اولیه می‌پردازد تا نتیجه بدست آمده بهبود یابد. اگر چه نتیجهٔ نهایی واقعا بهینه نیست؛ اما این امر تا جایی ادامه می‌یابد که اختلاف نتیجه با مقدار دلخواه قابل صرف نظر باشد (شکل ۱). بزرگ‌ترین ضعف این روش زمانبر بودن آن است که موجب پایین آمدن کارایی طراحی می‌شود.



شکل (۱): طراحی شبکه به روش تکرار (آزمون و خطا)

روش دیگر روش مستقیم یا تحلیلی است که در آن تنها امکان حل مساله SOD وجود دارد. در این حالت بایستی شکل شبکه یعنی ماتریس A معلوم باشد تا مساله بصورت مستقیم قابل حل شود [٤]. اما تعیین شکل ماتریس A تنها در مرحله FOD امکان‌پذیر است که در آن فرض بر معلوم بودن C_l است. بنابراین دیده می‌شود که طراحی مرتبه SOD یا روش مستقیم به صورت مستقل، امکان‌پذیر نیست و تنها روش اجرایی برای طراحی شبکه، روش تکرار است.

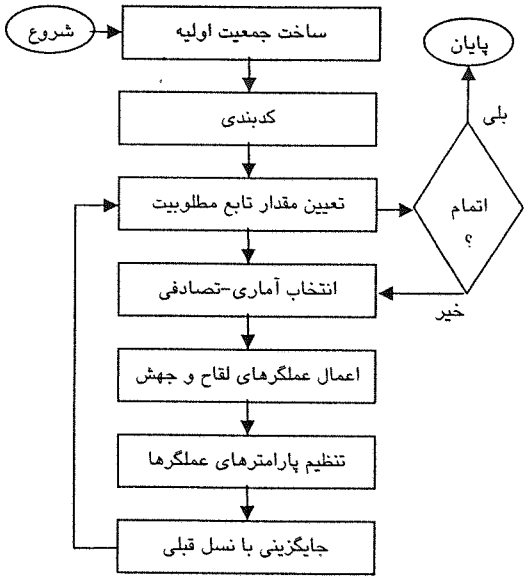
۲-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، الهام گرفته از تکامل در طبیعت به وسیله John Holland در ۱۹۷۵ ارائه شد [۱۳]. روش‌های دیگر؛ مانند استراتژی‌های تکاملی، برنامه‌نویسی ژنتیکی، سیستم‌های طبقه‌بندی کننده، کلونی مورچه‌ها، سیستم ایمنی و دیگر موارد، همگی مبانی هوشمندی در طبیعت را شبیه‌سازی می‌کند که تحت عنوان حسابگری زیستی یا تکاملی مطرح می‌شود. علت توجه به این روش‌ها از آنجا ناشی می‌شود که در طبیعت، مسائل بسیار پیچیده با سرعت و دقت مناسب حل می‌شود. این امر موجب شده است که در موضوعاتی مانند بهینه‌سازی؛ که معمولا پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد، از تکنیک‌های به کار رفته در طبیعت استفاده شود.

درمقابل، روش‌های معمول بهینه‌سازی بر اساس جست و جوی معین[٤] در جهت عکس گرادیان تابع مطلوبیت عمل می‌کند که در هر تکرار، به نقطهٔ بهینه نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود. این روش‌ها به جواب تقریبی اولیه نسبتا دقیقی نیاز دارد تا نقطه اکسترمم حاصله، بهینهٔ سراسری[٥] یا مطلق باشد نه بهینه موضعی[٦]. از سوی دیگر، تعیین طول مناسب گام‌های تغییر در

هر تکرار برای رسیدن به نقطهٔ بهینه، خود مساله‌ای پیچیده است. همچنین به محاسبه مشتق تابع؛ که گاهی پیچیده و حتی ناممکن است، نیز نیاز است [۱۴].

روشهای جست و جوی نامعین[۷]؛ مانند الگوریتم ژنتیک، بر اساس جست و جوی تصادفی- آماری در فضای پارامترهای تابع مطلوبیت[۸] عمل کرده و پاسخ بهینه را می‌یابد. مهم‌ترین تفاوت این روش‌ها با روش سادهٔ سعی و خطا در به کارگیری تجربهٔ حاصل از نتایج قبلی است که در جست و جوی پارامترهای دقیق‌تر است، به طوری که جمعیتی از راه‌حل‌ها با احتمالی بر اساس تابع مطلوبیت به صورت اتفاقی بقا و تکثیر می‌یابد. الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه‌سازی تابع، درعمل بسیار موفق بوده است. بخصوص در توابعی که رفتاری بسیار پیچیده و غیر قابل مدل‌سازی داشته و دارای بهینه‌های موضعی فراوان بوده است [۱۵]. در این گونه مسایل، الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های گرادیانی بسیار کاراتر بوده و در زمان کمتر بدون نیاز به دخالت بالای طراح، نتایج قابل اطمینان‌تر و بهتری به دست داده است. یکی از مزایای بزرگ این روش، عام بودن آن است؛ زیرا علاوه بر این که قابل پیاده‌سازی برای هر نوع مساله با هر تعداد پارامتر بوده، در آن به مشتق‌گیری تابع نیز نیازی نیست. تابع مطلوبیت در هر ساختاری و به هر تعدادی می‌تواند باشد و قیود دلخواه را نیز می‌توان در آن قرار داد؛ اما همان طور که ذکر شد این روش اصولا وقتی جواب می‌دهد که پارامترهای الگوریتم ژنتیک به شکل مناسبی با توجه به صورت مساله تنظیم شود. برای این منظور، در تست‌های صورت‌گرفته روش خودانطباقی[۹] به کار گرفته شده است.



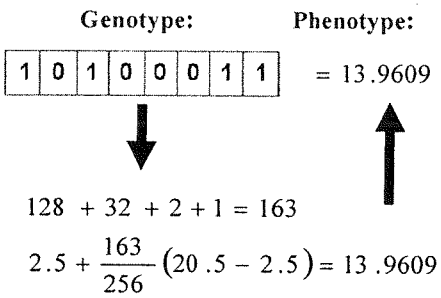
شکل(۲) : چرخه کاری در الگوریتم ژنتیک (فرآیند تکامل)

۲-۳- فرایند الگوریتم ژنتیک

ایده کلی الگوریتم ژنتیک[۱۰] جست و جوی نقطهٔ بهینه در جمعیت و کسب تجربه با گذر از نسل‌های مختلف و به کارگیری آن در تکامل نسل‌ها برای تولید نقطهٔ بهینهٔ مطلق است. برای این منظور در GA ابتدا راه حل ها کدبندی شده و رشته‌های کد به نام کروموزوم تشکیل می‌شود. جمعیتی از کروموزوم‌ها به وسیله عملگرهای ژنتیکی انتخاب، لقاح و جهش تغییر و تکامل یافته و بر اساس تابع مطلوبیتشان بقا یافته و تکثیر می شود تا در گذر از نسل‌ها، کروموزوم با تابع مطلوبیت بهینه به دست آید (شکل۲). هریک از مراحل ذکر شده در زیر شرح داده می‌شود.

