مسیریابی چند هدفه خطوط انتقال نیرو بر مبنای معیارهای زیست‌محیطی، دسترسی و اقتصادی مطالعه موردی: شهرستان ساری

نازیلا محمدی [1] مهدی چابک[2]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۷/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۴/۰۴

****

چکیده

در مسأله مسیریابی خطوط انتقال نیرو عوامل فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی متعددی دخیل هستند تا بتوان مسیر بهینه‌ای را برای انتقال انرژی طراحی نمود. عوامل مذکور گاهی تأثیر هم‌راستا و فزاینده داشته و در مواردی دارای تأثیر غیر هم‌راستا و حتی خلاف جهت هستند. مسیر خط انتقال نیرو، افزون بر اینکه بر روی هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و نگهداری آن تأثیر می‌گذارد، در میزان تأثیرات منفی آن بر روی محیط زیست نیز نقش دارد. بنابراین تعیین مسیر مناسب برای خطوط انتقال نیرو که متناسب با نیازها و اهداف پروژه بوده و نقش عوامل تأثیرگذار را به درستی در نظر گیرد، بسیار مهم است.

در این تحقیق عوامل و معیارهای تأثیرگذار در مسیریابی خطوط انتقال نیرو در قالب سه هدف اقتصادی، دسترسی و نگهداری خطوط انتقال و تأثیرات سوء زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور وزن‌دهی به عوامل و نیز ترکیب آنها، با توجه به ویژگی‌های هر عامل، از روش‌های FAHP و ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) استفاده شده است. در نهایت برای تعیین مسیر مناسب با توجه به چند هدفه بودن مسأله، از الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب۲- (NSGA-II) که از محبوب‌ترین و کارآمدترین روش‌های تکاملی می‌باشد، به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تکاملی بهره گرفته شده است.

مدل مذکور برای مسیریابی خطوط انتقال ۶۳ کیلوولت بین دو پست برق شهید سلمانی و کیاسر در شهرستان ساری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج ارزیابی توانایی روش پیشنهادی در بهینه‌سازی توابع هدف با بهبود میانگین ٤٤ درصدی مقادیر توابع هدف و کاهش حدود ٦ کیلومتر از طول مسیر در مقایسه با مسیر موجود را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی، خط انتقال برق، FAHP ، NSGA-II، ساری

****

۱- استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز(نویسنده مسئول) nazila.mohamadi@gmail.com

۲- کارشناس ارشد GIS، دانشگاه آزاد chabok69@gmail.com

۱- مقدمه

رشد روزافزون شهرها، مراکز صنعتی، کشاورزی، تجاری، خدماتی و غیره نیاز به انرژی برق را افزایش داده تا حدی که میزان رشد تقاضای سالیانه برق جهانی ۲/٤ درصد بوده و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ دو برابر شود *(Kishore & Singal, 2014:960)*.

احداث خطوط انتقال نیرو[1] (PTL) یکی از مهمترین فعالیت‌های صنعت برق هر کشور در زمینه توسعه شبکه انتقال نیرو است. با توجه به اینکه خطوط انتقال و توزیع نیرو وظیفه انتقال نیروی تولید شده در نیروگاه‌ها به ایستگاه‌های توزیع را داشته *(Gill, 2005: 24)*، و یا به نوعی رابط بین مراکز تولید و مصرف بوده و مستلزم سرمایه‌گذاری‌های سنگینی می‌باشند، از این‌رو تجزیه و تحلیل دقیق در مرحله برنامه‌ریزی انتقال به منظور تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری ضروری است *(singal, et al. 2016: 301)*. امروزه بدلیل وسعت بالای کشورها، دور بودن مراکز نیروگاهی از مناطق مصرف، هزینه هنگفت احداث خطوط انتقال، پراکندگی شهرها و روستاها، تأثیرات متقابل و گوناگون شرایط جوی و محیطی، امکانات و محدودیت‌های مسیر، بکارگیری و انتخاب معیارهای مناسب برای طراحی خطوط انتقال نیرو را ضروری ساخته است. این امر باعث گردیده روش‌های سنتی در مسیریابی خطوط انتقال نیرو جوابگوی نیازهای کارشناسان صنعت برق در این زمینه نباشد. مزیت اصلی پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر نه تنها باعث کاهش هزینه و ازدست دادن انرژی انتقال بوده، بلکه بطور قابل توجهی باعث کاهش از دست دادن قدرت انتقال می‌شود *(Umashankar, 2014: 66)*.

با توجه به مطالب مطرح شده، بررسی پارامترهای مؤثر در تعیین مناطق مناسب جهت مسیریابی و عبور خطوط انتقال دارای اهمیت بسزایی بوده و نیازمند بهره‌گیری از علوم و فناوری‌های مدرن می‌باشد. علی‌رغم توانمندی ویژه سیستم‌های اطلاعات مکانی در تحلیل مسائل مکانی، از آنجایی که این مسأله تحت تأثیر فاکتورهای متنوع و دربرگیرنده اهداف گوناگون و حتی متضادی بوده، مدل روش‌های تک‌هدفه نمی‌تواند پاسخگوی این نوع از مسائل باشند. به همین منظور در این پژوهش مسیریابی خطوط انتقال برق به صورت چندهدفه صورت گرفته است.

تحقیقات زیادی در زمینه مسیریابی خطوط انتقال نیرو انجام شده است. از میان تحقیقات انجام شده در این زمینه، تعداد محدودی از آنها بصورت چندهدفه و یا بصورت جامع به بررسی این مسأله پرداخته‌اند که در ادامه بصورت اجمالی بررسی می‌شوند.

Qiu و همکارانش (۲۰۰٤) مقاله‌ای باعنوان «طراحی خطوط انتقال نیرو» براساس GIS سه‌بعدی منتشر کردند. در این پژوهش آنها با بهره‌گیری از GA[2] و استفاده از داده‌های مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) و سایر اطلاعات مکانی، مسیریابی خطوط انتقال نیرو را انجام دادند. Monteiro و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از برنامه‌سازی پویا[3] (DP) روشی را برای تعیین مسیر خط نیرو ارائه کردند. آنها با در نظر گرفتن عوامل مختلف، تأثیرگذاری عوامل برای هر پیکسل را به‌صورت تجمعی با استفاده از ساختار رستری و آنالیزهای مکانی محاسبه کردند. Ahmadi و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از مدل همپوشانی شاخص[4]، و الگوریتم دایجسترا[5] و با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی و اجتماعی مسیریابی بهینه‌ای در ساختار رستری انجام دادند. Bagli و همکاران (۲۰۱۱) برای تعیین مسیر خطوط انتقال برق در شمال کشور ایتالیا، با در نظر گرفتن سه معیار سلامتی انسانی، چشم‌انداز و طبیعت و با هدف به حداقل رساندن تأثیرات سوء زیست‌محیطی از تلفیق آنالیز کم‌هزینه‌ترین مسیر با ارزیابی چندمعیاره استفاده کردند. Eroglu و Aydin (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های فرآیند سلسله مراتبی (AHP), FAHP اقدام به مسیریابی بهینه خطوط انتقال برق کردند. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم دایجسترا و با محاسبه فاصله (CD) کم‌هزینه‌ترین

[1]- Power Transmission Lines

[2]- Genetic Algorithm

[3]- Dynamic Programming

[4]- Index Overlay

[5]- Dijkstra's algorithm

مسیر بدست آمد. Beheshtifar و همکاران (۲۰۱۱) ، با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه و با استفاده از دو تابع هدف اقتصادی و کاهش تأثیرات منفی زیست‌محیطی اقدام به مسیریابی خط انتقال نیرو کردند. در این پژوهش، مسیرهای مختلف بدست آمده از لحاظ طول و میزان ارزش توابع هدف بایکدیگر مقایسه شده و به این نتیجه دست یافته‌اند که سیستم اطلاعات مکانی می‌تواند به گونه مناسبی با الگوریتم NSGA-II1 تلفیق شده و برای بهینه‌سازی مسیر مورد استفاده قرار گیرد. Rastegar و همکاران (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن سه تابع هدف کمترین هزینه اقتصادی، کمترین تأثیرات سوء زیست‌محیطی و اجتماعی اقدام به مسیریابی خطوط انتقال نیرو ٤۰۰ کیلوولت با استفاده از روش الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II کردند. نتایج این پژوهش نشان از توانایی بالای همگرایی مدل ارائه شده به جواب‌های بهینه با درصد بالایی از تکرارپذیری دارد. Mendes و همکاران (۲۰۱٦) با هدف بررسی کاربردهای سیستم اطلاعات مکانی برای مسیریابی خطوط انتقال برق، با استفاده از AHP به وزن‌دهی معیارها پرداختند. انتخاب معیارها براساس دو جنبه هزینه‌های ساختاری و فنی و هزینه‌های اضافی صورت پذیرفت. در این پژوهش دو مسیر محاسبه شده توسط الگوریتم دایجسترا با وزن‌دهی روش AHP و ارزش‌گذاری مالی با هم مقایسه شدند. نتیجه این پژوهش نشان می‌دهد که مسیر تولید شده با استفاده از روش AHP، طول و هزینه بیشتری از روش تولیدشده در مقادیر مالی را ارائه کرده است.

