



## مسیریابی خطوط انتقال نیرو با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه

سارا بهشتی‌فر\*<sup>۱</sup>، عباس علی‌محمدی سراب<sup>۲</sup>، علی منصوریان<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری GIS، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، گروه GIS، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
۳. استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، گروه GIS، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۷/۲۱

### چکیده

برای احداث خط انتقال نیرو لازم است عوامل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد توجه قرار گیرند. 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. لذا تعیین مسیر بهینه برای خط انتقال جدید، مسئله‌ای چندهدفه است که ممکن است اهداف آن ناسازگار باشند. در واقع مسیر با حداقل هزینه ممکن است تأثیرات منفی فراوانی بر روی محیط زیست داشته باشد. در نوشتار حاضر روشی بر مبنای GIS برای تعیین مسیر خط انتقال نیرو ارائه می‌گردد که در آن از نوعی الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی مسیر استفاده شده است. الگوریتم NSGA-II، با تعدادی قید و دو هدف که شامل تأثیرات زیست‌محیطی و هزینه است، برای انتخاب مسیر بهینه خط انتقال نیرو ۴۰۰ کیلومتر در مرودشت پیاده‌سازی شده است. در این تحقیق، نحوه ترکیب الگوریتم NSGA-II با GIS برای تعیین مسیرهای بهینه متعدد برای خطوط انتقال نیرو بیان شده است؛ به طوری که امکان انتخاب و تصمیم‌گیری نهایی از بین راه‌حل‌های موجود، برای تصمیم‌گیران مختلف وجود دارد. در اغلب مطالعات پیشین تنها یک مسیر به عنوان مسیر نهایی ارائه شده که با استفاده از ترکیب تأثیرات عوامل مختلف تعیین گردیده است. افزون بر این، با ترکیب تأثیرات عوامل مختلف، احتمالاً تأثیر برخی از عوامل به‌وسیله برخی دیگر خنثی می‌شود. اما با به‌کارگیری روش پیشنهادی دو تابع که دارای واحدهای متفاوت هستند، تا انتهای فرایند بهینه‌سازی با هم ترکیب نمی‌شوند. در این مقاله، سه گزینه که هر یک شامل سه دکل کششی هستند، به عنوان نمونه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و برای هر کدام طول مسیر و مقادیر اهداف اول و دوم مشخص شده است.

کلیدواژه‌ها: مسیریابی خط انتقال نیرو، بهینه‌سازی چندهدفه، NSGA-II.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان شریعتی، بالاتر از پل رومی، خیابان موسیوند، پلاک ۳۴، واحد ۴. تلفن: ۰۹۱۴۳۱۴۳۷۹۶

## ۱- مقدمه

برای تأمین تقاضای روزافزون انرژی الکتریکی، توسعه شبکه برق از ضروریات است. یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های صنعت برق کشور در زمینه توسعه شبکه برق، احداث خطوط انتقال نیرو است. این خطوط، وظیفه انتقال نیروی تولیدشده در نیروگاه‌ها به پست‌های توزیع را برعهده دارند (Singh Gill, 2002).

طراحی خط انتقال جدید، معمولاً دارای دو مرحله اصلی انتخاب مسیر خط انتقال و تعیین اندازه تجهیزات مورد استفاده است. (Monteiro et al., 2005). در مرحله نخست که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود، مسیر و ناحیه‌هایی که خط انتقال از آنها عبور خواهد کرد، با توجه به شرایط مورد نیاز تعیین می‌گردد. به دلیل بالا بودن هزینه احداث خط انتقال نیرو، تأثیرات منفی آن بر روی محیط زیست، و محدودیت‌های زمین برای این منظور، تعیین مسیر مناسب برای خط انتقال نیرو دشوار و پیچیده شده است (Murata, 1995). در مسیریابی خط انتقال نیرو باید سعی شود که هزینه نصب و نگهداری خط با در نظر داشتن شرایط و محدودیت‌های جغرافیایی، زیست‌محیطی و اجتماعی، کمینه شود (Monteiro et al., 2005).

تاکنون مطالعات متعددی در خصوص مسیریابی خطوط نیرو انجام گرفته است که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. سامیک<sup>۱</sup> و همکاران (1993) از GIS برای مسیریابی اتوماتیک خطوط نیروی توزیع در مناطق مسکونی به صورت زیرزمینی استفاده کردند. وست<sup>۲</sup> و همکاران (1997) روشی را برای تعیین مسیر خطوط در مناطق غیرشهری ارائه کردند. در روش پیشنهادی آنها، منطقه مورد مطالعه متناسب با دشواری احداث خط، به قسمت‌های مختلف تقسیم می‌شود و به هر قسمت هزینه‌ای اختصاص داده می‌شود. برای حذف موانع و مناطقی که دارای محدودیت قطعی برای احداث خط نیرو هستند، میزان هزینه فوق بینهایت در نظر گرفته می‌شود و اقدام به تعیین مسیر می‌شود.

مونت‌ریو<sup>۳</sup> و همکاران (2005) نیز با تلفیق GIS و DP<sup>۴</sup>، روشی برای تعیین مسیر خط نیرو ارائه کردند. در این روش، هزینه احداث خط از مبدأ تا پیکسل‌های مختلف به صورت تجمعی محاسبه می‌شود و داده‌های گوناگونی نظیر هزینه عبور از پیکسل‌های همسایه به پیکسل مورد نظر ذخیره‌سازی می‌گردد. این روش بسیار زمان‌بر و نیازمند حافظه ذخیره‌سازی بالایی است.

اگرچه روش پیشنهادی آنها موضوع مورد بحث را به لحاظ نظری حل می‌کند ولی برای اجرا در پروژه‌های واقعی مناسب به نظر نمی‌رسد. کومار و هیدوز<sup>۵</sup> (1995) روشی را با استفاده از دو مدل برای تعیین مسیر خط نیرو ارائه کردند. در این روش ابتدا با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی<sup>۶</sup> مسیری تقریبی مشخص می‌شود و با توجه به آن، منطقه مورد مطالعه محدود می‌گردد. سپس مدل جریان شبکه با حداقل هزینه اجرا می‌گردد و مسیر بهینه تعیین می‌شود. با توجه به اینکه مسیر پیکسل به پیکسل و براساس تابع هزینه مشخص می‌شود، ممکن است تغییر جهت‌های زیادی در طول مسیر اتفاق بیفتد؛ در حالی که مسیر خط انتقال نیرو بایستی تا حد ممکن مستقیم باشد. افزون بر این، در روش پیشنهادی آنها تنها به عوامل اقتصادی توجه شده و تأثیرات زیست‌محیطی مدنظر قرار نگرفته است. گروسارت<sup>۷</sup> و همکاران (2009) روش جدیدی را برای مسیریابی خطوط انتقال برق ارائه کردند که در آن امکان اعمال نظر مردم و نهادهای مرتبط با این امر فراهم می‌شود. در این روش از سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط GIS بهره گرفته شده است. باگلی<sup>۸</sup> و همکاران (2011) برای تعیین مسیر خطوط