ساخت جمعیت اولیه: در الگوریتم ژنیک بر خلاف روش‌های بهینه‌سازی موضعی، مانند SA[۱۱] که در آن تنها به وسیله یک نقطه به جست و جوی نقطهٔ بهینه پرداخته می‌شود، جمعیتی از نقاط یا کروموزوم‌ها به طور موازی و با کمک یکدیگر، نقطهٔ بهینه را جست و جو می‌کنند. برای ساخت این جمعیت، در ابتدا کروموزوم‌ها را به تعداد موردنظر، به صورت یکنواخت و کاملا اتفاقی در فضای جست و جو ایجاد می‌کنند. روش دیگر این است که گونه‌های آغازین، که احتمال بیشتری از وجود جواب بهینه در اطراف آنها است؛ ابتدا در تعداد کم با پراکندگی بالا تولید کرده و جمعیت اولیه را در اطراف آنها با تراکم بالاتر ایجاد می‌کنند تا در نواحی بهتر، نقاط بیشتری تولید شود.

کدبندی: اولین و یکی از مهم‌ترین جنبه‌های پیاده‌سازی الگوریتم‌های ژنتیکی، کدبندی راه حل‌ها به رشته ای از ژن‌ها به نام کروموزوم است. مقدار هر ژن در این رشته می‌تواند از یک مجموعه گسسته؛ که عموما باینری است، انتخاب شود. در واقع، هر کروموزوم معرّف یک نقطه در فضای جست و جوی کل راه حل‌ها است و هدف، یافتن بهترین راه حل یا نقطهٔ بهینه می‌باشد (شکل۳).

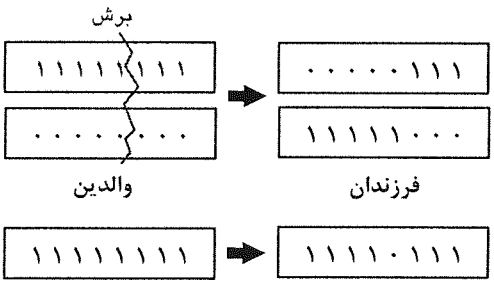


شکل (۳): مثالی از کدبندی باینری ۸ بیتی یک عدد حقیقی بین ۲/۵ و ۲۰/۵

تابع مطلوبیت: تابع هدف یا تابع مطلوبیت، معیار بهینه‌سازی است که می‌تواند یک یا چند تابع و همچنین مقید یا بدون

قید باشد. در توابع هدف مقید تنها نقاطی در فضای جست و جو قابل قبول است که قید یا قیود موردنظر را ارضا کند. ذکر این نکته لازم است که هدف در مسایل بهینه‌سازی، یافتن نقطهٔ بهینه با تابع مطلوبیت حداقل در کل فضا است؛ در حالی که در اکثر مسائل مهندسی و طراحی، هدف، یافتن نقطه با تابع مطلوبیت در یک سطحِ ارضا کننده است. بخصوص در این حالت، روش الگوریتم ژنتیکی روشی مناسب است، چراکه هرچه دقت دستیابی به نقطه بهینهٔ سراسری افزایش می‌یابد، زمان جست و جو به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

بعد از ساخت جمعیت اولیه، درصورتی که کروموزومی با تابع مطلوبیتِ ارضا کننده وجود داشته باشد کار تمام است در غیر این صورت با استفاده از اپراتورهای ژنتیکی، جمعیت، از نسلی به نسل دیگر تکامل داده می‌شود. برای ایجاد نسل جدید بعد از انتخاب[۱۲] افراد بهتر از نسل قدیم، دو عملگر برخورد یا لقاح[۱۳] و جهش[۱۴] به آنها اعمال می‌شود.

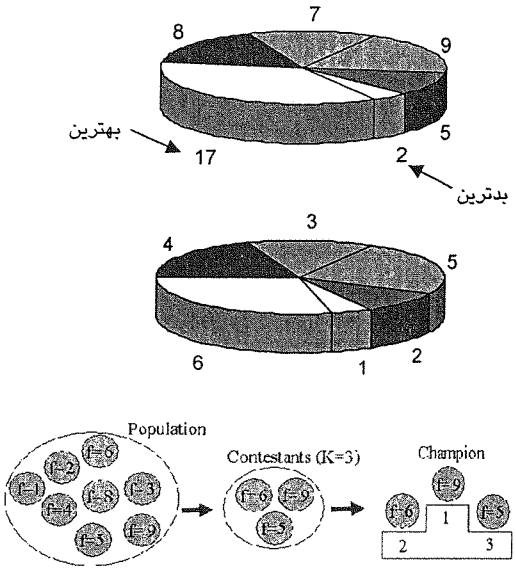


شکل (۴): مثالی از عملگر لقاح در بالا و عملگر جهش در پایین

عملگر لقاح: همان طور که از نامش پیداست به فرآیند ترکیب دو یا چند کروموزوم و ایجاد کروموزوم‌های جدیدتر می‌پردازد. دلیل انجام این کار در فرضیهٔ بلوک‌های سازنده[۱۵] آقای Goldberg نهفته است [۱۵]. کروموزوم‌های با تابع مطلوبیت بهتر دارای زیرالگوهای بهتری دارد، بنابراین ترکیب کروموزوم‌های خوب با هم و قراردادن زیرالگوهای مناسبِ هریک در کنارهم، به ایجاد کروموزوم‌های خوب تر با تابع مطلوبیتِ بهتر منجر می‌شود. یکی از معروف‌ترین عملگرهای لقاح، تقاطع[۱۶] است (شکل ۴).

عملگر جهش: پس از اعمال این عملگر یک یا چند ژن از کروموزوم به طور اتفاقی تغییر می‌کند (شکل ۴). مبنای استفاده از عملگر جهش، تئوری تکامل داروین است که به تحول تصادفی کروموزوم‌ها و انتخاب طبیعی بهترین آنها و بقا و تکثیر کروموزوم‌های انتخابی اعتقاد دارد. وجود عملگر جهش باعث اطمینان از جست و جو در کل فضای جست و جو می‌شود و ما را از به دام افتادن در بستر جذب یک نقطهٔ بهینهٔ موضعی و همگرایی زودرس نجات می‌دهد. بنابراین، عملگر جهش باعث بالا رفتن تنوع در جمعیت شده و احتمال یافتن نقطهٔ بهینهٔ مطلق، بالاتر می‌رود. نرخ جهش معمولا عددی کوچک در حدود ۰،۰۰۲ کل ژن‌ها است [۱۵].

انتخاب: از آنجا که الگوریتم‌های ژنتیکی بر اساس جست و جوی تصادفی- آماری عمل می‌کند، بقا و تکثیر کروموزوم‌ها با رقابت بین آنها صورت می‌پذیرد؛ یعنی به نسبت احتمال حاصل از مقدار تابع مطلوبیت یک کروموزوم انتخاب شده و در نسل بعد بقا می یابد[۱۷]. همچنین کروموزوم با تابع مطلوبیت بهتر با احتمال بالاتری در یک نسل انتخاب شده و فرزندان بیشتری از خود را تکثیر و تولید می‌کند. در صورتی که هدف، جست و جوی حداکثر مقدار باشد، این احتمال می‌تواند تابعی صعودی از مقدار تابع مطلوبیت باشد. تعیین مناسب این تابع به مسالهٔ مقیاس[۱۸] مشهور است که اهرمی برای تغییر فشار انتخاب[۱۹] است. برای اجتناب از مشکل فوق و تصادفی‌تر کردن انتخاب، روش‌های دیگری؛ مانند انتخاب رقابتی[۲۰] قابل به کارگیری است که در آن، تعداد نسبتا کمی از افراد را به صورت تصادفی انتخاب و بهترین آنها را به عنوان انتخاب نهایی درنظر می‌گیرند و یا بر طبق روش‌های انتخاب ترتیبی[۲۱] ابتدا افراد را از خوب به بد مرتب کرده و انتخاب را به نسبت ردیف ترتیب آنها انجام می‌دهند (شکل ۵).