اکثر پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهند که در مسئله مسیریابی خطوط انتقال برق به سه عامل هزینه اقتصادی، تأثیرات سوء زیست‌محیطی- اجتماعی و دسترسی، نگهداری و تعمیرات خطوط انتقال و توزیع برق توجه شده است و هریک به نوعی سعی در حل این مشکلات داشته‌اند. در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از الگوریتم تکاملی جدید سه عامل مهم گفته شده با روشی جدید و به صورت مسئله چندهدفی حل شد. این روش برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین، علاوه بر یافتن مسیرهای بهینه، برج‌گذاری مسیر، جزییات هزینه‌ها، موقعیت برج‌ها و گزارش‌گیری از ریز اطلاعات انجام شد.

۲- روش تحقیق

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب-۲ (NSGA-II)، که جزء الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه[2](MOEA) که مبتنی بر الگوریتم ژنتیک می‌باشد، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای حل مسائل پیچیده تصمیم‌گیری چندهدفه در حوزه‌های مختلف محسوب می‌شود***(Deb, et al, 2002,57)***. با توجه به ماهیت پیچیده مسائل مربوط به مکان و اطلاعات مکانی، این الگوریتم در حل این نوع مسائل نیز بسیار مورد توجه بوده و مطالعات و تحقیقات انجام شده در این زمینه مؤید کارایی بالا و موفقیت آن است ***(Saadatseresht et al., 2009),(Cao et al., 2011), (Hu et al., 2014), (Shirzadi & Alimohammadi, 2016).***

الگوریتم NSGA یکی از اولین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه به شمار می‌رود که توسط Deb و Srinivas (۱۹۹٤) ارائه شد. کاربرد این الگوریتم به دلیل وجود برخی مسائل ازقبیل پیچیدگی محاسباتی، فقدان نخبه‌گرایی و عدم وجود رویکردی برای انتخاب مقدار بهینه پارامتر مشارکت، با محدودیت زیادی همراه بود. ورژن جدید الگوریتم NSGA با عنوان NSGA-II در سال ۲۰۰۲ توسط Deb و همکارانش (۲۰۰۲) توسعه داده شده که از مزایای این روش می‌توان به دقت و پراکندگی مناسب، وجود نخبه‌گرایی، عدم نیاز به جمعیت خارجی و سهولت نسبی پیاده‌سازی ***(Coello, et al, 2007)***. سرعت محاسباتی و الگوریتم رتبه‌بندی مناسب‌تر ***(Bui: 2008)*** اشاره کرد. همچنین این الگوریتم نیازی به تعیین پارمتر مشارکت ندارد ***(Deb & Srinivas ,1994)***.

در پژوهش حاضر با توجه به ماهیت چندهدفه مسأله مورد نظر و همچنین کارائی الگوریتم NSGA-II، از این روش برای تعیین بهترین مسیرهای خطوط انتقال نیرو از

[1]- Non-dominated Sorting Genetic Algorithms - II

[2]- Multi-Objective Evolutionary Algorithms

میان تعداد نامحدودی از مسیرهای موجود و بر مبنای یک سری توابع هدف کم و بیش ناسازگار در فضای جستجو، استفاده می‌شود.

مسیریابی و طراحی خطوط انتقال فرآیندی پیچیده، پرهزینه و زمانبر بوده، به‌طوری که بایستی عوامل تأثیرگذار مختلفی را همزمان و در حد قابل قبولی برآورده ساخت. به همین دلیل در این پژوهش سه تابع هدف هزینه اقتصادی (F1)، دسترسی و نگهداری خط انتقال (F2) و تأثیرات سوء زیست‌محیطی (F3) در ساختار الگوریتم NSGA-II درنظر گرفته شده است. جهت تهیه نقشه تابع هدف تأثیرات سوء زیست محیطی، معیارهایی نظیر شیب زمین، کاربری اراضی، زمین لغزش، خطوط گسل، جنس و فرسایش خاک و لایه‌های زمین‌شناسی و فاصله از رودخانه با استفاده از توابع عضویت فازی در محیط GIS آماده‌سازی گردید. این معیارها توسط روش AHP که یکی از تکنیک‌های کارآمد در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره می‌باشد وزن‌دهی شد. روش FAHP، امکان کمی کردن مقایسه معیارهای تصمیم‌گیری را به صورت دوتایی (زوجی) فراهم می‌کند و عدم اطمینان در رتبه‌بندی معیارها در سایر روش‌ها را از بین می‌برد و منطق فازی، زمینه را برای استدلال، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت فراهم می‌کند. پس از وزن‌دهی، این معیارها به روش ترکیب خطی وزن‌دار که یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در ترکیب داده‌ها می‌باشند، با یکدیگر تلفیق شدند تا نقشه نهایی تأثیرات سوء زیست-محیطی بین مقادیر صفر و یک برای هر پیکسل آماده گردد. فلوچارت روش انجام کار در نگاره ۱ ارائه شده است.

۳- معرفی توابع هدف و مدل‌سازی آنها

در این پژوهش سه تابع هدف مهم هزینه اقتصادی (F1)، دسترسی و نگهداری از خط انتقال (F2) و تأثیرات سوء زیست‌محیطی (F3) در ساختار الگوریتم NSGA-II جهت انجام مسیریابی خطوط انتقال نیرو درنظر گرفته شده است. جهت بهینه‌سازی هر یک از این توابع هدف نیاز به اطلاعات مکانی وسیعی بوده که می‌بایست در مرحله نخست شناسایی شوند. در ادامه به معرفی هریک از توابع هدف و معیارهای مرتبط با آنها می‌پردازیم.

۳-۱- تابع هدف اقتصادی

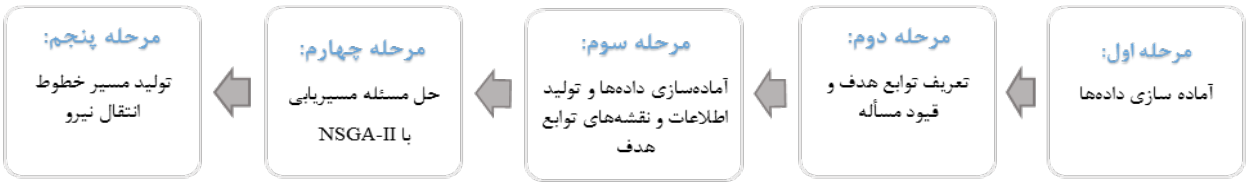
این تابع هدف جهت کمینه‌سازی کلیه هزینه‌های اقتصادی مربوط به مسیریابی خطوط انتقال نیرو می‌باشد. برای تعریف این تابع هدف لازم است به کلیه عواملی که در میزان هزینه اقتصادی مؤثرند، توجه شود. در جدول (۱)، فهرستی از عوامل اقتصادی مرتبط با خطوط انتقال نیرو براساس نظر کارشناسان و مهندسین فنی و استفاده از تعرفه‌های سال ۱۳۹۵ شرکت برق منطقه‌ای استان مازندران و گلستان، آمده است.