1. Sumic
2. West
3. Monterio
4. Dynamic Programming
5. Kumar, Hirose
6. Non-linear Programming Model
7. Grossardt
8. Bagli

مسئله نیز همچون بسیاری از مسائل چندهدفه، ممکن است اهداف با یکدیگر سازگاری نداشته باشند. در این موارد پاسخی که با توجه به یکی از اهداف به‌عنوان راه‌حل بهینه تعیین می‌شود، ممکن است از دید اهداف دیگر راه‌حل مورد قبولی نباشد. در این مسائل کوشش می‌شود. به‌جای یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌ها ارائه گردد، به‌طوری‌که هر یک از آنها بتواند بین اهداف مختلف توازن نسبی برقرار کند. با توجه به اینکه ترکیب GIS و الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای تعیین مسیرهای بهینه خطوط انتقال نیرو، تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است، لذا چگونگی و مزایای ترکیب فوق در این مقاله مدنظر قرار گرفت. در روش پیشنهادی، امکان توجه هم‌زمان به اهداف و معیارهای متعدد اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی به‌صورت مجزا در مسیریابی خطوط انتقال فراهم گردیده است؛ در حالی که در تحقیقات پیشین غالباً کلیه معیارها به صورت یک هدف با هم ترکیب شده‌اند.

در ادامه مقاله، پس از توضیح مختصری در مورد روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، عوامل مؤثر در تعیین مسیر مناسب برای خطوط انتقال نیرو، مشخص شده است و کدگذاری مسئله برای حل با روش NSGA-II انجام می‌شود و دو هدف برای مسئله بهینه‌یابی تعریف می‌گردد؛ که یکی از آنها مربوط به هزینه و دیگری مربوط به تأثیرات زیست‌محیطی است. برای تأمین شرایط مورد نیاز در مسیر پیشنهادی، نظیر حفظ فاصله مناسب بین دو دکل متوالی، قیدهایی نیز در نظر گرفته شده است. سپس نتایج حاصل از تغییر پارامترهای مختلف در مسئله، ارائه شده و مقایسه‌ای بین سه مسیر از مسیرهای بهینه متعدد، صورت گرفته و در پایان مقاله نیز نتیجه‌گیری کلی از تحقیق آورده شده است.

نیروی ۱۳۲ کیلوولت در کشور ایتالیا، از تلفیق آنالیز کم‌هزینه‌ترین مسیر<sup>۱</sup> با ارزیابی چندمعیاره<sup>۲</sup> استفاده کردند. در تحقیق ایشان براساس عوامل مؤثر در مسیریابی، یک سطح هزینه محاسبه شده که در آن ارزش هر پیکسل با توجه به ویژگی‌های آن به‌دست آمده است. سپس مسیرهای مختلف برای حداقل‌سازی این هزینه تعیین شده‌اند. برای مقایسه و رتبه‌بندی مسیرهای پیشنهادی، معیارهای مختلفی با وزن‌های متفاوت در نظر گرفته شده و امتیاز نهایی هر مسیر با روش ترکیب خطی وزن‌دار تعیین گردیده است. کی‌یو<sup>۳</sup> و همکاری‌اش (2004) مقاله‌ای را با نام «طراحی خطوط انتقال نیرو» براساس 3D GIS منتشر کردند. در این تحقیق براساس GA دانش‌مبنا و استفاده از داده‌های DEM و سایر اطلاعات مکانی، مسیر خطوط انتقال نیرو بهینه می‌شود. اگرچه نکات ارزشمندی در تحقیق مذکور وجود دارد، با این‌حال مسئله بهینه‌سازی به‌صورت یک هدفه حل شده است و تلفیق کلیه عوامل مؤثر با یکدیگر منجر به خنثی شدن اثر برخی از آنها به‌وسیله دیگری می‌گردد.

در ایران نیز استفاده از GIS برای تعیین مسیر بهینه خطوط انتقال نیرو مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، احمدی (2003) پس از آماده‌سازی، وزن‌دهی و تلفیق نقشه‌های مختلف نظیر راه‌های دسترسی، شیب زمین و مناطق ممنوعه و تبدیل آن به نقشه‌ای واحد، با الگوریتم دایکسترا به مسیریابی خطوط انتقال برق پرداخت. در روش وی فقط یک مسیر متشکل از پیکسل‌های به‌هم پیوسته به‌عنوان نتیجه ارائه شده و تعداد و مکان دکل‌ها و همچنین هزینه احداث مسیر مورد نظر مشخص نشده است. در تحقیق نجفی و همکاری‌اش (2009) در برق منطقه‌ای اصفهان نیز الگوریتم دایکسترا برای تعیین مسیر بهینه خطوط انتقال نیرو مورد استفاده قرار گرفته و به حداقل رساندن طول و هزینه مسیر مدنظر بوده است.

همان‌گونه که پیش از این نیز اشاره شد، مسیریابی خط انتقال نیرو مسئله‌ای چندهدفه است. در این

1. Least cost path analysis (LCPA)
2. Multi-criteria evaluation (MCE)
3. Qiu

## ۲- مواد و روش‌ها

به دلیل اینکه در این تحقیق به حل مسئله‌ای چندهدفه پرداخته خواهد شد، در این قسمت ابتدا به بیان ریاضی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه پرداخته می‌شود و سپس مروری بر انواع الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه انجام می‌گیرد و الگوریتم <sup>1</sup> NSGA-II به عنوان روشی انتخابی برای تحقیق حاضر به طور مختصر توضیح داده می‌شود. در ادامه روش پیشنهادی و مراحل آن ارائه می‌گردد.