شکل (۵): انتخاب تصادفی- آماری در الگوریتم ژنتیک به روش احتمالی، ترتیبی و رقابتی (از بالا به پایین).

شرط پایان: شرط پایان الگوریتم نیز می‌تواند حداکثر تعداد نسلها، دقت تعیین پارامترهای تابع مطلوبیت، حداکثر تکرار بدون بهبود، همگرایی جمعیت و ارضای قیود خاص باشد.

تنظیم پارامترها[۲۲]: نکته مهم در به کارگیری الگوریتم‌های ژنتیکی تنظیم پارامترهای آن بسته به نوع مساله است. اگر این

امر به خوبی انجام نگیرد، این روش یا اصلا جواب نمی دهد یا این که بسیار کند عمل می‌کند. تعدادی از این پارامترها عبارت است از نرخ جهش، نرخ لقاح، نوع عملگرها، تعداد جمعیت، روش انتخاب، تابع مقیاس در انتخاب، روش کدبندی و نظایر آن که بعضی با نگاه به نوع مساله به صورت تجربی قابل تعیین بوده و بعضی باید با سعی و خطا تعیین شود. برای حل این مساله می‌توان پارامترهای فوق را به صورت تطبیقی با گذر از نسل‌ها تغییر داد؛ مثلا می‌توان هر پنجاه نسل یک بار پارامترهای فوق را برآورد کرد و با پارامترهای اصلاح شده به تکامل نسل‌ها پرداخت. یا این که این پارامترها را، همانند پارامترهای مساله، مجهول درنظر گرفت و به همراه مساله، بهینه‌سازی کرد [۹]. یک ابزار بسیار مناسب دیگر برای این کار سیستم‌های استدلال فازی[۲۳] است [۱۱]. البته روش‌های دیگر؛ مانند تکامل در تکامل[۲۴] که شبیه سازی کامل‌تری از طبیعت نسبت به روش‌های معمول تکاملی است، وجود دارد که در آن، دو یا چند جمعیت مختلف موثر بر هم، با هم تکامل می‌یابند [۱۲].

جایگزینی با نسل قبل: روش‌های متنوعی برای این کار وجود دارد که فشار انتخاب در فضای جست و جو را با حفظ بعضی افراد و حذف بقیهٔ آنها از نسلی به نسل دیگر کنترل می‌کند [۱۳]. در روش (a+b) افراد نسل قدیم و جدید باهم در ایجاد نسل بعد مشارکت می‌کنند، در حالی که در روش (a,b) تنها نسل جدید به عنوان نسل آتی به کارگرفته می‌شود. گاهی ترکیب این دو نسل به صورت معین است؛ مثلا ۵۰ درصد بهترین اعضای نسل قدیم بدون تغییر در نسل بعد حضور می‌یابند و گاهی به صورت نامعین؛ مثلا افراد نسل آتی به صورت اتفاقی از نسل جدید و قدیم انتخاب می‌شوند. جایگزینی به هر روشی که باشد باید بهترین عضو نسل قبل را حفظ کند[۲۵] چراکه احتمال تخریب آن به وسیلهٔ عملگرهای ژنتیکی در نسل بعد وجود دارد.

۳- طراحی شبکه‌های ژئودتیک به روش الگوریتم‌های ژنتیکی

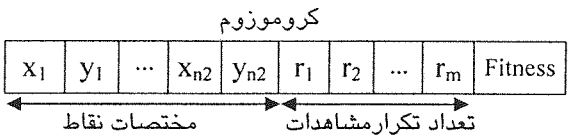
با توجه به مشکلات موجود در روش مستقیم و تحلیلی طراحی شبکه، الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی سراسری، می‌تواند کارایی بالایی در بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های ژئودتیک داشته باشد. همان طور که ذکر شد از آنجاکه طراحی شبکه مساله‌ای است از نوع سخت و تابع موردنظر برای بهینه‌سازی بواسطه وجود قیود منطقی و فیزیکی تابعی پیچیده و ناپیوسته می باشد، به کارگیری روش‌های مبتنی بر گرادیان، که براساس مشتق‌گیری از تابع کار می‌کند و شرط پیوستگی تابع، شرط اساسی برای آن‌ها است، امکان‌پذیر نخواهد بود. برای مثال، قابلیت دید بین دو نقطه ناشی از ناهمواری سطح، امری است که با تغییر شکل شبکه، تابع مطلوبیتی مانند $\mathrm{Trace}(C_x)$ را به صورت ناپیوسته تغییر می‌دهد. بنابراین، به کارگیری روش‌هایی که بدون نیاز به مشتق‌گیری مستقیما با خود تابع کار کند؛ مانند الگوریتم‌های ژنتیکی، بسیار مفید و کارا خواهد بود.

طراحی یک شبکه ژئودتیک را با فرض معلوم بودن معیار و پارامترهای مجهول می‌توان به صورت یک مسالهٔ بهینه‌سازی ترکیبی[۲۶] درنظر گرفت که هدف در آن، کمینه کردن تابع مطلوبیتی است که تعدادی از متغیرهای مجهول آن اعدادی حقیقی و تعدادی اعدادی صحیح با محدودهٔ مشخص است. در اینجا متغیرهای حقیقی، مختصات نقاط شبکه و متغیرهای صحیح، تعداد تکرار مشاهدات است که مبین وزن مشاهدات می‌باشد.

تعداد نقاط شبکه n فرض شده است که n_1 عدد از آنها نقاط ثابت است. هدف از طراحی شبکه، اندازه گیری موقعیت این نقاط یا تابعی از آنها است. برای n_2 عدد از نقاط نیز امکان تغییر مکان وجود دارد که تنها برای انجام مشاهدات به منظور ایجاد شبکه طراحی می‌شود به طوری که $n=n_1+n_2$ ، لذا تنها مختصات این نقاط در کروموزوم قرار داده شده است. مقادیر این مختصات در محدودهٔ نسبتا وسیعی، که طراح در ابتدا مشخص می‌کند، قرار دارد. نحوهٔ معرفی محدودهٔ تعریف هر نقطه، ابزاری برای دخالت طراح به منظور انجام طراحی بسیار تقریبی اولیه می‌دهد که هر چه معین‌تر باشد همگرایی الگوریتم بیشتر و دستیابی به پاسخ نهایی ساده‌تر است.

در تحقیق صورت گرفته برای سادگی کار فرض شده است که مشاهدات صرفا از نوع فاصله است. بر همین اساس، کدبندی مساله و ساخت کروموزوم‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. برای سادگی کار ابتدا کلیهٔ فواصل قابل مشاهده در شبکه به تعداد $m=n.(n-1)/2$ در یک جدول فهرست می‌شود. برای هر یک از این فواصل یک متغیر صحیح r_i که نشانگر تعداد تکرار آن مشاهدهٔ خاص است در کروموزوم وجود دارد. اگر بواسطه عدم دید، امکان مشاهده وجود نداشته باشد، مقدار آن ۱- و درصورتی که آن مشاهده در طراحی به کارگرفته نشود، مقدار، صفر خواهد بود. حداکثر تعداد تکرار مشاهده را نیز طراح مشخص می‌کند. به این ترتیب، با فرض معلوم بودن دقت طولیاب σ_D^2 ، محاسبه وزن مشاهدات از رابطه (۲) میسر خواهد شد.

$$w_i = \frac{r_i}{\sigma_D^2} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