هزینه‌های مختلف اقتصادی به صورت رابطه (۱) در تعریف تابع هدف اقتصادی برآورد می‌شود.

$$F_1: \text{Min}\ (C_{Total} = C_T + C_L + C_G + C_F) \qquad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه C_F هزینه احداث فونداسیون و نصب برج، C_G قیمت زمین برای احداث و C_T قیمت تمام دکل‌های استفاده شده در طول مسیر بوده که از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$C_T = (n(TT) * C_{TT}) + (n(ST) * C_{ST}) \qquad \text{رابطه (۲)}$$



نگاره ۱: فلوچارت روش انجام کار

جدول ۱: عوامل اقتصادی خطوط انتقال نیرو

ردیف	عامل هزینه		قیمت (میلیون تومان)	توضیحات
۱	سیم		۷۰	مجموع قیمت‌های یک کیلومتر از انواع مختلف سیم‌ها، تعداد رشته‌های هر نوع سیم و همچنین هزینه‌های اجرا و سیم‌کشی آنها می‌باشد.
۲	مقره و یراق‌آلات	برج‌های کششی	۷/۵	شامل هزینه‌های مقره‌ها در هر زنجیره و یراق‌آلات استفاده شده در هر نوع از دکل می‌باشد. این هزینه‌ها در تابع هدف اقتصادی به قیمت هر برج افزوده می‌شود.
		برج‌های آویزی	۳	
۳	برج (دکل)	برج‌های کششی	۵۵	شامل هزینه فلزات، برج‌سازی و نصب برج‌ها می‌باشد.
		برج‌های آویزی	۳۵	
٤	اجرای فونداسیون	مناطق زراعی	۲۰	شامل هزینه‌های تهیه زمین، اجرای فونداسیون و خسارات حقوقی پرداختی به مردم برای مناطق مختلف برج‌گذاری می‌باشد. قیمت به ازای هر دکل در متراژ ٤۰ متر زمین می‌باشد که این هزینه‌ها در تابع هدف اقتصادی به قیمت کل افزوده می‌شود.
		باغ‌ها	۲۸	
		بایر و مراتع	۱۵	
		مناطق جنگلی	۳۵	
۵	شرکت‌های مشاور		-	شامل ۵ درصد از کل هزینه‌های برج‌گذاری و احداث مسیر خطوط انتقال نیرو می‌باشد.

که در این رابطه n(TT) و n(ST) به ترتیب تعداد دکل‌های کششی[1] و آویزی[2] و C_{TT} و C_{ST} به ترتیب قیمت واحد دکل کششی و آویزی می‌باشد.

C_L در رابطه (۱) هزینه طول کابل وابسته به طول مسیر بوده که از رابطه (۳) زیر بدست می‌آید.

$$C_L = C_W * 2 * \left(\sum_{i=1}^{n(TT)+n(ST)-1} L_i \right)$$ رابطه (۳)

که در این رابطه C_W هزینه مربوط به سیم به ازای هر کیلومتر از طول مسیر[3] است. L_i طول سیم بین دو برج بوده که به دلیل دو مسیره بودن در عدد دو ضرب می‌شود.

برای محاسبه فاصله بین دو برج (L_i) متوالی p و q از رابطه (٤) استفاده می‌شود.

$$L_i = S + 1 + \frac{\Delta h^2}{2\,s}$$ رابطه (٤)

که در این رابطه، Δh اختلاف ارتفاع بین دو برج متوالی و S طول اسپن بین دو برج مورد نظر (رابطه (۵)) می‌باشد.

$$S = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}$$ رابطه (۵)

C_G در رابطه (۱) هزینه مربوط به اخذ زمین برای دکل‌ها بوده و از رابطه (٦) به دست می‌آید.

$$C_G = \left(\sum_{i=1}^{n(TT)+n(ST)} CL_i \right)$$ رابطه (٦)

در این رابطه، CL_i قیمت زمین[4] برای احداث فونداسیون مورد نظر طبق جدول (۱) محاسبه می‌شود.

C_F در رابطه (۱) هزینه احداث فونداسیون و تجهیزات مربوط به هر دکل بوده که از رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$C_F = (n(TT) * CF_{TT}) + (n(ST) * CF_{ST})$$ رابطه (۷)

که در این رابطه CF_{TT} و CF_{ST} به ترتیب هزینه مربوط به تجهیزات و لوازم مورد نیاز برای احداث فونداسیون کششی و آویزی می‌باشد.

1- Tension Towers (TT)
2- Suspension Towers (ST)
3- Cost of Wires (CW)
4- Cost of Landuse

۳-۲- تابع هدف دسترسی و نگهداری خطوط انتقال

یکی از ملزومات حفاظت و نگهداری خطوط انتقال، دسترسی آسان به خطوط انتقال پس از احداث است. تابع هدف دوم، عامل نزدیکی برج‌ها و خطوط انتقال برق به جاده‌ها را بررسی می‌کند. هدف این تابع کمینه‌سازی مجموع فواصل محل استقرار دکل‌ها تا جاده‌ها و راه‌های دسترسی می‌باشد. در این تابع، هر پیکسل دارای ارزشی به اندازه فاصله از جاده دسترسی می‌باشد. رابطه (۸) چگونگی محاسبه این تابع هدف را نشان می‌دهد.

$$F_2: \text{Min } (\sum_{i=1}^{n(TT)+n(ST)} d_i) \qquad \text{رابطه (۸)}$$

۳-۳- تابع هدف تأثیرات سوء زیست‌محیطی

این تابع هدف مربوط به بهینه‌سازی و کاهش تأثیرات سوء زیست‌محیطی مسیرهای خطوط انتقال می‌باشد. عوامل زیست‌محیطی و اجتماعی در عملکرد مناسب و سلامت مسیر در زمان بهره‌برداری و یا اجرای خط تأثیر بسیاری دارند. این عوامل شامل تأثیرات زمین‌شناسی، حفظ و حراست از محیط زیست و مناطق حفاظت شده امنیتی و ملی، مسائل ایمنی و سلامت، اثرات رودخانه‌ها و همچنین زیبایی شناختی می‌باشد. این تابع، مجموع مقادیر تمامی پیکسل‌هایی که مسیرخطوط انتقال نیرو از آن می‌گذرد، از مقدار ارزش پیکسل برج اول ($Cost_1$) تا مقدار ارزش پیکسل برج انتهایی ($Cost_n$) را محاسبه و کمینه می‌کند. در نقشه توابع هدف سوء زیست محیطی، هر پیکسل دارای مقادیر ارزش بین صفر تا یک می‌باشد. رابطه (۹) چگونگی محاسبه این تابع هدف را نشان می‌دهد:

$$F_3: \text{Min } (\sum_{i=1}^{i=n} Cost_i) \qquad \text{رابطه (۹)}$$

۳-٤- قیود مسأله مسیریابی خطوط انتقال نیرو

برای تأمین عوامل فنی و سه تابع هدف مربوط به مسیریابی خطوط انتقال نیرو، می‌بایست مجموعه‌ای از معیارهای مؤثر تعریف شوند. این معیارها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که اهداف طراح را برای به حداقل رساندن هزینه‌های ناشی از ساخت برآورده نمایند (*Bagli, et al, 2011*).