### ۲-۱- بیان ریاضی بهینه‌سازی چندهدفه

در حالت کلی دو روش برای بهینه‌سازی چندهدفه وجود دارد (Konak et al., 2006). در روش نخست توابع هدف مختلف با هم ترکیب و در نهایت تبدیل به یک هدف می‌شوند و یا کلیه اهداف به جز یکی از آنها به صورت قید در نظر گرفته می‌شوند. در عمل، انتخاب وزن مناسب برای هر یک از هدف‌ها به منظور ترکیب آنها و با تعیین مقداری که بتوان به کمک آن، هدف را تبدیل به قید کرد، کار دشواری است. در این موارد تنها یک جواب برای مسئله ارائه می‌شود. در روش دوم، کلیه راه‌حل‌های بهینه پاره‌تو یا زیرمجموعه‌ای از آن تعیین می‌شود. در اغلب موارد، تعیین راه‌حل‌های بهینه پاره‌تو به مراتب بر ارائه یک جواب تنها ارجحیت دارند. به همین دلیل در تحقیق حاضر نیز تعیین این راه‌حل‌ها مورد توجه قرار گرفته است (Konak et al., 2006) مسئله کمینه‌سازی چند هدفه با تعداد  $K$  هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

اگر بردار  $n$  بعدی  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  بردار متغیرهای تصمیم‌گیری در فضای جواب  $X$  باشد، بردار  $x^*$  جواب بهینه خواهد بود، در صورتی که بتواند  $K$  تابع هدف شامل  $Z(X^*) = \{Z_1(X^*), \dots, Z_n(X^*)\}$  را کمینه کند. فضای جواب عموماً با قیدهایی نظیر  $g_j(x^*) = b_j$  (به ازای  $j = 1, \dots, m$ ) محدود می‌شود (Konak et al., 2006). معمولاً به علت تعارضات موجود در بین اهداف مختلف چنین پاسخی دست‌یافتنی نیست (Asgarpour, 2008). برای حل مسئله چندهدفه،

می‌توان مجموعه‌ای از جواب‌ها را تعیین کرد، به طوری که هر یک از آنها به وسیله جواب‌های دیگر مغلوب نشود و اهداف مختلف را در حد مورد قبولی تأمین کند.

اگر لازم باشد که تمام توابع هدف مسئله حداقل شوند، جواب  $x$  بر جواب دیگری نظیر  $y$  غالب است ( $x < y$ )، اگر و تنها اگر در هیچ یک از توابع هدف بدتر از  $y$  نباشد ( $x \leq z_i(y), i = 1, \dots, K$ ) و همچنین حداقل در یکی از توابع بهتر از  $y$  باشد ( $z_j(x) < z_j(y)$ ). جوابی که به وسیله جواب‌های دیگر در فضای جواب مغلوب نشود، جزو جواب‌های بهینه پاره‌تو خواهد بود.

کلیه پاسخ‌های غیرمغلوب در  $X$  مجموعه بهینه پاره‌تو و مقادیر توابع هدف به ازای یک مجموعه بهینه پاره‌تو، جبهه پاره‌تو، نامیده می‌شوند. مجموعه بهینه پاره‌تو، مجموعه‌ای از راه‌حل‌هایی هستند که هر یک از آنها به وسیله راه‌حل‌های دیگر مغلوب نمی‌شوند. هدف اصلی در حل مسئله چندهدفه در واقع، تعیین مجموعه بهینه پاره‌تو است (Konak et al., 2006).

### ۲-۲- روش‌های مختلف بهینه‌سازی چندهدفه

الگوریتم ژنتیک <sup>۲</sup> (GA) روشی جمعیت‌مبنا<sup>۳</sup> است و می‌تواند روش مناسبی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه باشد. با هر بار اجرای آن، مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها تعیین می‌شوند که ممکن است تعدادی از آنها غیرمغلوب<sup>۴</sup> باشند. با تکرار اجرای الگوریتم، راه‌حل‌ها به سمت راه‌حل‌های بهینه همگرا می‌شوند. در GA امکان بررسی هم‌زمان قسمت‌های مختلف فضای جواب وجود دارد. تاکنون روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی چندهدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده که تفاوت آنها اغلب در نحوه تعریف ضوابط گزینش و توابع برازندگی است. به دلیل گستردگی مباحث مربوط به

1. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
2. Genetic Algorithm
3. Population-based
4. Non-dominated

مسیریابی خطوط انتقال نیرو با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه

در این تحقیق انتخاب شد. مزایای عمده این روش سرعت بالا، وجود نخبه‌گرایی، عدم نیاز به جمعیت خارجی و سهولت نسبی پیاده‌سازی است. تنها عیب روش فوق این است که فاصله ازدحام صرفاً در فضای هدف تعریف می‌شود. در صورت نیاز امکان تعریف آن در فضای جواب نیز وجود دارد.

الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه، تنها خلاصه‌ای از خصوصیات، مزایا و معایب برخی از الگوریتم‌های معروف در این زمینه در جدول ۱ آورده شده است (Konak et al., 2006; Deb, 2001).

از بین روش‌های ژنتیک چند هدفه مختلف که در جدول ۱ آمده است، روش NSGA-II برای پیاده‌سازی

جدول ۱. برخی از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

الگوریتم	مکانیسم تنوع	نخبه‌گرایی <sup>۱</sup>	جمعیت خارجی	مزایا	معایب
VEGA	برازش هر کدام از زیرجمعیت‌ها با توجه به هدف متفاوتی ارزیابی می‌شود	خیر	خیر	ساده‌ترین MOGA که اجرا شده	گرایش جواب‌ها به سمت بهینه هر هدف
MOGA	رتبه‌بندی پاره‌تو	تسهیم برازش <sup>۲</sup> با پارامتر موقعیتی <sup>۳</sup>	خیر	توسعه ساده GA تک‌هدفه	کند بودن همگرایی و وابستگی به اندازه پارامتر موقعیتی
WBGA	میانگین وزن‌دار اهداف ( نرمال‌شده)	پارامتر موقعیتی وزن‌های از پیش تعیین شده	خیر	توسعه ساده GA تک‌هدفه	مشکلاتی در مسائل با فضای نامحدوب برای تابع هدف
NPGA	فاقد اختصاص برازش، انتخاب مسابقه‌ای	شمارشگر موقعیتی در انتخاب مسابقه‌ای	خیر	فرایند انتخاب بسیار ساده	وابستگی به اندازه پارامتر موقعیتی و نیاز به تعیین پارامتر انتخاب مسابقه‌ای
PESA	فاقد اختصاص برازش	تراکم بر مبنای سلول	نخبه محض	سهولت اجرا و کارایی محاسبات	وابستگی کارایی به اندازه سلول
PAES	جایگزینی والد با فرزند غالب	تراکم بر مبنای سلول	بله	جهش با استراتژی تپه‌نوردی، سهولت اجرا و کارایی محاسبات	وابستگی کارایی به اندازه سلول و جمعیت‌مبنا نبودن
NSGA	رتبه‌بندی بر اساس جواب‌های غیرمغلوب	تسهیم برازش با پارامتر موقعیتی	خیر	همگرایی سریع	وابستگی به اندازه پارامتر موقعیتی
NSGA-II	رتبه‌بندی براساس جواب‌های غیر مغلوب	فاصله ازدحام <sup>۴</sup>	بله	تک‌پارامتری	کارکرد فاصله ازدحام فقط در فضای هدف
SPEA	رتبه‌بندی بر اساس	دسته‌بندی برای کاهش جمعیت خارجی	بله	عدم نیاز به پارامتر برای دسته‌بندی	الگوریتم دسته‌بندی پیچیده