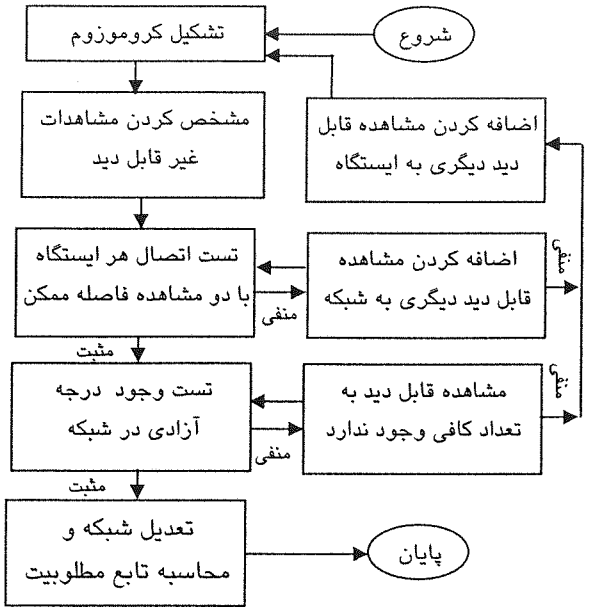


شکل (۶): کدبندی یک کروموزوم حاوی پارامترهای مجهول شبکه ژئودتیک متناظر

از آنجا که کدبندی فوق حاوی اعداد صحیح و حقیقی است با فرض معلوم بودن تعداد اعشار مورد نیاز برای اعداد حقیقی؛ یعنی مختصات نقاط، می‌توان به وسیلهٔ یک انتقال دوطرفه، کلیه اعداد را به اعداد باینری تبدیل و سپس اپراتورهای الگوریتم ژنتیک را به آنها اعمال کرد و مجددا رشته باینری را به وضعیت اولیهٔ فوق درآورد. با این کار، اولا یک نوع گسسته-سازی در فضای جست و جوی پارامترهای فوق صورت می-گیرد که پیچیدگی مساله را کمتر و امکان کار با متغیرهای حقیقی و صحیح را فراهم می‌کند. نکتهٔ دیگری که حائز اهمیت است ثابت ماندن طول کروموزوم‌ها است که به نوعی برای شبکه‌های بزرگ با ایستگاه‌های فراوان یک ضعف به حساب می‌آید؛ زیرا این طول بواسطه کد کردن تمامی مشاهدات فاصله، متناسب با مربع تعداد کل نقاط، افزایش می‌یابد.

بعد از تعیین کروموزوم‌ها در هر نسل، نوبت به محاسبه تابع مطلوبیت Fitness می‌رسد. از آنجاکه این مقدار باید پس از تعدیل شبکه متناظر با هر کروموزوم صورت بگیرد، موقعیت نقاط و تعداد مشاهدات باید به نحوی باشد که اولا، مشاهدات از لحاظ دید نقاط به هم قابل انجام بوده و ثانیا، مشاهدات ممکن به شکلی باشد که موجب نقصان در تعدیل شبکه نشود. بنابراین، ابتدا در هر حالت، کلیهٔ فواصل از لحاظ قابلیت دید تست شده و کد r_i=-1 برای فواصل با عدم امکان دید تنظیم می‌شود. برای تعیین نحوهٔ دید با معلوم بودن محل نقاط و مدل رقومی زمین میتوان پروفیل امتداد دید را از آن استخراج کرد و با معلوم بودن حداکثر ارتفاع دوربین، امتداد دید را با پروفیل فوق مقایسه کرد و تست فوق را انجام داد. سپس برای وضعیت موجود تست می‌شود که آیا شبکهٔ حاضر با مشاهدات باقیمانده قابل تشکیل است. برای این منظور دو تست صورت می‌گیرد: آیا هر ایستگاه حداقل با دو مشاهده فاصله درگیر می‌باشد؟ آیا درجه آزادی کل شبکه عددی مثبت است؟ جزئیات بیشتر در شکل (۷) آمده است.

در این تحقیق محاسبه تابع مطلوبیت بر اساس معیارهای مختلفی صورت گرفته است. معیار دقت بر اساس برآوردی از دقت نقاط ثابت مانند $Trace(C_x)$، معیار قابلیت اعتماد برابر حداقل عدد آزادی شبکه و معیار هزینه از طریق مجموع تعداد تکرار مشاهدات در نظر گرفته شده است.



شکل (۷) : اصلاح کروموزوم قبل از محاسبه تابع مطلوبیت

حالت ترکیبی نیز با فرض اعمال وزن مناسب به هر یک از معیارهای فوق تست شده است که البته تنظیم این وزن‌ها امری حساس بوده و بسته به اهمیت آنها به وسیلهٔ طراح مشخص می‌شود.

طراح باید پارامترهای دو عملگر جهش و لقاح شامل نرخ لقاح، تعداد برش‌های لقاح، احتمال اعمال جهش، حداکثر و حداقل نرخ جهش برای تنظیم جهش را معرفی کند. برای اعمال عملگر جهش ابتدا کروزوم‌ها به صورت باینری در می‌آید؛ اما اعمال عملگر لقاح مستقیما روی کروموزوم‌های اولیه صورت می‌گیرد؛ زیرا مفهوم لقاح، تبادل متغیرهای کروموزوم‌ها به هم است و محل برش باید طوری باشد که باعث تخریب مقادیر آنها نشود. در غیر این صورت، کروموزوم‌های نامناسبی پدید می‌آید که باعث جست و جوی ناکارامد در فضای جست و جو می‌شود. علاوه بر پارامتر فوق، پارامترهای دیگری مانند جمعیت هر نسل، نوع اپراتور انتخاب و میزان احتمال بقای کروموزوم‌های نسل قبل در نسل جدید نیز وجود دارد.

مساله مهم دیگر؛ که در اینجا لازم به ذکر است نحوهٔ تنظیم عملگر جهش در طول نسل‌ها است. از آنجا که موفقیت الگوریتم‌های ژنتیکی در همگرایی و یافتن بهینه سراسری، حساسیت زیادی به تنظیم این پارامتر دارد روش سادهٔ زیر به کار گرفته شد که از موفقیت خوبی برخوردار بود. از آنجاکه مقدار متوسط انحراف معیارهای مقادیر مجهولات در هر نسل نشان دهندهٔ میزان پراکندگی نقاط جست و جو در فضای پارامترها است، با تکامل نسل‌ها به علت اعمال عملگر لقاح کروموزوم‌ها شباهت بیشتری پیدا می‌کند که موجب کم شدن مقدار این پارامتر می‌شود. از حد معینی به بعد، باید نرخ جهش

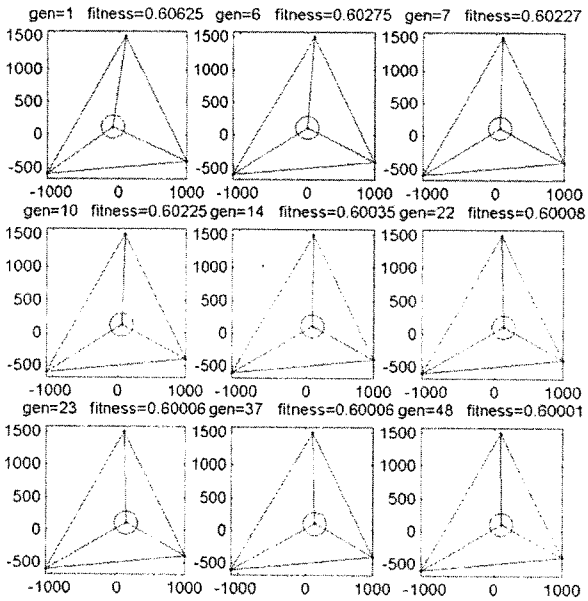
را بالا برد تا تنوع در نسل افزایش یابد و از بهینه موضعی اجتناب شود. از سوی دیگر افزایش این پارامتر مبین پراکندگی بالای نقاط بوده و امکان تکامل و همگرایی را سلب و تولید نقاط صرفاً" حالت تصادفی پیدا می‌کند. در این حالت، باید نرخ جهش را کاهش داد. در تحقیق صورت گرفته حداقل مقدار پارامتر فوق صفر و حداکثر مقدار، مقدار آن در اولین نسل بواسطه حداکثر تنوع، درنظر گرفته شده است. مقدار تغییر پارامتر فوق بین ۰/۸ تا ۰/۲ حداکثر مقدار کنترل می‌شود (شکل ۱۳).