قیود مربوط به برج‌های مسیر خطوط انتقال نیرو به صورت قوانینی به صورت زیر تعریف شده است:

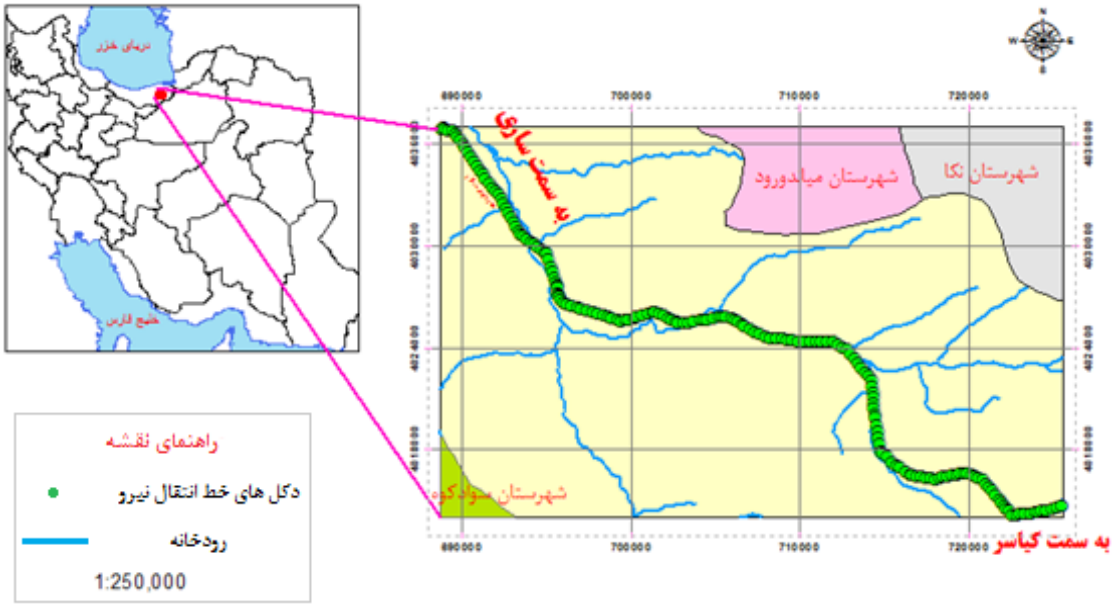
- در نقاط مبدأ و مقصد و شکستگی مسیر از برج‌های نوع کششی استفاده شود.
- در طول قسمت‌های مستقیم مسیر از برج‌های نوع آویزی استفاده شود.
- حتی درصورت مستقیم بودن مسیر (عدم وجود شکست و زاویه مسیر)، بعد از حدود هر ۱۵ برج آویزی (حدود ۵ کیلومتر)، از یک برج کششی استفاده شود.
- هیچ یک از نقاط شکست مسیر (دکل‌ها) در مناطق غیرمجاز قرار نگرفته باشد.
- فاصله بین دو دکل مجاور دربازه معینی و به اندازه طول اسپن طراحی شده باشد (کمتر از مقداری معینی به اندازه ۲۰۰ متر و بیشتر از مقدار معینی به اندازه ٤۰۰ متر باشد).
- اختلاف ارتفاع دو دکل مجاور از حد معینی کمتر باشد.

٤- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در محدوده طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ٦ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۳۱ دقیقه و محدوده عرض جغرافیایی ۳٦ درجه و ١٤ دقیقه تا ۳٦ درجه و ۲۷ دقیقه در شهرستان ساری، مرکز استان مازندران واقع شده است. منطقه مورد مطالعه، مستطیلی با ابعاد ۳۷ × ۲۳ کیلومتر بوده و دارای مساحتی به اندازه ۸٤۸۷۷/٦۳ هکتار است. مسیر خط انتقال نیروی فعلی با ولتاژ ٦۳ کیلوولت به طول ٤۹/۷ کیلومتر در مجاورت جاده ساری به سمنان قرار دارد. پست شهید سلمانی به عنوان پست مبدأ در جنوب شهر ساری و پست کیاسر به عنوان پست مقصد، به فاصله ۲ کیلومتری از شهر کیاسر واقع شده است (نگاره (۲)).

۵- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

به منظور انجام مسیریابی خطوط انتقال نیرو، داده‌ها و



نگاره ۲: منطقه مورد مطالعه

اطلاعات مربوط به محدوده مطالعاتی جمع‌آوری شدند.

به جهت اینکه هیچ‌یک از نقاط دکل‌های مسیر خطوط انتقال نیرو برروی مناطق غیرمجاز قرار نگیرند، نقشه مناطق غیرمجاز برج‌گذاری خطوط انتقال نیرو با استفاده از پارامترهایی نظیر لایه‌های جاده‌ها، رودخانه‌ها، شیب زمین، محدوده بافت روستاها و ساختمان‌های مسکونی، تجاری و ... که در نگاره (۳) نشان داده شده، تهیه شد.

در تابع هدف دسترسی و نگهداری از خطوط انتقال، هرچه فاصله خطوط انتقال از جاده‌ها و مسیرهای دسترسی بیشتر باشد، میزان دسترسی به خطوط انتقال سخت‌تر خواهد شد.

بنابراین برای تعریف مقادیر عضویت برای هر پیکسل در تهیه نقشه فاصله از راه‌های دسترسی، از تابع عضویت خطی فازی استفاده شد. بدین صورت که هرچه از جاده‌های اصلی دورتر شویم مقادیر درجه عضویت کمتر می‌شود.

برای تهیه نقشه تأثیرات سوء زیست‌محیطی خطوط انتقال نیرو از نقشه‌های شیب زمین، کاربری اراضی، زمین لغزش، فاصله از گسل‌ها، خاک‌شناسی، فرسایش خاک، زمین‌شناسی و نقشه فاصله از رودخانه‌ها استفاده شده است.

جهت ارزش‌گذاری معیارها از توابع عضویت فازی استفاده شده است. در محاسبه معیارها عدد صفر بیشترین و عدد یک کمترین تأثیر سوء زیست محیطی را دارد[۱]. در ادامه با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مقایسه‌ای زوجی بین تک تک معیارها صورت گرفته و میزان اهمیت نسبی هر معیار محاسبه گردید. این معیارها به روش ترکیب خطی وزنی با یکدیگر ترکیب شده و سپس با تابع عضویت خطی فازی محاسبه می‌شوند. اعداد یک و صفر به ترتیب مربوط به بیشترین و کمترین تأثیر سوء زیست محیطی می‌باشد. نگاره (٤) تصویر نهایی نقشه تأثیرات سوء زیست محیطی را نشان می‌دهد.

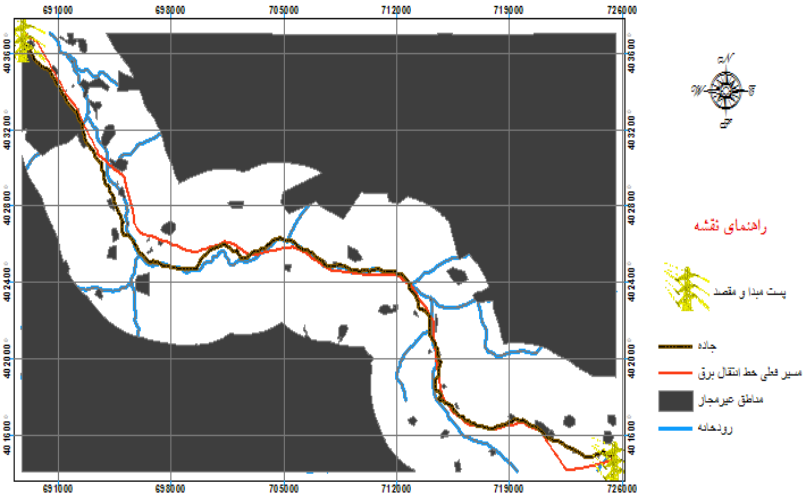
٦- توسعه عملگرهای تکاملی NSGA-II

برای حل مسأله مسیریابی خطوط انتقال نیرو، قسمت‌های مختلف این الگوریتم توسعه و گسترش داده شده است. در الگوریتم پیشنهادی هر کروموزم[۲] نشاندهنده یک مسیر در

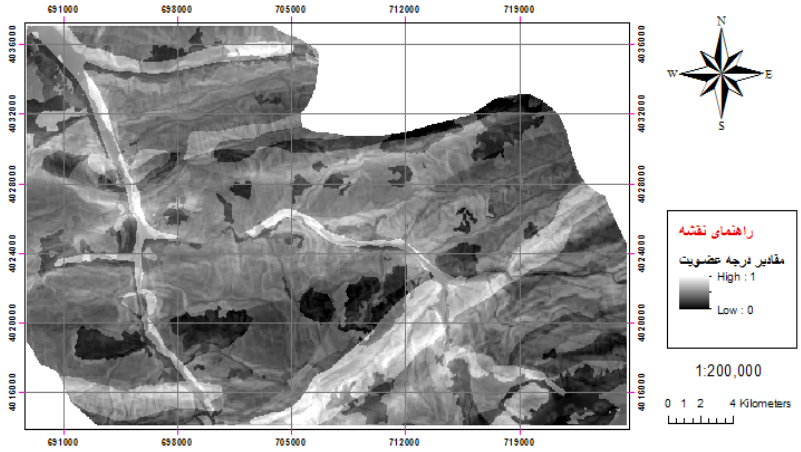
---

[۱]- پس از تلفیق نقشه‌ها، مقادیر درجه عضویت صفر باعث صفر شدن موقعیت‌هایی که بیشترین تأثیر سوء زیست محیطی را دارند می‌شود.