<sup>1</sup> Elitism

<sup>2</sup> Fitness sharing

<sup>3</sup> Niching

<sup>4</sup> Crowding Distance

$R_t = P_t \cup Q_t$	combine parent and offspring population
F = fast non-dominated-sort ( $R_t$ )	
F = ( $F_1, F_2, \dots$ ) all nondominated fronts of $R_t$	
$P_{t+1} = \phi$ and $i = 1$	
Until $ P_{t+1}  +  F_i  \leq N$	until the parent population is filled
Crowding distance assignment ( $F_i$ )	calculate crowding distance in $F_i$
$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$	include $i$ th non-dominated front in the parent pop
$i = i + 1$	check the next front for inclusion
Sort ( $F_i < n$ )	sort in descending order using $\llcorner n$
$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1:(N -  P_{t+1} )]$	
$Q_{t+1} = \text{make new pop } (P_{t+1})$	use selection, crossover, and mutation to create a new population $Q_{t+1}$
$t = t + 1$	increment the generation counter

شکل ۱. حلقه اصلی الگوریتم NSGA-II (Deb et al., 2002)

کروموزوم‌ها از سطح یک تا سطحی که تعداد آنها به N برسد و جمعیت  $P_{t+1}$  را تشکیل دهند انتخاب و بقیه حذف می‌شوند. برای تولید  $Q_{t+1}$  از عملگر ترکیب و جهش استفاده می‌شود.

#### ۲-۳- روش NSGA-II

روش تکاملی چندهدفه‌ای با سرعت محاسباتی بالاست که دب<sup>۱</sup> (2001; 2002) آن را ارائه کرده است. این روش برای برطرف کردن برخی از مشکلات، نظیر پیچیدگی محاسباتی و همچنین بهره‌گیری از قابلیت نخبه‌گرایی ارائه گردید. استفاده از نخبه‌گرایی باعث می‌شود که مقدار برآزش بهترین کروموزوم در نسل‌های متوالی کاهش نیابد. در این روش برای حفظ تنوع کروموزوم‌ها فاصله ازدحام پیشنهاد شده است، که در انتخاب مسابقه‌ای از آن استفاده می‌شود.

#### ۲-۴- روش پیشنهادی برای مسیریابی چندهدفه خط انتقال نیرو

هدف مطالعه حاضر، تعیین مسیر بهینه برای احداث خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت بین دو نقطه مشخص با توجه به معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. بخشی از شهرستان مرودشت واقع در جنوب ایران برای انجام مطالعه موردی انتخاب شده است. مساحت منطقه مورد مطالعه حدود ۶۰ کیلومترمربع و فاصله اقلیدسی بین نقاط شروع و پایان ۸/۵ کیلومتر است. برای تأمین معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مربوط به مسیر خط انتقال نیروی مناسب، قوانینی به صورت زیر تعریف شده است:

- (الف) مجموع طول‌های بین دو دکل مجاور و - به عبارتی طول کل مسیر - کمینه شود.  
(ب) فاصله بین دو دکل مجاور در بازه معینی قرار

حلقه اصلی الگوریتم NSGA-II در شکل ۱ نشان داده شده است (Deb et al., 2002). ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی ( $P_0$ ) تولید می‌شود. برای تولید جمعیت فرزندان ( $Q_0$ )، به اندازه N از روش انتخاب مسابقه‌ای و عملگرهای ترکیب و جهش استفاده می‌گردد. با ترکیب P و Q، جمعیت R با اندازه  $2N$  تشکیل می‌شود ( $R_t = P_t \cup Q_t$ ) و رتبه‌بندی غیرمغلوب روی آن اعمال می‌گردد و به هر کروموزوم یک مقدار برآزندگی براساس سطح رتبه اختصاص داده می‌شود (۱ برای بهترین سطح).

1. Deb

جدیدی مورد موافقت قرار می‌گیرد، باید آن را به چندین قسمت مستقیم تقسیم کرد. در هر قسمت، خطوط برق به وسیله دکل‌های آویزی<sup>۱</sup> نگهداری می‌شوند. این دکل‌ها وزن خطوط برق را تحمل می‌کنند، اما نمی‌توانند هیچ‌گونه نیروی افقی را تحمل کنند. در انتهای هر قسمت، دکل‌های کششی<sup>۲</sup> قرار داده می‌شود. دکل‌های کششی مستحکم‌تر از دکل‌های آویز هستند و می‌توانند در مقابل نیروهای افقی مقاومت کنند، اما هزینه بالاتری دارند (Ranyard, Wreirf, 1967).

در پژوهش حاضر تعداد دکل‌های کششی که در واقع تعداد تغییر راستای خط انتقال را نشان می‌دهد، به وسیله کاربر معرفی می‌شود. اما محل آنها که در واقع مسیر خط را مشخص می‌کند، با انجام بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم NSGA-II و براساس توابع هدف و قیدهای تعریف‌شده، تعیین می‌گردد.

مکان مناسب برای دکل‌های آویز در هر قسمت (بین هر دو دکل کششی متوالی) نیز براساس معیارهای تعیین‌شده، به وسیله برنامه مشخص می‌شود.

در روش NSGA-II متداول، جمعیت اولیه به صورت تصادفی تعیین می‌گردد. اما در این تحقیق، جمعیت اولیه فقط در مناطق مجاز تولید شده‌اند. برای تولید جمعیت فرزندان در نسل‌های بعدی از روش انتخاب مسابقه‌ای، ترکیب و جهش استفاده شده است. مراحل اصلی روش پیشنهادی این تحقیق برای مسیریابی خط انتقال در شکل ۲ نشان داده شده است.

گیرد (کمتر از مقدار حداکثر تعیین‌شده و بیشتر از مقدار حداقل تعیین‌شده).

ج) اختلاف ارتفاع در دکل مجاور از حد معینی کمتر باشد.

د) تعداد دکل‌های کششی تا حد ممکن کم باشد.

ه) شیب زمین در محل استقرار دکل تا حد ممکن کم باشد.

و) ارتفاع زمین در محل استقرار دکل تا حد ممکن کم باشد.

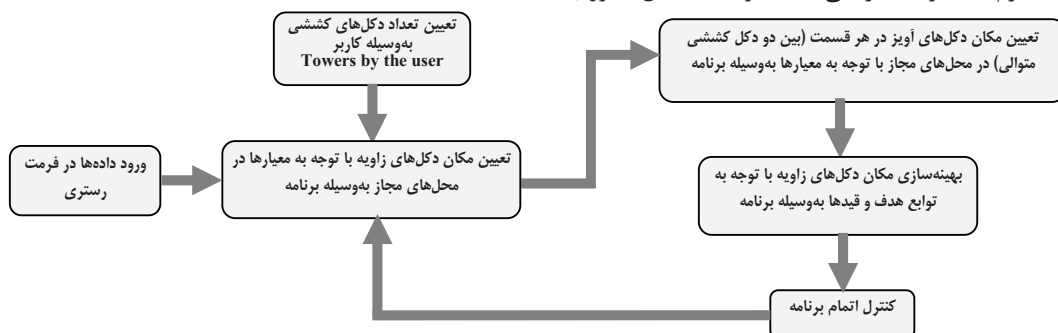
ز) برای دسترسی مناسب، فاصله محل استقرار دکل از جاده تا حد ممکن کم باشد.