٤- ارزیابی کارایی روش ارائه شده

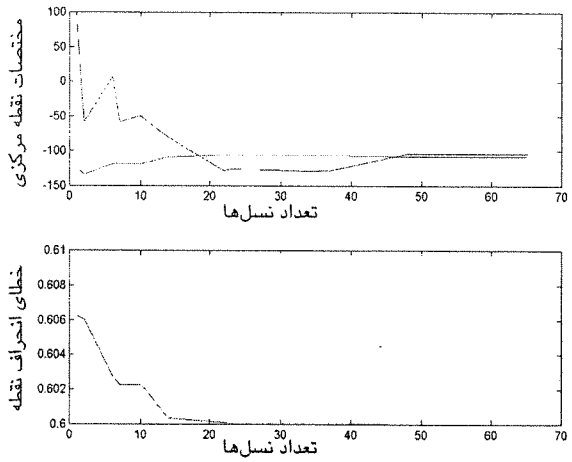
به منظور برآوردی از کارایی اجرایی روش پیشنهادی؛ دو مرحله تست صورت گرفت: در مرحله اول سعی شد نتیجهٔ طراحی با مثال‌های مشخص شبیه‌سازی‌شده، به شکل ساده‌ای بدون درنظرگرفتن قید قابلیت دید مقایسه شود تا میزان صحت کلی روش و وجود احتمالی ضعف‌های آن تست شود. در تست مرحله دوم یک شبکه طراحی شده به وسیله فرد خبره با شبکهٔ حاصل از روش پیشنهادی مقایسه شد.

٤-١- تست با داده‌های شبیه‌سازی شده

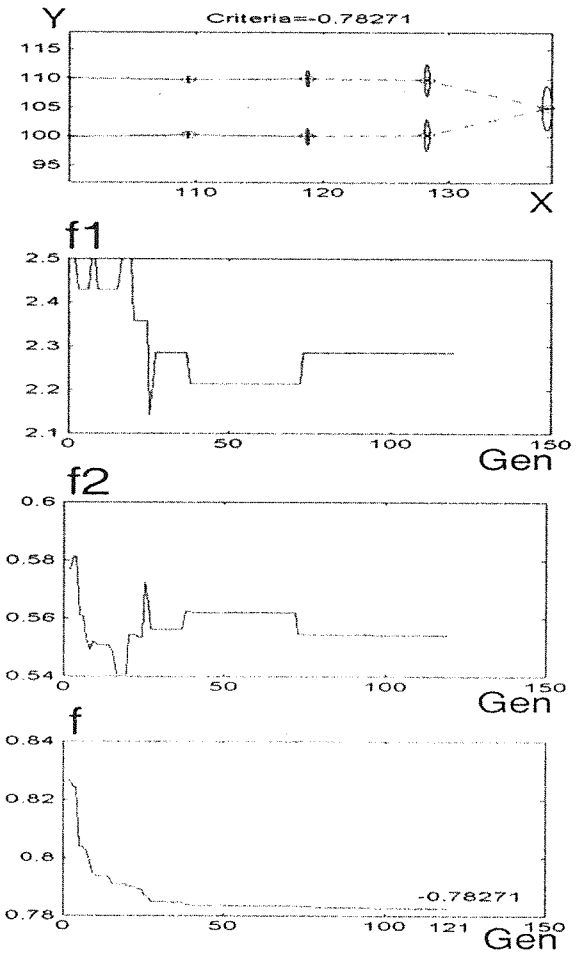
از آنجا که طراحی شبکه ژنودتیک با دو مقوله اصلی ماتریس طرح و ماتریس وزن در ارتباط است تست‌های این مرحله با فرض ثابت بودن یکی و تغییر دیگری طراحی شده است.



شکل (۸): همگرایی با گذر از نسل‌های متوالی. در نسل آخر نقطه مرکزی در موقعیتی با زوایای مرکزی ۱۲۰ درجه است.



شکل(۹) : بالا، همگرایی مختصات نقطه مرکزی و پایین، کمینه شدن خطای تعیین موقعیت نقطه مرکزی



شکل (۱۰): بالا به پایین: شکل شبکه نهایی طراحی شده که در آن نقطه چین یک بار، خط نقطه دو بار، خط چین سه بار و خط ممتد چهار بار تکرار مشاهده طول است؛ تغییرات خطای نقطه آخر(f1) در نسل‌های متوالی؛ تغییرات متوسط تکرار مشاهدات (f2) در نسل‌های متوالی؛ تابع مطلوبیت f=f1+f2/10

در حالت اول، که وزن مشاهدات ثابت و یکسان و ماتریس وزن، یکه درنظرگرفته می‌شود، تنها شکل شبکه و انتخاب زیرمجموعه‌ای از مشاهدات، موضوع طراحی است. با فرض این که مشاهدات صرفاً از نوع فاصله است شبکهٔ مثلثی شکل با چهار نقطه به وسیلهٔ برنامه طراحی شد (شکل ۸). هدف از ایجاد این شبکه، تعیین مکان بهینه برای نقطه مرکزی با بیشترین دقت است. می‌دانیم حالت بهینه برای نقطه مرکزی جایی است که زوایا به ایستگاه‌های جانبی، ۱۲۰ درجه باشد. همان طور که از شکل (۹) مشخص است با گذر از نسلهای متوالی به حالت بهینه نزدیک و نزدیک‌تر می‌شویم. در نسل ٤٨ ام اختلاف مختصات شبکهٔ طراحی شده با شبکهٔ بهینه قابل صرف نظر است.

در حالت دوم، شکل شبکه، ثابت در نظر گرفته و وزن مشاهدات طوری تغییر داده می‌شود که نتیجهٔ طراحی، حالت بهینه شود. برای این منظور، پیمایش باز در شکل (۱۰) را در نظر بگیرید. بر اساس مفاهیم انتشار خطا، طراحی باید به گونه‌ای باشد که در طول‌های اولیه، دقت مشاهدات بالاتر و هر چه از مبدا دورتر می‌شویم دقت طول‌ها کاهش یابد تا با حفظ دقت، هزینه کمینه شود. اجرای برنامه در این حالت بخوبی نشان دهندهٔ صحت عملکردِ روش پیشنهادی است.