[۲]- در الگوریتم‌های ژنتیکی هر کروموزوم (راه‌حل‌ها) نشان‌دهنده یک نقطه در فضای جستجو و یک راه‌حل ممکن برای مسأله موردنظر است. که از تعداد ثابتی ژن (متغیر) تشکیل می‌شوند.



نگاره ۳: نقشه مناطق غیرمجاز برج‌گذاری



نگاره ٤: نقشه تأثیرات سوء زیست محیطی

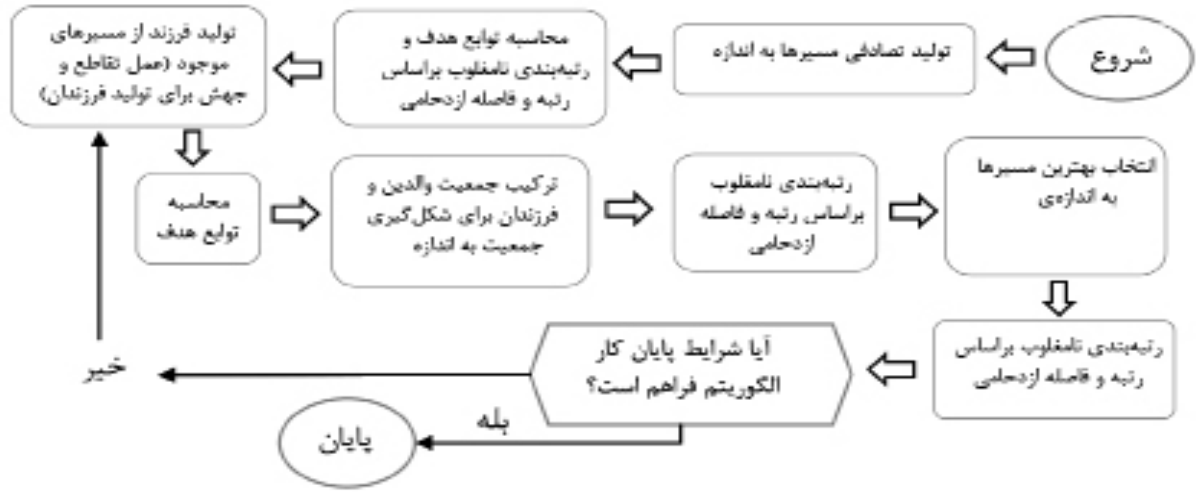
فضای جستجو و یک راه‌حل ممکن برای مسأله مورد نظر است. خود کروموزوم‌ها (مسیرها)، از تعداد ثابتی ژن (دکل) تشکیل می‌شوند، که هر ژن در این الگوریتم شامل موقعیت مختصاتی واقعی و مقادیر سه تابع هدف هر دکل می‌باشد (نگاره (۵)).

X_1	X_2	...	X_n
Y_1	Y_2	...	Y_n
$Cost(f_1)$	$Cost(f_1)$	...	$Cost(f_1)$
$Cost(f_2)$	$Cost(f_2)$	...	$Cost(f_2)$
$Cost(f_3)$	$Cost(f_3)$	...	$Cost(f_3)$

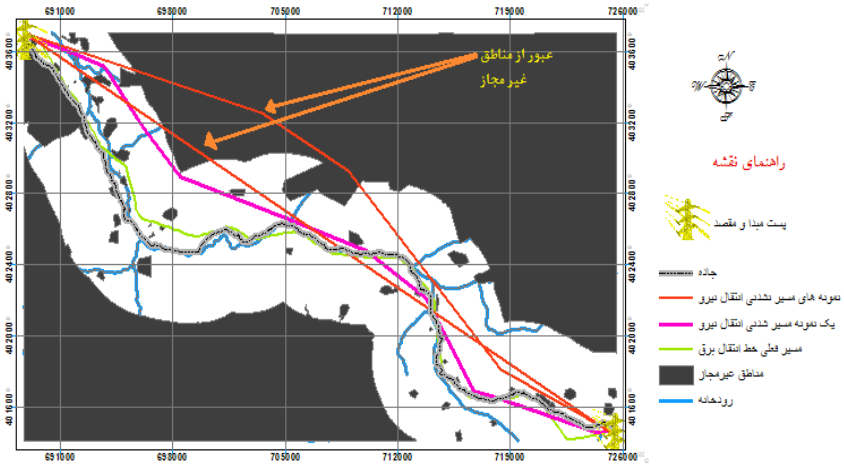
نگاره ۵: ساختار کروموزم

در این پژوهش از یک عملگر ابتکاری برای تقاطع و جهش استفاده کردیم. در عملگر تقاطع، دو مسیر به طور تصادفی از جمعیت موجود گرفته شده که به آن والد اول و والد دوم گفته می‌شود. از والد اول به طور تصادفی یک دکل انتخاب می‌شود، سپس نزدیک‌ترین دکل در والد دوم به دکل انتخاب شده پیدا می‌شود. مسیر نهایی از تلفیق دکل اول تا دکل تصادفی انتخاب شده از والد اول با دکل تصادفی یافت شده تا دکل انتهایی از والد دوم به دست می‌آید. برای اعمال جهش بر روی نقاط دکل‌های مسیر، از قیدی به صورت محدوده معینی از اطراف هر دکل، استفاده شده است. این عملگر تنها برروی یک دکل از هر مسیر به صورت تصادفی اعمال می‌شود.

عمل مرتب‌سازی نامغلوب در این مدل بدین صورت عمل می‌کند که اگر مقادیر توابع هدف یک مسیر با مسیر دیگر برابر و حداقل یکی از مقادیر بهتر باشد، بنابراین مسیر موردنظر بهتر از مسیر دیگر بوده و مغلوب نمی‌شود. با این تعریف و مقایسه مسیرها با یکدیگر جبهه‌بندی انجام شده



نگاره ٦: فرآیند مسیریابی در الگوریتم NSGA-II



نگاره ۷: چند نمونه مسیر قابل قبول و غیرقابل قبول

و اندکس جبهه با عنوان رتبه در مسیر ذخیره می‌شود. در ادامه نیز عمل مرتب‌سازی با چینش براساس رتبه مسیرها انجام می‌شود و در متغیری به صورت آرایه ذخیره گردیده و فاصله ازدحامی برای آن محاسبه می‌گردد. در انتها مجموع مقدارهای محاسبه شده برای هر تابع هدف، در مسیر ذخیره شده،که با این عدد می‌توان عمل مرتب‌سازی مسیرها را در هر جبهه انجام داد. نگاره (٦)، فرآیند مسیریابی در الگوریتم NSGA-II را نشان می‌دهد.

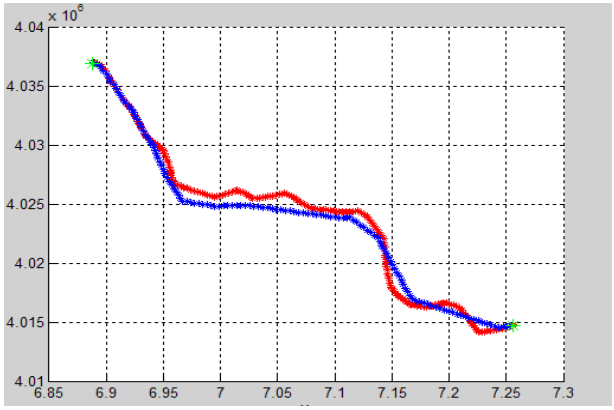
یکی از روندهای معمول در الگوریتم ژنتیک به منظور پوشش هرچه بیشتر فضای جستجوی مسأله، اختصاص تعداد بیشتر جمعیت در نسل اول نسبت به سایر نسل‌ها است(*Haupt & Haupt, 2004*) . در این الگوریتم برای تعریف جمعیت اولیه در نسل اول، چندین تصویر مجاز مسیر به الگوریتم معرفی شده است. نگاره (۷)، یک نمونه مسیر قابل قبول و چند نمونه مسیر غیرقابل قبول را نشان می‌دهد.