ح) دکل‌ها داخل محدوده یا در نزدیکی مناطق با خطر بالا (نظیر گسل یا مسیل) و همچنین مناطق محافظت‌شده محیط زیست با حساسیت زیاد قرار نگیرند.

ط) طول مسیر عبوری از داخل مناطق با حساسیت کمتر نظیر جنگل بایستی کمینه شود.

برای تأمین معیارهای گفته‌شده، اهداف و قیدهایی برای مسئله بهینه‌سازی تعریف شد که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. همچنین داده‌های مکانی مورد نیاز نظیر شیب، ارتفاع، فاصله از جاده و نوع خاک جمع‌آوری و با فرمت رستری تهیه شدند. با توجه به مقیاس لایه‌های اطلاعاتی به کار رفته، ابعاد پیکسل ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد. مجموعه داده‌های آماده‌سازی‌شده، برای انجام برخی از آنالیزها وارد محیط GIS گردیدند.

لازم به ذکر است زمانی که مسیر خط انتقال نیروی



شکل ۲. مراحل اصلی روش پیشنهادی برای مسیریابی خط انتقال نیرو

## 1. Suspension Tower

## ۲-۴-۱- کدگذاری متغیرهای تصمیم

در الگوریتم ژنتیک، متغیرها به صورت اعداد حقیقی یا باینری کدگذاری می‌شوند و کروموزوم را تشکیل می‌دهند. در روش پیشنهادی، از اعداد حقیقی در بازه معین برای نمایش متغیرهای تصمیم استفاده شده است. برای نشان دادن یک مسیر با  $n$  دکل کششی، یک کروموزوم متشکل از  $2n$  ژن در نظر گرفته شده است. بنابراین کروموزوم به صورت زیر تعریف شده است:

$$A = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{2n-1}, \lambda_{2n}] = [x_{p_1}, y_{p_1}, \dots, x_{p_n}, y_{p_n}]$$

کروموزوم:  $\Lambda$

ژن  $i$  ام:  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, 2n$ )

مختصات دکل کششی  $i$  ام:  $(x_{p_i}, y_{p_i})$  ( $i = 1, \dots, n$ )

$$x_0 \leq x_{p_i} \leq x_{\max}, \forall i = 1, \dots, n$$

$$y_0 \leq y_{p_i} \leq y_{\max}, \forall i = 1, \dots, n$$

$(x_0, y_0), (x_{\max}, y_{\max})$  به ترتیب حد بالا و پایین

منطقه جست‌وجو هستند.

## ۲-۴-۲- تعریف توابع هدف و قیدها

در نوشتار حاضر، بهینه‌سازی چندهدفه دارای دو تابع هدف و چند قید است که معیارهای مسیریابی خط انتقال نیرو را در بر می‌گیرند.

## ۲-۴-۲-۱- تابع هدف یکم

تابع هدف یکم مربوط به هزینه‌های خط انتقال نیروی جدید است. برای تعریف این تابع لازم است به کلیه عواملی که در میزان هزینه مؤثرند، توجه شود. هزینه خط انتقال می‌تواند شامل هزینه کابل‌ها و دیگر تجهیزات وابسته به طول خط انتقال نیرو، هزینه دسترسی (تابع فاصله از جاده)، هزینه دکلهای آویز، هزینه دکلهای کششی، هزینه مربوط به فونداسیون (وابسته به ارتفاع و شیب) و هزینه اخذ زمین و پاکسازی آن باشد. برای بهینه‌سازی مسیر خط انتقال براساس هزینه، بایستی تابع هدف یکم و به عبارتی

مجموع هزینه‌های خط انتقال نیرو کمینه شود.

باید توجه داشت حتی اگر تنها عامل هزینه در بهینه‌سازی مسیر مدنظر قرار گیرد، باز هم تعیین مسیر بهینه دشوار است زیرا در مورد هر یک از عواملی که هزینه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، معیار متفاوتی برای بهینه بودن مسیر در نظر گرفته می‌شود و لازم است تعاملی بین آنها به وجود آید. به عنوان نمونه وقتی به هزینه طول کابل توجه می‌شود، مسیر مستقیم بین دو نقطه ابتدا و انتها، مسیر مناسبی خواهد بود؛ درحالی‌که وقتی به کاربری و شیب زمین توجه می‌شود، ممکن است مسیر بهینه مسیری غیرمستقیم باشد.

هزینه‌های مختلف به صورت زیر در تعریف تابع هدف یکم به کار رفته‌اند:

$$F_1: \text{Minimize } C_T = C_l + C_{rd} + C_{st} + C_s + C_h + C_{to} + C_{lp}$$

$C_l$ : هزینه طول کابل وابسته به طول مسیر

$C_{rd}$ : هزینه دسترسی وابسته به فاصله از جاده

$C_{st}$ : هزینه مربوط به نوع خاک

$C_s$ : هزینه مربوط به شیب

$C_h$ : هزینه مربوط به ارتفاع

$C_{to}$ : هزینه دکل بسته به نوع آن

$C_{lp}$ : هزینه اخذ زمین

## ۲-۴-۲-۲- تابع هدف دوم

تابع هدف دوم مربوط به تأثیرات زیست‌محیطی خط انتقال نیروی جدید است. برای بهینه‌سازی مسیر خط انتقال نیرو به منظور کاهش تأثیرات منفی زیست‌محیطی آن، به هر منطقه حساس زیست‌محیطی، یک مقدار براساس میزان حساسیت آن اختصاص داده شد (در این تحقیق، لایه اطلاعاتی مربوط به محیط زیست شبیه‌سازی شده است). هر چه حساسیت منطقه بالاتر باشد، مقدار اختصاص داده شده نیز بیشتر است. طول خط عبوری از هر نقطه محاسبه و مجموع تأثیرات منفی با توجه به رابطه زیر کمینه می‌شود:



شرایط فنی مورد نیاز برای خط انتقال نیرو با قیدهای فوق تأمین می‌شوند.