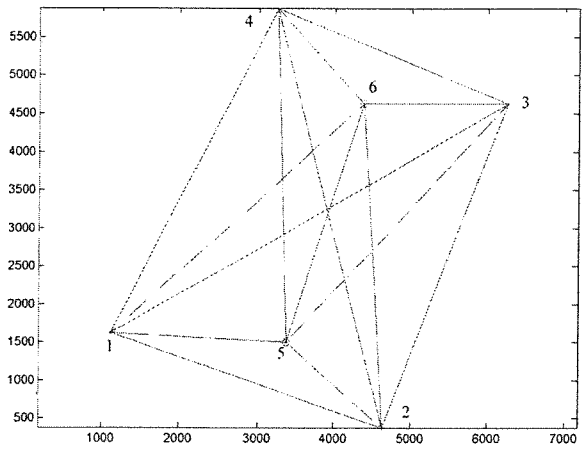
٤-۲- تست با شبکه واقعی

شبکه ژئودتیکی مطابق شکل (۱۱) با مختصات اولیه مندرج در جدول (۲) را درنظر بگیرید که در آن فرض می‌شود تمامی مشاهدات از نوع طول است. هدف از طراحی شبکه، اندازه گیری نقاط ٥ و ٦ با دقت یک میلی‌متر است. برای این منظور باید شکل شبکه (FOD) و وزن مشاهدات (SOD) تعیین شود. طول اضلاع این شبکه از ۱،۷ تا ٥،٦ کیلومتر متغیر است که بایستی با طول‌یابی به دقت $Var=(1mm)^2+(1ppm\ D)^2$ در حداکثر ١٦ تکرار مشاهده شود. به این ترتیب، در طراحی شبکه با توجه به این که موقعیت نقاط ٥ و ٦ ثابت و معلوم است، موقعیت نقاط ۱ تا ٤ و تعداد تکرار هر مشاهده فاصله باید طوری تعیین شود که با حداقل هزینه، حداکثر خطای مختصات روی نقاط ۱ و ۲ از مقدار یک میلی‌متر تجاوز نکند. برای این منظور، چهار حالت مختلف را درنظر می‌گیریم:

- تعیین وزن مشاهدات به تنهایی
- تعیین وزن مشاهدات و شکل شبکه با فرض ۱٪ جابه‌جایی (٤٠ متر) در نقاط ۱ تا ٤
- تعیین وزن مشاهدات و شکل شبکه با فرض ٥٪ جابه‌جایی (۲۰۰ متر) در نقاط ۱ تا ٤
- تعیین وزن مشاهدات و شکل شبکه با فرض ٥٪ جابه‌جایی در نقاط ۱ تا ٤ با حداقل هزینه (کمترین تعداد تکرار مشاهدات)

جدول ۲ : مختصات اولیهٔ شبکه برای طراحی

نقطه	X(m)	Y(m)
۱	۱۱۲٥،۰۰	۱۶۲٥،۰۰
۲	۴۶۲٥،۰۰	۳۷٥،۰۰
۳	۶۲٥۰،۰۰	۴۶۲٥،۰۰
۴	۳۲٥۰،۰۰	۵۸۷٥،۰۰
٥	۳۳۷٥،۰۰	۱٥۰۰،۰۰
۶	۴۳۷٥،۰۰	۴۶۲٥،۰۰



شکل (۱۱): شکل اولیهٔ شبکهٔ ژئودتیک که هدف، تعیین مختصات نقاط مرکزی ٥ و ۶ است

در تست اول، تنها مسالهٔ SOD برای یک شبکه با شکل معین حل می‌شود، اما در تست‌های بعدی علاوه بر SOD به حل همزمان FOD هم اقدام می‌شود. تکنیک به کارگرفته شده در روش‌های معمول، ثابت در نظرگرفتن متناوب یکی و حل دیگری بوده است که با چندین تکرار و نظارت طراح به نتیجه مطلوب می‌رسد. البته، روش تحلیلی برای حل همزمان دو مسالهٔ فوق به وسیلهٔ Kuang Shan-Long بر اساس روش کمترین مربعات نیز ارائه شده است که به تعیین مقادیر اولیه نیاز دارد، اما در اینجا با به کارگیری الگوریتم ژنتیک، این امر همزمان و اتوماتیک بدون نیاز به مقادیر اولیه و به صورت بهینه سراسری نه محلی حل می‌شود که قابلیتی درخور توجه نسبت به روش‌های قبلی دارد. در تست آخر علاوه بر معیار حداقل کردن خطای مختصات نقاط ٥ و ٦ به حداقل‌سازی همزمان تعداد تکرار مشاهدات (هزینه حداقل) نیز اقدام می‌شود.

نتایج چهار تست فوق برای طراحی شبکه به روش الگوریتم ژنتیک روی شبکهٔ تقریبی شکل (۱۱)، در جداول (۳) و (۴) آمده است. جدول (۳) حل مساله FOD یا میزان جابجایی ایستگاه‌های ۱ تا ٤ را برای هر تست نشان می‌دهد. ردیف آخر جدول (۴)

نشان می‌دهد که هر چهار تست، معیار دقت نقاط ۵ و ٦ شبکه را ارضاء کرده است. با نگاه به تست‌های اول تا چهارم دیده می‌شود که بتدریج کیفیت طراحی شبکه بهتر شده است.

جدول (۳): مقایسهٔ تغییر مختصات نقاط شبکه نسبت به حالت اولیه در سه تست آخر (مسالهٔ FOD)

نقطه		۱	۲	۳	۴
حداکثر جابجایی	Dx(m)	± ۵۰،۰۰	± ۲۰۰،۰۰	± ۲۰۰،۰۰	± ۲۰۰،۰۰
	Dy(m)	± ۵۰،۰۰	± ۲۰۰،۰۰	± ۲۰۰،۰۰	± ۲۰۰،۰۰
جابجایی‌های طراحی شده توسط الگوریتم ژنتیک (تعداد تکرار ۲۰۰ بار)	Dx(m) II	-۴۷.۸۰	۴۵.۵۳	-۴۹.۶۲	-۳۰.۱۴
	Dy(m) II	۴۹.۶۶	۴۷.۸۰	-۴۴.۷۹	-۴۹.۰۹
	Dx(m) III	-۱۹۹.۱۱	۱۶۶.۸۳	-۱۹۰.۱۶	-۱۹۰.۰۰
	Dy(m) III	۱۹۸.۰۲	۱۹۶.۸۷	-۱۹۲.۲۵	-۱۹۹.۹۷
	Dx(m) IV	-۱۸۷.۳۱	۱۹۱.۴۱	-۱۸۶.۰۵	-۱۸۴.۹۸
	Dy(m) IV	۱۹۸.۹۷	۱۹۵.۶۲	-۱۷۵.۳۷	-۱۹۷.۷۴