۷- پیاده‌سازی مدل توسعه داده شده مبتنی بر NSGA-II

برای تعیین مسیر مناسب براساس چندهدفه، بایستی الگوریتم به دفعات و با استفاده از پارامترهای مختلف اجرا شود(*Kanoh & Hara, 2008: 660*) . ازجمله این پارامترها، تعداد نسل و میزان جمعیت الگوریتم می‌باشد. در مدل ارائه شده در هر بار اجرای مدل با تعداد نسل و جمعیت اولیه مشخص، توابع هدف برروی آن مسیر اعمال می‌شود. سپس با دریافت مجموع مقادیر توابع هدف از دکل‌ها، مقادیر

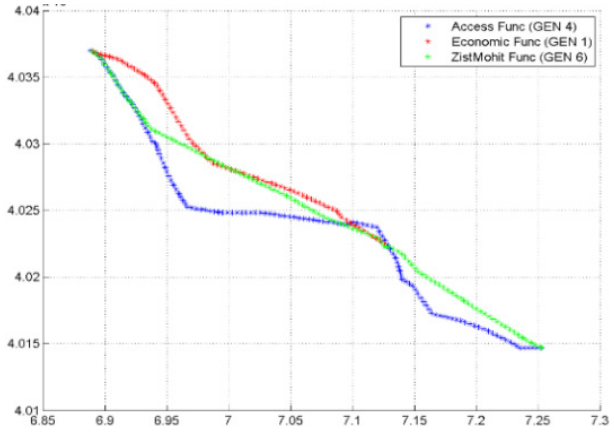
توابع هدف هر مسیر بدست می‌آید.

برای نمونه نگاره (۸) مسیر جبهه بهینه پاره تو در فضای جواب و مسیر فعلی خطوط انتقال نیرو را برای این الگوریتم با تعداد جمعیت اولیه ۲۰۰ و تعداد نسل ۲۰ نشان می‌دهد.



نگاره ۸: اجرای مدل با تعداد جمعیت اولیه ۲۰۰ و تعداد نسل ۲۰

در همین اجرا با تعداد جمعیت اولیه ۲۰۰ و تعداد نسل ۲۰، شاهد تولید بهترین مسیر خط انتقال در نسل‌های ۱، ٤، ٦ به ترتیب برای توابع هدف اقتصادی، دسترسی و نگهداری و تابع هدف تأثیرات سوء زیست محیطی خطوط انتقال نیرو بودیم. در نگاره (۹) بهترین مسیر برای هر تابع هدف به نمایش درآمده است. در این نگاره خط قرمز مسیر حال حاضر خط انتقال نیرو و خط آبی مسیر تولید شده مدل در اجرای مدل با تعداد جمعیت اولیه ۲۰۰ و تعداد نسل ۲۰ نیز می‌باشد.



نگاره ۹: بهترین مسیر هر تابع هدف با تعداد ۲۰۰ جمعیت اولیه و تعداد نسل ۲۰

۸- تست و ارزیابی مدل توسعه داده شده

برای تست و ارزیابی کارایی الگوریتم‌های ژنتیکی آزمون‌های مختلفی وجود دارد که برحسب کاربرد و مسأله مورد نظر می‌توان هریک از آنها را به کار گرفت.

دو نمونه از آزمون‌های پرکاربرد در این زمینه، تست تکرارپذیری و تست تنظیم پارامترها در الگوریتم ژنتیک می‌باشد *(Zitzler, et al, 2003: 124)*. در روش‌های حل ابتکاری همانند الگوریتم ژنتیک، نتایج مدل‌ها در تکرارهای مختلف متفاوت می‌باشند. به منظور تست تکرارپذیری مدل، میزان تغییرات در اجراهای مختلف الگوریتم تحت شرایط یکسان پارامترها، با ۵۰ جمعیت اولیه و ۵۰ نسل ۱۰ بار اجرا شد و نتایج حاصل از آن در جدول (۲) آمده است *(Saadatseresht, et al, 2009: 310)*. محاسبه میزان تغییرات در توابع هدف (جدول (٤))، نشان می‌دهد که مقدار متوسط درصد تغییرات تقریباً ۱۱ درصد است، بنابراین می‌توان تکرارپذیری مدل ارائه شده را ۸۹ درصد برآورد کرد.

جدول ۲: مقادیر توابع هدف در تست تکرارپذیری مدل

شماره تکرار اجرا	تعداد نسل	تعداد جمعیت اولیه	کمینه تابع هدف		
			تأثیرات سوء زیست-محیطی (F_3)	دسترسی و نگهداری (F_2)	اقتصادی (F_1)
۱	۱۰	۵۰۰	۵۰/۰۹۳	۲٦/٤	۱۳٤٦۵/۲
۲	۲۰	۲۵۰	۵۰/۲٤۱۲	۲۵.۹	۹۳۸٦.۹۷۵
۳	۲۵	۲۰۰	٤۹/۰۵۰۵	۲۷/٤	۸۷۱٦/۰۵
٤	٤۰	۱۲۵	۵۵/۱۱۹	۲۳/٦	۸۹٤۳/۳۷۵
۵	۵۰	۱۰۰	٦٤/۵۰۱۱	۱۰/۲	۹۷۲۹/۳
٦	۱۰۰	۵۰	۵٤/۷۹۸۲	۲۳/٦	۹۱٦۹/٦۵
۷	۱۲۵	٤۰	٤۹/۷۷۵۹	۲٦/۵	۸۷۳٦
۸	۲۰۰	۲۵	٦۰/۰۲۷۲	۱۳/۲	۹٦۳۲/۷
۹	۲۵۰	۲۰	۵۷/۷۲۰۸	۳۱/٤	۹۰۸۳/۰۲۵
۱۰	۵۰۰	۱۰	۵۹/۱۷۷۱	۲۱/۷	۹۲۳۲/٦۵

در تست تنظیم پارامترها، دو پارامتری که نیاز به تنظیم دارند، تعداد نسل و تعداد جمعیت اولیه می‌باشند. حاصل ضرب این دو پارامتر، فاکتوری به نام تابع ارزیابی[1] بوده که پیچیدگی الگوریتم را نشان می‌دهد. برای بررسی تأثیر تنظیمات دو پارامتر مذکور، به صورت تجربی و آزمایشی مقدار ثابت ۵۰۰۰ برای تابع ارزیابی در نظر گرفته شد. در این تست نیز مانند تست تکرارپذیری، مدل ارائه شده ۱۰ بار با مقادیر مختلف برای میزان جمعیت اولیه و تعداد نسل به اجرا درآمد.

نتایج این بررسی در جدول (۳) نشان می‌دهد بهترین مقادیر توابع هدف F_1 و F_3، در اجرای شماره سوم و بدترین مقادیر آنها به ترتیب در اجرای شماره پنجم و اول بوده است. ولی بهترین و بدترین مقدار تابع هدف F_2 در اجرای شماره پنجم و نهم می‌باشد. در نظرگرفتن نسبت مناسب بین تعداد جمعیت اولیه و تعداد نسل، افزون بر تولید جواب‌های بهینه با مقادیر توابع هدف کمتر، در کاهش زمان اجرای الگوریتم نیز بسیار تأثیرگذار است.