### ۳- نتایج

با در نظر گرفتن مقادیر مختلفی برای تعداد دکل‌های کششی (تعداد تغییر جهت)، تعداد نسل‌ها و اندازه جمعیت اولیه، الگوریتم چندین بار اجرا شد. نتایج نشان داد که هزینه احداث خط انتقال نیرو با افزایش تعداد دکل‌های کششی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش هزینه، بالاتر بودن هزینه دکل‌های کششی در مقایسه با دکل‌های آویز و نیز افزایش طول کابل با افزایش تعداد تغییر راستاها (نقاط شکست) در مسیر خطوط انتقال نیرو است. البته در برخی از موارد این افزایش هزینه می‌تواند از طریق عبور خط انتقال نیرو از نواحی کم‌هزینه‌تر جبران شود. همچنین مشاهده شد که تأثیرات منفی زیست‌محیطی یا افزایش تعداد تغییر راستاها کاهش می‌یابد. برای هر بار اجرا دو نمودار ارائه شده است. نمودار اول مسیرهای تعیین‌شده در فضای جواب و نمودار دوم جبهه پاره‌تو در فضای هدف را نشان می‌دهد.

شکل ۳ (الف) مسیرهای مختلف برای خط انتقال نیرو با یک دکل کششی، تعداد نسل ۲۰ و اندازه جمعیت ۱۰۰ و شکل ۳ (ب) جبهه پاره‌تو مرتبط را نمایش می‌دهد. هر نقطه در شکل ۳ (ب) مربوط به یک مسیر در جهان واقعی است. در پاسخ‌های بهینه ارائه‌شده، تعادلی بین هزینه و تأثیرات زیست‌محیطی برقرار شده است و هر تصمیم‌گیرنده می‌تواند براساس اولویت خود یکی از راه‌حل‌ها را انتخاب کند.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با دو دکل کششی، تعداد نسل ۲۰ و اندازه جمعیت ۱۰۰ در شکل ۴ نشان داده شده است.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با سه دکل کششی، تعداد نسل ۴۰ و اندازه جمعیت ۲۰۰ در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$F_2 : \text{Minimize } Im_T = \sum I_i * V_i$$

$Im_T$ : مجموع تأثیرات زیست‌محیطی

$I_i$ : طول خط نیرو انتقال که از ناحیه نام عبور کرده

است.

$V_i$ : مقدار ناحیه نام با توجه به حساسیت آن

### ۲-۲-۳- قیدها

محل دکل‌های آویز در هر قسمت با توجه به قیدهای زیر انتخاب شده است:

- حداکثر فاصله بین دو دکل متوالی، کمتر از ۷۰۰ متر باشد:

$$|X_i - X_{i-1}| \leq D_{\max} \quad (i = 2, 3, \dots, n+1)$$

- حداقل فاصله بین دو دکل متوالی، بیشتر از ۳۰۰ متر باشد؛

$$|X_i - X_{i-1}| \geq D_{\min} \quad (i = 2, 3, \dots, n+1)$$

- اختلاف ارتفاع بین دو دکل متوالی بایستی کمتر از حد معینی باشد (در این تحقیق، حداکثر اختلاف ارتفاع ۷۰ متر در نظر گرفته شده است):

$$\text{Height difference} = |z_i - z_{i-1}| \leq H_{\max} \quad (i = 2, 3, \dots, n+1)$$

- محل دکل در مناطق دارای محدودیت و یا بسیار حساس واقع نشود.

در روابط فوق:

$X_i = (x_i, y_i, z_i)$ : مکان دکل در هر قسمت را

مشخص می‌کند.

$z_i$ : ارتفاعی است که با استفاده از ارتفاع دکل و

DTM به دست می‌آید.

$|X_i - X_{i-1}|$ : فاصله دو دکل متوالی است که به

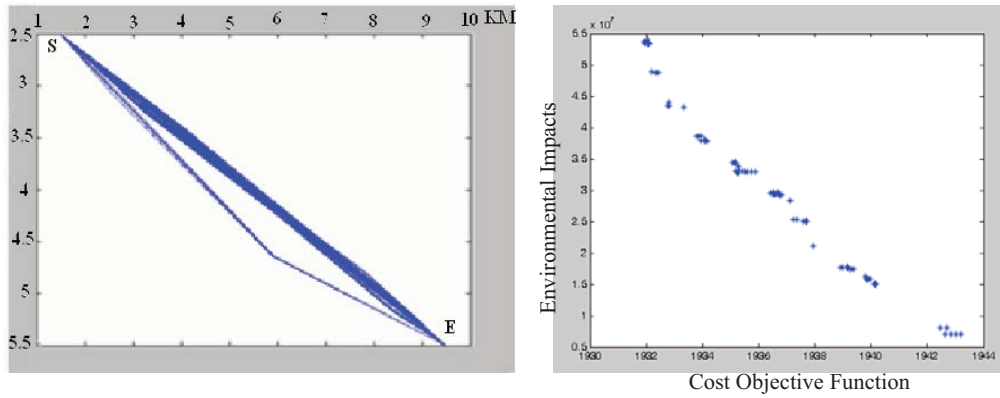
صورت زیر محاسبه می‌شود:

$n$ : تعداد دکل‌ها در هر قسمت

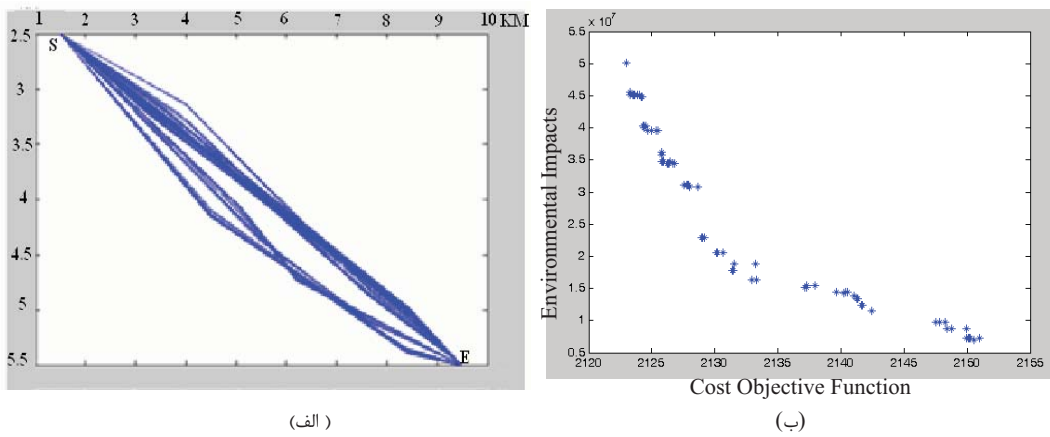
$X_1$ : نقطه شروع در هر قسمت

$X_{n+1}$ : نقطه پایان در هر قسمت

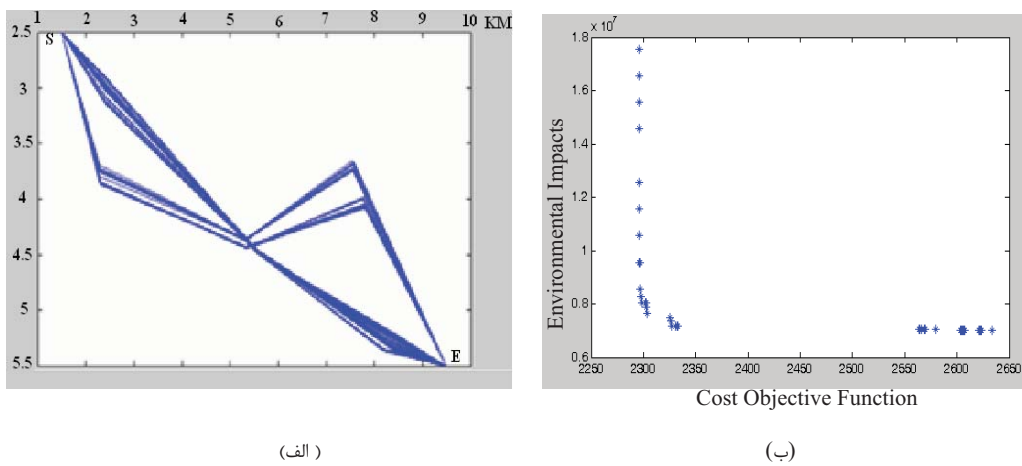
سارا بهشتی فر و همکاران



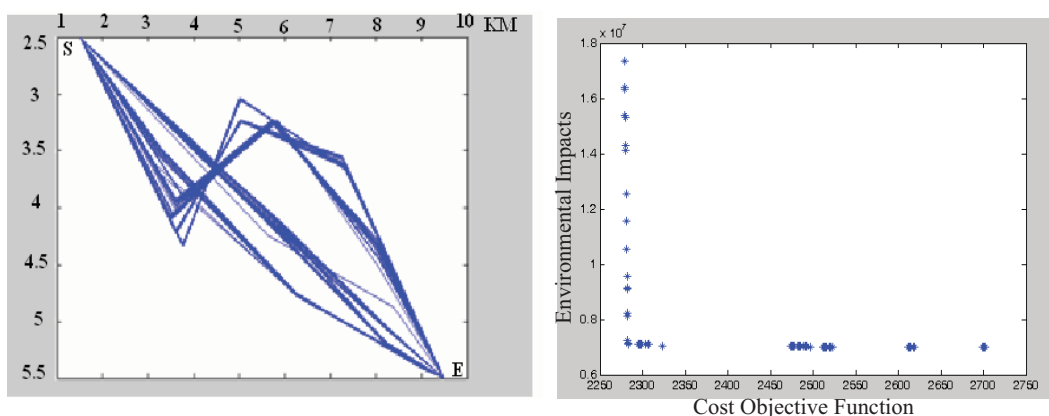
شکل ۳. نتایج اجرا با یک دکل کششی (الف) مسیرهای خطوط انتقال نیرو؛ (ب) مقادیر توابع هدف برای هر مسیر



شکل ۴. نتایج اجرا با دو دکل کششی (الف) مسیرهای خطوط انتقال نیرو؛ (ب) مقادیر توابع هدف برای هر مسیر



شکل ۵. نتایج اجرا با سه دکل کششی (الف) مسیرهای خطوط انتقال نیرو؛ (ب) مقادیر توابع هدف برای هر مسیر



شکل ۶. نتایج اجرا با سه دکل کششی (الف) مسیره‌های خطوط انتقال نیرو؛ (ب) مقادیر توابع هدف برای هر مسیر (تعداد نسل ۲۰۰)

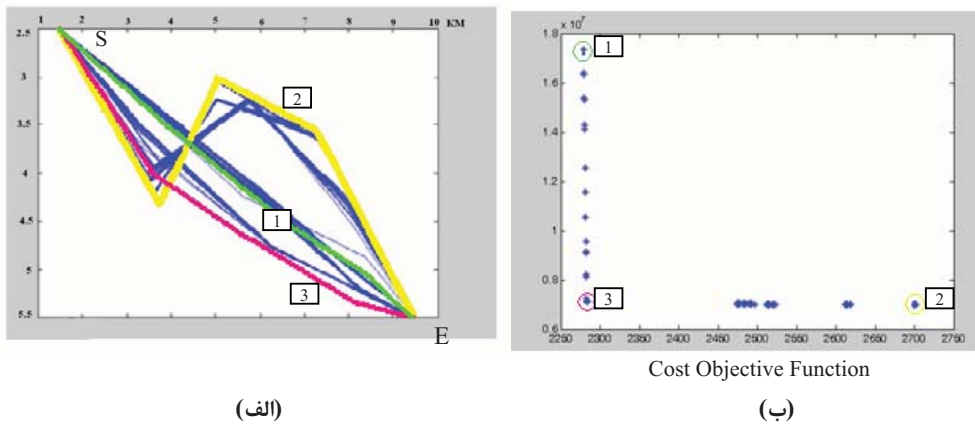
مسیره‌های مرتبط در شکل ۷ و مشخصات آنها در جدول ۲ نشان داده شده است؛ این مسیره‌ها در شکل ۸ نیز مشخص شده‌اند.

لازم به یادآوری است که در این تحقیق به منظور بررسی صحت عملکرد الگوریتم، مناطق حفاظت‌شده متعددی با مقادیر حساسیت متفاوت به طور اغراق آمیزی شبیه‌سازی شده‌اند، که در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

در تمامی این مسیره‌ها تعداد نسل‌ها، اندازه جمعیت و تعداد دکل‌های کششی یکسان در نظر گرفته شده است. مسیر ۱ (شکل ۷) که مربوط به نقطه ۱ در جبهه پاره‌تو است، طول کوتاه‌تر و هزینه کمتر، اما تأثیرات منفی زیست‌محیطی بالایی دارد. این مسیر از داخل منطقه‌ای که حساسیت آن ۵۰ است، عبور کرده است. اگرچه تعداد دکل‌های کششی در مسیره‌های ۱ و ۲ یکسان است، مسیر ۲ به دلیل داشتن طول بیشتر هزینه بالاتری دارد. طول مسیر ۳ کمی بیشتر از مسیر ۱ است، اما در مقابل تأثیرات منفی زیست‌محیطی آن به مراتب کمتر از مسیر ۱ است، زیرا میزان عبور آن از منطقه با حساسیت ۵۰ کمتر است. مسیر ۲ اصلاً از منطقه با حساسیت ۵۰ عبور نکرده و تأثیرات منفی زیست‌محیطی اندک آن به دلیل عبور از منطقه با حساسیت ۱۰ بوده است.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم با مقادیر مختلف برای تعداد نسل‌ها (۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰) و اندازه جمعیت (۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰) نشان داد که وقتی یک یا دو دکل کششی وجود دارد، با ۲۰ بار تولید نسل و اندازه جمعیت ۱۰۰ می‌توان به راه‌حل‌های مناسب و مورد قبولی دست یافت. وقتی تعداد نسل‌ها و اندازه جمعیت به ترتیب بیش از ۲۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود، راه‌حل‌های یکسانی به دست می‌آید، اما زمانی که مسیره‌هایی با سه دکل کششی تعیین می‌شوند، لازم است تعداد نسل‌ها و اندازه جمعیت به بیش از مقادیر مذکور افزایش یابد. با در نظر گرفتن تعداد نسل ۴۰ و اندازه جمعیت ۲۰۰ می‌توان راه‌حل‌های مناسبی به دست آورد. با این حال الگوریتم برای سه دکل کششی با تعداد نسل ۲۰۰ و اندازه جمعیت ۱۰۰۰ نیز اجرا و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که الگوریتم با ۴ و ۵ دکل کششی نیز اجرا شد، لیکن مسیره‌های به دست آمده با سه دکل کششی مناسب‌تر بودند.