جدول (۴): مقایسه وزن‌های طراحی شده در چهار تست

فاصله	وزن (۱)	وزن (۲)	وزن (۳)	وزن (۴)	وزن حداقل تا حداکثر
۱-۲	۱۳۵۹۸۹۴	۱۳۵۹۸۹۴	۱۰۱۹۹۲۰	۸۴۹۹۳۴	۸۴۹۹۳۴ - ۱۳۵۹۸۹۴
۱-۳	۲۶۳۲۳۷۰	۲۳۷۷۰۳۷	۱۱۲۶۳۶۳	۴۲۵۸۰۷	۱۶۴۵۲۳۱ - ۲۶۳۲۳۷۰
۱-۴	۴۱۷۹۵۸۹	۱۰۴۲۰۰۸	۷۷۵۴۲۹	۵۰۷۴۳۱	۲۶۱۲۲۴۳ - ۴۱۷۹۵۸۹
۱-۵	۸۴۰۷۲۶	۸۶۶۲۴۷	۸۹۲۲۶۰	۶۴۹۷۰۵	۵۲۵۴۵۴ - ۸۴۰۷۲۶
۱-۶	۷۹۳۷۹۹	۸۱۰۶۳۷	۸۶۳۴۶۰	۸۶۲۷۳۷	۴۹۶۱۲۵ - ۷۹۳۷۹۹
۲-۳	۷۷۸۱۱۵	۷۷۷۴۵۶	۷۷۱۱۷۸	۷۷۴۴۱۲	۴۸۶۳۲۲ - ۷۷۸۱۱۵
۲-۴	۸۳۶۶۰۵	۸۵۳۵۲۵	۹۰۹۰۰۷	۹۰۷۳۹۷	۵۲۲۸۷۸ - ۸۳۶۶۰۵
۲-۵	۳۵۴۳۲۸۲	۳۶۹۱۷۲۹	۴۱۲۸۳۴۶	۴۱۲۰۱۸۹	۲۲۱۴۵۵۱ - ۳۵۴۳۲۸۲
۲-۶	۴۱۷۹۵۷۶	۴۲۳۶۶۹۷	۳۳۹۲۶۸۰	۲۸۷۷۰۹۲	۲۶۱۲۲۳۵ - ۴۱۷۹۵۷۶
۳-۴	۵۴۰۰۷۹	۲۵۸۴۱۳	۱۱۴۲۱۵	۱۱۲۵۳۷	۶۷۵۰۹۹ - ۱۰۸۰۱۵۹
۳-۵	۴۴۱۱۹۰	۴۴۸۳۱۶	۴۶۸۲۷۳	۴۶۸۲۱۱	۲۷۵۷۴۴ - ۴۴۱۱۹۰
۳-۶	۶۷۸۵۹۸	۷۰۱۰۲۲	۷۸۴۶۰۵	۷۸۵۳۳۸	۴۲۴۱۲۴ - ۶۷۸۵۹۸
۴-۵	۷۳۷۲۲۷	۷۷۵۷۷۶	۹۱۳۵۴۳	۹۰۸۹۳۲	۴۶۰۷۶۷ - ۷۳۷۲۲۷
۴-۶	۴۸۲۷۹۲	۴۹۵۳۸۷	۵۳۲۵۹۷	۵۳۰۷۶۴	۳۰۱۷۴۵ - ۴۸۲۷۹۲
۵-۶	۱۳۸۳۷۸۴	۱۳۹۹۱۸۴	۱۲۱۲۹۳۲	۳۴۷۸۰۵	۸۶۴۸۶۵ - ۱۳۸۳۷۸۴
×	۲۳۴۰۷۶۲۶	۲۰۰۹۳۳۲۸	۱۷۹۰۴۹۰۸	۱۵۱۲۹۲۹۱	۱۴۹۶۷۲۱۷ - ۲۳۹۴۷۷۰۶
××	۲۳۲	۲۱۵	۱۹۵	۱۷۱	۱۵ - ۲۴۰
×××	۰،۰۰۰۱۱۸	۰،۰۰۰۱۱۴	۰،۰۰۰۱۰۵	۰،۰۰۰۱۰۶	۰،۰۰۰۴۷۳ - ۰،۰۰۰۱۱۸

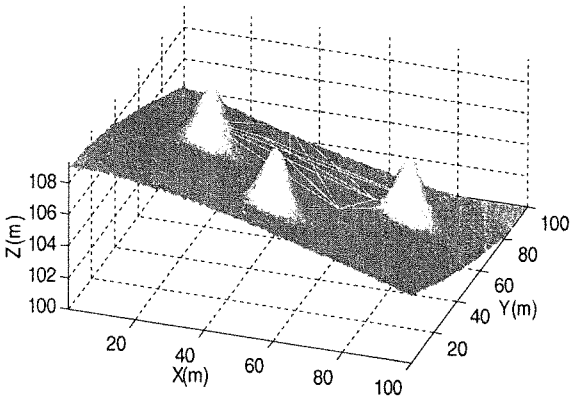
× مجموع وزن‌ها

×× مجموع تکرار مشاهدات

××× حداکثر خطای نقاط ۵ و ۶ (m)

همان طور که در ردیف × جدول (٤) ملاحظه می‌شود مجموع وزن‌ها در تست اول ۱٦٪ بزرگ‌تر از تست دوم، ۳۱٪ بزرگ‌تر از تست سوم و ۵۵٪ بزرگ‌تر از تست چهارم است. بنابراین، اعمال یک جابه‌جایی نسبتاً کوچک در نقاط شبکه، تاثیر بامعنایی در طراحی بهینهٔ شبکه دارد. این مساله در طراحی شبکه اهمیت زیادی دارد و نبایستی نادیده انگاشته شود.

همچنین در جدول (۴) مشاهده می‌شود که با اعمال قید حداقل تکرار مشاهدات در تست چهارم، معیار هزینه (حداقل وزن در ردیف ×) بسیار کمتری را نسبت به سه تست دیگر به دست خواهد داد. بنابراین، شبکه‌های زیادی وجود دارد که قید حداکثر خطای یک میلی‌متر را برآورده کند، اما از میان آنها با اعمال قید فوق، کم هزینه‌ترین شبکه طراحی خواهد شد (تعداد ۱۷۱ تکرار مشاهده در تست چهارم به جای ۲۳۲ تکرار مشاهده در تست اول). علت این کاهش هزینه را می‌توان در طراحی همزمان SOD و FOD؛ که به طراحی بهینه‌تر منجر می‌شود، قابلیت جابه‌جایی نسبتاً بالای ۲۰۰ متر برای نقاط و مهم‌تر از همه اعمال قید حداقل شدن تعداد تکرار مشاهدات دانست.



شکل (۱۲): درنظرگرفتن قید قابلیت دید هنگام طراحی شبکهٔ ژئودتیک

۵- نتیجه گیری و پیشنهاد

با استفاده از تست‌های فوق به نتایج زیر می‌توان رسید:

اگر در طراحی بهینهٔ شبکه با دو مسالهٔ FOD و SOD روبه‌رو باشیم روشی که بتواند این دو مساله را همزمان حل کند، نتایج واقعی‌تر و سریع‌تری را نسبت به حل جدای هر مساله به روش تکرار و سعی و خطا خواهد داشت. روش الگوریتم ژنتیک علاوه بر حل همزمان FOD و SOD به بهینه سازی همزمان چندین معیار باهم نیز می‌پردازد.

در روش الگوریتم ژنتیک، برخلاف روش‌های قبل، برای حل همزمان FOD و SOD به شکل تقریبی شبکه و شرط تغییرات کوچک در شکل شبکه نیازی نیست. به عبارت دیگر، نقاط ۱ تا ٤ را می‌توان در یک محدودهٔ بسیار گسترده‌تر طراحی کرد.

اعمال قیود پیچیده؛ مانند قید قابلیت دید نقاط به هم به علت

توپوگرافی سطح زمین در روش الگوریتم ژنتیک امکان‌پذیر است درصورتی که تا کنون روشی برای حل مساله با پیچیدگی فوق ارائه نشده است.