جدول ۳: مقادیر توابع هدف در تست تنظیم پارامترها

شماره تکرار اجرا	کمینه تابع هدف		
	تأثیرات سوء زیست‌محیطی (F_3)	دسترسی و نگهداری (F_2)	اقتصادی (F_1) (به میلیون)
۱	۵۵/۱۸۲۲	۱۵/۲	۹۱۲۷/۶۵
۲	۶۰/۰۴۱۲	۱۴	۹۳۱۲/۹۷۵
۳	۶۱/۵۵۱	۱۸/۴	۹۳۴۵
۴	۵۸/۴۱۸۳	۲۰/۶	۹۱۶۳/۳۵
۵	۵۲/۲۳۳۱	۲۴/۳	۸۹۱۲/۱
۶	۵۶/۱۰۴۴	۱۴/۴	۹۰۴۳/۶۵
۷	۵۰/۳۱۹۵	۲۶/۷	۸۶۳۳/۱
۸	۵۲/۹۵۲۲	۲۵/۸	۸۷۵۹/۶۲۵
۹	۵۹/۱۳۹۵	۱۴/۷	۹۱۸۰/۶۷۵
۱۰	۵۷/۳۴۷۴	۲۲/۵	۸۵۹۸/۹۷۵

[1]- Function Evaluation

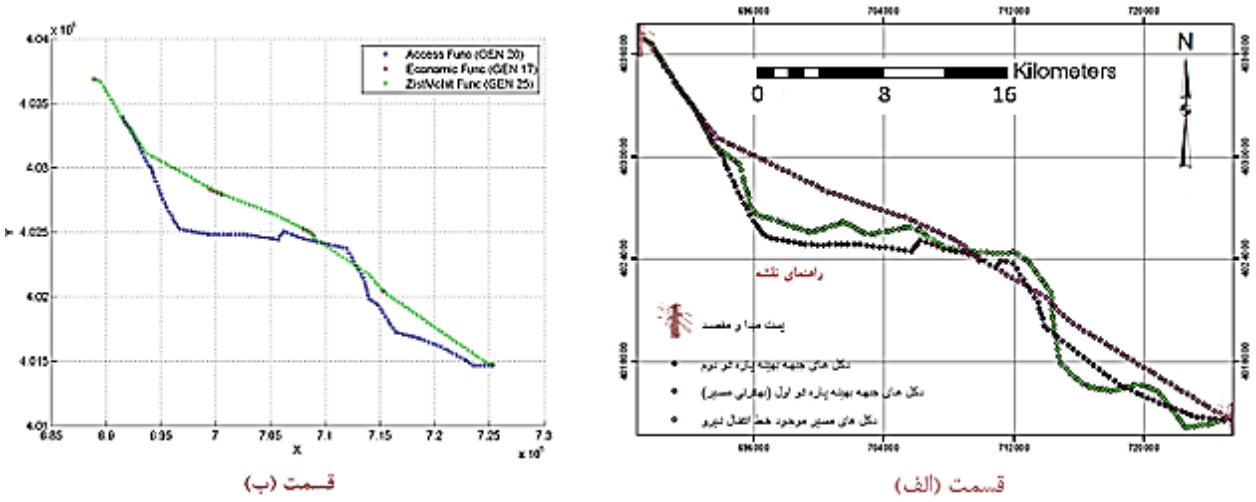
جدول ۴: میزان تغییرات بهترین مقادیر توابع هدف در ۱۰ بار تکرار

تابع هدف	میانگین مقادیر توابع هدف	دامنه تغییرات	درصد تغییرات	درصد کل تغییرات توابع هدف
F_1	۹۰۷/۷۰۱	۷۱۴	۲/۵	۱۱ درصد
F_2	۱۹/۹۷	۱۲/۵	۲۳/۰۸	
F_3	۵۶/۳۲	۱۱/۲۳	۵/۲۷	

۹- یافته‌های پژوهش

در این پژوهش پس از اجرای چندین باره الگوریتم و ارزیابی توابع هدف و طول مسیر، مسیر تولید شده در اجرای شماره سوم در تست تنظیم پارامترها با تعداد ۲۰۰ جمعیت اولیه و ۲۵ نسل به عنوان بهترین مسیر خطوط انتقال نیرو شناخته شده است. به منظور بررسی و ارزیابی کارایی، صحت و دقت عملکرد مدل طراحی شده در پژوهش حاضر، نتایج حاصل از این تحقیق ازجمله مقادیر توابع هدف و مشخصات مسیر با مسیر خط انتقال موجود، طبق جدول (۵) مقایسه شد. مسیر طراحی شده توسط این مدل دارای درصد بهبود توابع هدف F_1، F_2، F_3 به ترتیب به میزان ۳۸/۲۳ و ۵۳ و ۴۱/۳ درصد و میانگین ۴۴ درصد بهبود تغییرات توابع هدف، کاهش طول حدود ۶ کیلومتری مسیر و کاهش تعداد ۲۷ دکل کششی و ۳۱ دکل آویزی نسبت به مسیر موجود خطوط انتقال نیرو می‌باشد. در نگاره (۱۰) قسمت (الف)، جبهه نامغلوب بهینه پارهتو اول و دوم و مسیر موجود خط انتقال نیرو مشاهده می‌شود و قسمت (ب) بهترین مسیر هر تابع هدف را نشان می‌دهد. در این پژوهش، روشی برای تعیین مسیر خط انتقال نیروی جدید بااستفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی و الگوریتم NSGA-II به صورت خودکار ارائه شد. مدل ارائه شده با سه تابع هدف اقتصادی، دسترسی و نگهداری و تأثیرات سوء زیست محیطی خط انتقال نیرو توانایی بالایی در همگرایی به جواب‌های بهینه با درصد بالایی از آزمون‌های مختلف را دارا می‌باشد.

شیوه عملکرد توابع هدف در این الگوریتم به گونه‌ای



نگاره ۱۰: مسیر تولید شده مدل با تعداد ۲۰۰ جمعیت اولیه و ۲۵ نسل

جدول ۵: مقایسه مقادیر توابع هدف و مشخصات مسیر تولید شده مدل با مقادیر مسیر موجود

مسیر	تعداد		طول مسیر	تابع هدف		
	دکل کششی	دکل آویزی		تأثیرات سوء زیست‌محیطی (F_3)	دسترسی و نگهداری (F_2) (کیلومتر)	اقتصادی (F_1) (میلیون)
مسیر موجود	۵۱	۱۲۳	٤٩٨٦٩/٥٧	۸۳/۵۵	۵۸/۱	١٤١١١/٤٧٥
مسیر تولیدشده از مدل	٢٤	۹۲	٤٣٨٤٦/٢٠	٤٩/٠٥	٢٧/٤	٨٧١٦/٠٥
میزان تغییر	۲۷	۳۱	٦٠٢٣/٣٧	٣٤/٥	۳۰/۷	٥٣٩٥/٤٢٥
درصد بهبود تغییرات (٪)	۵۳	۲۵/۲	۱۲	٤١/٣	۵۳	۳۸/۲۳

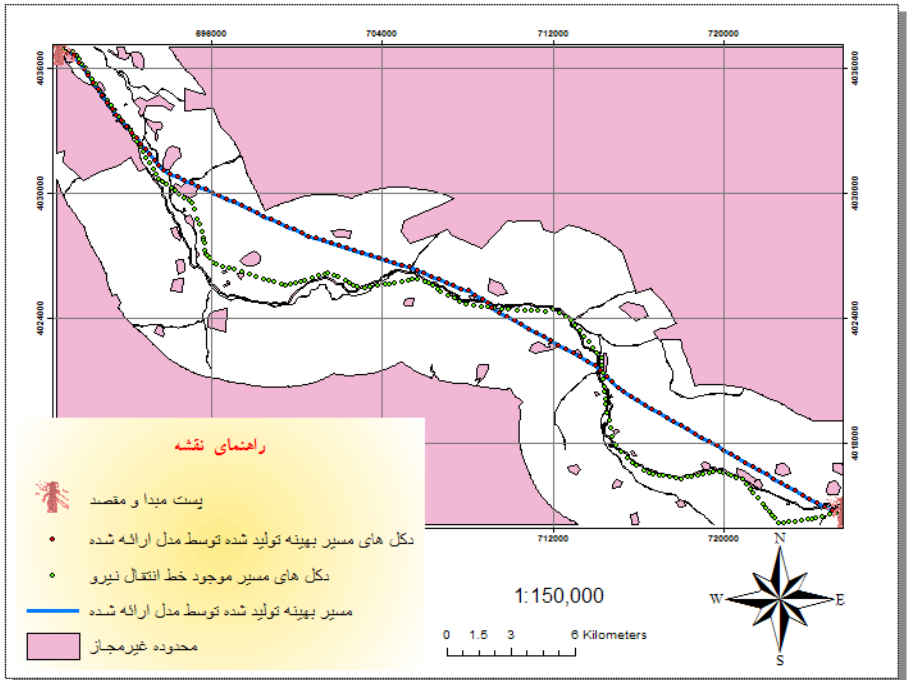
بوده است که باعث کمینه شدن طول مسیر، میل کردن آن به خط مستقیم بین پست مبدأ و مقصد و همچنین کاهش بسیار زیاد تعداد شکستگی‌های مسیر (دکل کششی) و دکل‌های آویزی بکار رفته در مسیر خط انتقال شده و مسیرهای بهینه یافت شده در مدل از هرنظر از مسیر موجود در منطقه بهتر بوده است. نگاره (۱۱) بهترین مسیر تولید شده توسط این مدل و مسیر موجود خط انتقال نیرو را نشان می‌دهد.