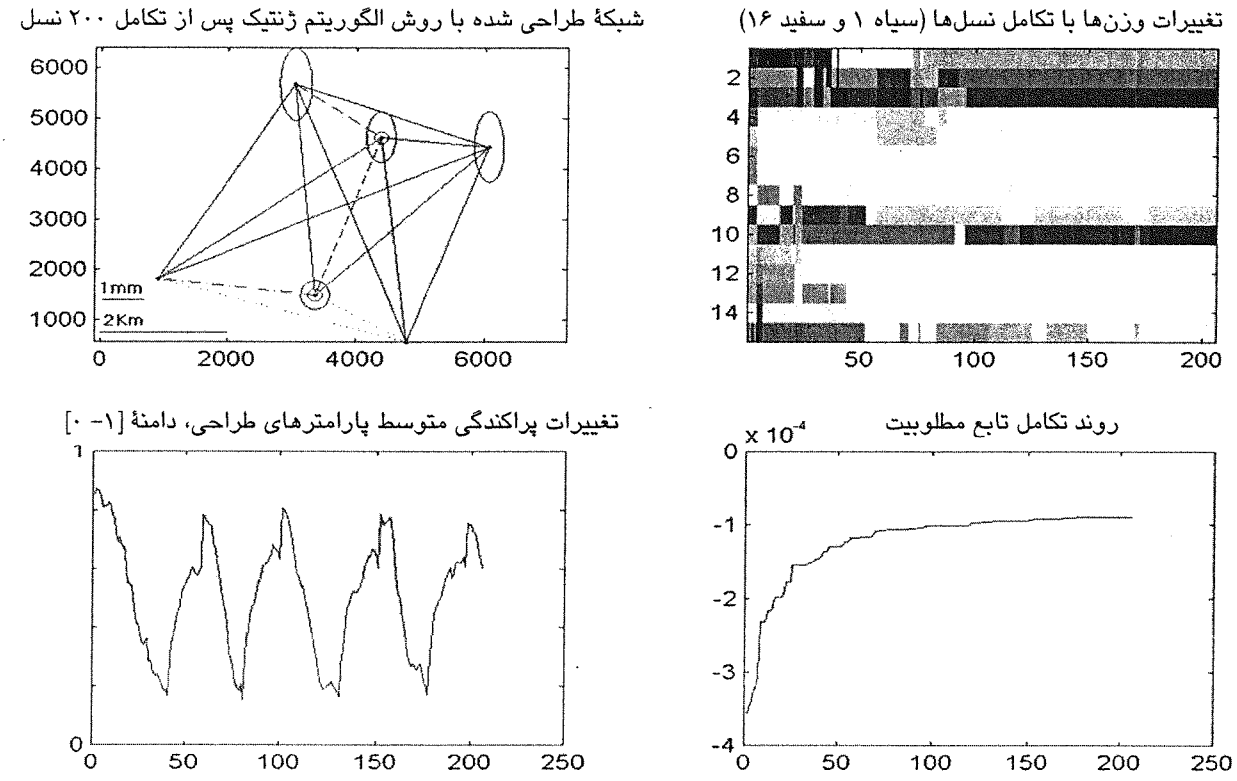
از آنجاکه تغییری کوچک در هندسهٔ شبکه (FOD) باعث استحکام هندسی شبکه می‌شود، برای بهینه‌سازی شبکه توصیه می‌شود صرفا به افزایش وزن مشاهدات (SOD) اقدام نشود چراکه عملیات زمینی افزایش یافته و شبکه حاصل پرهزینه می‌شود. در مثال فوق، از مقایسه تست سوم و اول دیده می‌شود که تنها جابه‌جایی نسبی ۵٪ در نقاط شبکه (جابه‌جایی ۲۰۰ متر نسبت به فاصله متوسط ۳/۸ کیلومتری اضلاع شبکه) به کاهش ۳۱٪ کل وزن‌ها منجر می‌شود.

جهت تحقیقات آتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

تست‌های کامل‌تری روی شبکه‌های سه بعدی دارای انواع مشاهدات شامل طول، زاویه و آزیموت، GPS [۲۷] به همراه قیود دیگر به وسیلهٔ تکنیک پیشنهادی صورت گیرد.

ازآنجاکه طول کروموزوم با افزایش تعداد نقاط به صورت توانی افزایش می‌یابد و این از کارایی برنامه به شدت می‌کاهد، پیشنهاد می‌شود از روش‌های با طول کروزوم متغیر؛ مانند GP [۲۸] استفاده شود تا تنها مشاهدات موثرتر در کروموزوم وارد شده و طول آن کاهش یابد.

باتوجه به این که مسالهٔ طراحی شبکه، یک مسالهٔ بهینه‌سازی با معیارهای متعدد دقت، هزینه، حساسیت و استحکام هندسی است، به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی چندمعیاری تکاملی [۲۹] برای طراحی شبکه‌های ژئودتیک پیشنهاد می‌شود.



شکل (۱۳): نحوهٔ حل مساله به روش الگوریتم ژنتیک

۶- مراجع

[۱] Amiri Seemkooei, A. *Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks*, Journal of Geodesy, 75(4), 227-233,2000.

[۲] Gerasimenko, M. D. *First order design of the deformation networks with the minimal number of geodetic points and their optimal allocation*, FarEastern Mathematical Reports, 4, 86–94, 1997.

[۳] Grafarend, E. W. *Optimization of geodetic networks*, Bolletino di Geodesia a Science Affini, 33(4), 351–406, 1974.

[٤] Grafarend E.W. and F. Sansò. *Optimization and Design of Geodetic Networks*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1985.

[٥] Johnson, H. O. and F. K.Wyatt. *Geodetic network design for fault-mechanics studies*, Manuscripta Geodaetica, 19, 309–323, 1994.

[٦] Kuang, S. L., *Optimization and Design of Deformation Monitoring Scheme*, Ph.D. dissertation, Dept. of Surveying Engineering Technical Report No. 157, Univ. of New Brunswick, 179 pp., Fredericton, Canada, 1991.

[٧] Kuang S., *Geodetic Network Analysis and Optimal Design*. Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, 1996.

[٨] Schön, S. and Kutterer H., *Interval-based description of measurement uncertainties and network optimization*. In: Proceedings of the First International Symposium on Robust Statistics and Fuzzy Techniques in Geodesy and GIS. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry - Report No. 295, 41-46, 2001.

[۹] Beyer, H.-G.; Deb, K., *On self-adaptive features in real-parameter evolutionary algorithms*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation,5(3), 250 -270, 2001.

[۱۰] Eiben, A.E.; Hinterding, R.; Michalewicz, Z., *Parameter control in evolutionary algorithms*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 3(2), 124 -141, 1999.

[۱۱] Herrera, F.; Lozano, M., *Adaptive genetic operators based on coevolution with fuzzy behaviors*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 5(2), 149 -165, 2001.

[۱۲] Paredis, J., *The symbiotic evolution of solutions and their representations*, in Proc. 6th Int. Conf. Genetic Algorithms, L. Eshelman, Ed. SanMateo, CA: Morgan Kaufmann, pp. 359–365, 1995.

[۱۳] Back, T.; Hammel, U.; Schwefel, H.-P., *Evolutionary computation: comments on the history and current state*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1(1), 3-17, 1997.

[۱۴] Salomon, R., *Evolutionary algorithms and gradient search: similarities and differences*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2(2), 45 -55, 1998.

[۱۵] Goldberg D.E., *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Published by Addison Wesley, 1989.

زیرنویس ها

[1] NP-Hard Problems
[2] Evolutionary Algorithms
[3] Pre-analysis
[4] Deterministic Search
[5] Global Optimum
[6] Local Optimum
[7] Heuristic or Non-deterministic Search
[8] Fitness or Objective Function
[9] Self-adaptation
[10] Genetic Algorithm
[11] Simulated Annealing
[12] Selection or Reproduction
[13] Recombination
[14] Mutation
[15] Building Block Hypothesis
[16] Crossover
[17] Fitness Proportionate Selection
[18] Scaling
[19] Selection Pressure
[20] Tournament Selection
[21] Rank-Based Selection
[22] Parameter Tuning or Adaptation
[23] Fuzzy Inference Systems
[24] Co-evolution
[25] Elitism
[26] Combinatorial Optimization
[27] Global Positioning System
[28] Genetic Programming
[29] Evolutionary Multi-objective Optimization