۱۰- نتیجه‌گیری

افزایش سرانه مصرف برق[1] از یک سو و افزایش جمعیت و تقاضای این انرژی ارزشمند از سویی دیگر نیاز به احداث خطوط انتقال و توزیع برق را به جای جای نقاط کشورها افزایش داده است. از آنجایی که مسأله مسیریابی خطوط انتقال نیرو یک مسأله چندهدفه می‌باشد، از بین روش‌های حل مسائل چندهدفه، از الگوریتم ژنتیک تکاملی NSGA-II استفاده شد.

این الگوریتم دارای قابلیت‌های مناسبی ازجمله پیچیدگی محاسباتی کمتر، سرعت بالای اجرای الگوریتم، نیاز نداشتن به پارامترهای مختلف و تنظیم آنها، فرآیند نخبه‌سالاری و همچنین توجه همزمان به معیارهای متعدد است. مجموعه ویژگی‌های مذکور، حل مسأله مسیریابی خطوط انتقال نیرو به منظور رسیدن به جواب‌های بهینه و مناسب در زمان

[1]- عبارت است از کل مصرف نهایی برق در یک محدوده جغرافیایی در یک دوره زمانی، تقسیم بر تعداد جمعیت در همان دوره.



نگاره ۱۱: بهترین مسیر خطوط انتقال نیرو با تعداد نسل ۲۵ و اندازه جمعیت ۲۰۰

قابل قبولی را امکان‌پذیر ساخت. در این الگوریتم سه تابع هدف اقتصادی (F_1)، دسترسی و نگهداری راحت از خط انتقال (F_2) و تابع هدف تأثیرات سوء زیست‌محیطی (F_3) جهت ایجاد یک ساختار تصمیم‌گیری چندهدفه مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که عدم قطعیت یکی از معمول‌ترین مشخصه‌های مسائل تصمیم‌گیری است، روش FAHP برای پاسخگویی به این مشکل ایجاد شد. به همین دلیل در پژوهش حاضر برای وزن‌دهی و ترکیب معیارها در تابع هدف تأثیرات سوء زیست‌محیطی از این روش استفاده شده است. برای تست و ارزیابی کارایی الگوریتم ژنتیک تکاملی NSGA-II از دو نمونه از آزمون‌های پرکاربرد در این زمینه، تست تکرارپذیری و تست تنظیم پارامترها، استفاده شد. درصد موفقیت آزمون تست تکرارپذیری و تنظیم پارامترها برای مدل ارائه شده به ترتیب ۸۹ و ۸۸ درصد بدست آمد که موفقیت‌آمیز بودن این مدل در هر دو آزمون را نشان می‌دهد.

مقایسه بهترین مسیر تولید شده از مدل پیشنهادی با مسیر موجود خط انتقال نیرو، بهبود مقادیر توابع هدف، کاهش تعداد ۲۷ دکل کششی و ۳۱ دکل آویزی و کاهش حدود ٦کیلومتر از طول مسیر به نسبت مسیر موجود خط انتقال نیرو را نشان می‌دهد.

نتایج نهایی تحقیق نشان داده است که قابلیت‌های سیستم‌های اطلاعات مکانی می‌تواند به گونه مناسبی با الگوریتم NSGA-II تلفیق شده و با اعمال تغییراتی مناسب در این الگوریتم و با بکارگیری روش FAHP برای هر نوع از مسیر و مسأله مسیریابی به خصوص در زمینه‌های توزیع، فوق توزیع و خطوط فشار قوی برق بکار گرفته شود.

در پژوهش‌های آینده درصورت داشتن لایه‌های اطلاعاتی جامع‌تر مانند باد، دما، اطلاعات دقیق زمین‌شناسی، خاک‌شناسی و محاسبات فنی و تخصصی نظیر کشش و فشار در برج‌ها ترکیب روش ارائه شده با الگوریتم‌های برنامه‌سازی پویا در بخش برج‌گذاری و امکان درنظرگرفتن تجهیزات گوناگون در شرایط متفاوت محیطی می‌توان روند و کیفیت مسیریابی را بهبود بخشید. همچنین درکارهای آینده می‌توان به حل مسایل مکانیابی-مسیریابی دکل‌ها و عبور مسیر خط انتقال با در نظر گرفتن معیارها و عوامل فنی، زیست‌محیطی-اجتماعی و اقتصادی مختلف با استفاده از روش‌هایی نوین و یا سایر روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه پرداخت.

۱۱- منابع و مآخذ

1. Ahmadi, S., Ebadi, H., & Valadan, Z. (2008). A new method for path finding of power transmission lines in geospatial information system using raster networks and minimum of mean algorithm. World Applied Sciences Journal, 3(2), 269-277.

2. Bagli, S., Geneletti, D., & Orsi, F. (2011). Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimize environmental impacts. Environmental Impact Assessment Review, 31(3), 234-239.

3. Beheshtifar, S., Alimohammadi, A., Mansourian, A. (2011). power transmission lines routing with multiobjective optimization approach. Journal of Remote Sensing & GIS, 3(4).

4. Coello, C. A. C., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). Evolutionary algorithms for solving multiobjective problems (Vol. 5). New York: Springer.

5. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), 182-197.

6. EROĞLU, H., & Aydin, M. (2015). Optimization of electrical power transmission lines routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 23(5), 1418.

7. Gill, R. S. (2005). Electric transmission line routing using a decision landscape based methodology.

8. Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (2004). Practical genetic algorithms. John Wiley & Sons.

9. Kanoh, H., & Hara, K. (2008, July). Hybrid genetic algorithm for dynamic multi-objective route planning with predicted traffic in a real-world road network. In Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation (pp. 657-664). ACM.

10. Kishore, T. S., & Singal, S. K. (2014). Optimal economic planning of power transmission lines: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 949-974.

11. Monteiro, C., Ramírez-Rosado, I. J., Miranda, V., Zorzano-Santamaría, P. J., García-Garrido, E., & Fernández-Jiménez, L. A. (2005). GIS spatial analysis applied to electric line routing optimization. IEEE transactions on Power Delivery, 20(2), 934-942.

12. Qiu, J., Bian, X., & Li, X. (2004, June). Intelligent design of power transmission lines based on 3D GIS. In Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on (Vol. 6, pp. 5125-5128). IEEE.

13. Rastegar, A., Mansourian, A., Talee, M., Yari, D., Beheshtifar, S. (2015). Power-transmission lines Routing using the NSGA-II algorithm. Journal of Remote Sensing & GIS, 6(24).

14. Rodolfo Mendes, de Lima, et al. “Least-cost path analysis and multi-criteria assessment for routing electricity transmission lines.” IET Generation, Transmission & Distribution 10.16 (2016): 4222-4230.

15. Saadatseresht, M., Mansourian, A., & Talee, M. (2009). Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach. European Journal of Operational Research, 198(1), 305-314.

16. Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms. Evolutionary computation, 2(3), 221-248.

17. Teegala, S. K., & Singal, S. K. (2016). Optimal costing of overhead power transmission lines using genetic algorithms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 83, 298-308.

18. Thu Bui, L. (Ed.). (2008). Multi-Objective Optimization in Computational Intelligence: Theory and Practice: Theory and Practice. IGI Global.

19. Umashankar, s. (2014). Optimization on shortest path finding for underground cable transmission lines routing using Gis. Journal of theoretical & applied information technology, 65(3).

20. Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M., & Da Fonseca, V. G. (2003). Performance assessment of multi-objective optimizers: An analysis and review. IEEE Transactions on evolutionary computation, 7(2), 117-132.