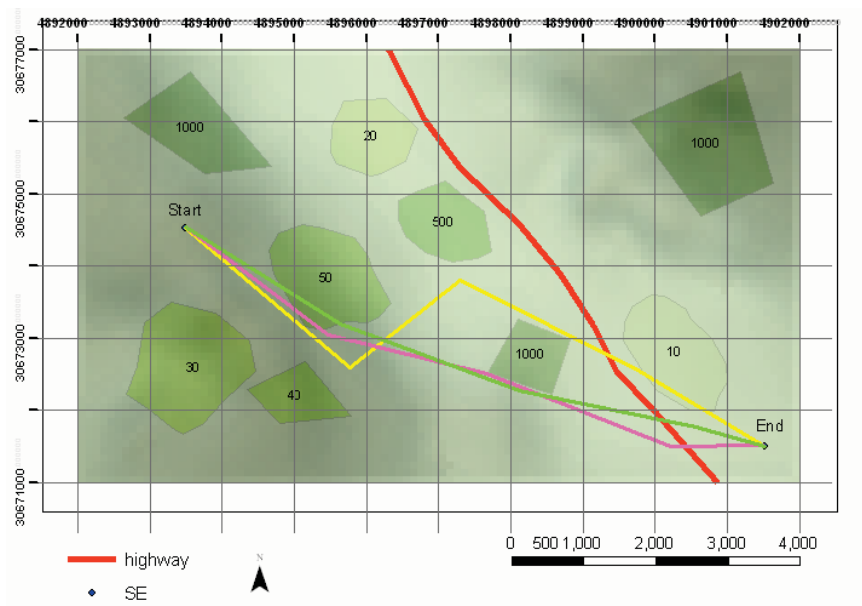
افزایش تعداد دکل‌ها به بیش از سه دکل منجر به افزایش هزینه می‌گردد بدون اینکه کاهش چشمگیری در تأثیرات منفی زیست‌محیطی به وجود آید. به منظور مقایسه مسیره‌های پیشنهادی، سه نقطه از جبهه پاره‌تو شکل ۶ انتخاب شدند. این نقاط به همراه



شکل ۷. انتخاب مسیرها از روی نتایج اجرا با سه دکل کششی، تعداد نسل ۲۰۰ و اندازه جمعیت ۱۰۰۰

جدول ۲. مقایسه سه راه‌حل حاصل از اجرای الگوریتم با سه دکل کششی، تعداد نسل ۲۰۰ و اندازه جمعیت ۱۰۰۰

شماره مسیر	طول کل مسیر (KM)	هدف یکم	هدف دوم
مسیر ۱	۸/۶۷۹۵	۲۲۷۹	۱۷۳۳۸۹۰۰
مسیر ۲	۹/۷۵۵۷	۲۷۰۱	۷۰۰۴۵۰۰
مسیر ۳	۸/۷۸۴۳	۲۲۸۳	۷۱۲۲۶۰۰



شکل ۸. مناطق حساس شبیه‌سازی شده و مسیرهای انتخابی

گرفت. می‌تواند مشکلاتی نظیر پیچیدگی محاسباتی و فقدان نخبه‌گرایی<sup>۱</sup> را که در برخی از الگوریتم‌های چند هدفه تکاملی وجود دارد، برطرف کند. در روش پیشنهادی، با تعریف اهداف و قیدهای متعدد، عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی به‌طور هم‌زمان مورد توجه قرار گرفتند و سعی شد در پاسخ‌های بهینه به‌دست آمده، تعادلی بین آنها برقرار گردد. در روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی تلاش گردید تا محل استقرار دکل از نظر فیزیکی دارای شرایط مناسبی باشد و مسیرهای پیشنهادی تا حد ممکن دارای طول کوتاه باشند و از زمین‌های با قیمت پایین عبور کنند و در عین حال تأثیرات منفی زیست‌محیطی آنها نیز کم باشد. همچنین با در نظر گرفتن قیدهایی برای اختلاف ارتفاع و نیز فاصله بین دو دکل متوالی، عوامل فنی هم مدنظر قرار گرفتند. با اختصاص مقادیر مختلف برای اندازه جمعیت، تعداد نسل‌ها و تعداد دکل‌های کششی (تعداد تغییر راستا)، الگوریتم بارها اجرا شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. ارائه مسیرهای بهینه متعدد می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان مختلف که اولویت‌های آنها برای انتخاب مسیر با یکدیگر یکسان نیست، در تصمیم‌گیری کمک کند.

#### ۵- منابع

- Ahmadi S., 2003, **Path Finding For Power Transmission Lines Using GIS**, M.Sc. Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng.
- Asgarpour M.J., 2008, **Multiple Criteria Decision Making**, (6th Edition), University of Tehran Press.
- Bagli S., Geneletti D. & Orsi F., 2011, **Routing**

1. Non-Elitism

با توجه به اینکه محل دکل‌ها به‌صورت تصادفی در فضای جست‌وجو انتخاب می‌شود، در نسل‌های اولیه پراکندگی مسیرها زیاد است. اما با بهبود پاسخ‌ها در طی بهینه‌سازی، کلیه مسیرها تقریباً به سمت خط مستقیم بین نقاط ابتدا و انتها نزدیک می‌شوند. این موضوع در مورد سه مسیر فوق که پس از اتمام بهینه‌سازی به‌دست آمده‌اند نیز صادق است.

نکته دیگری که بایستی به آن توجه داشت، این است که با تکرار روند بهینه‌سازی دیگر هیچ مسیری از داخل منطقه با حساسیت ۱۰۰۰ عبور نکرده، درحالی‌که این ناحیه کاملاً در امتداد خط واصل نقاط ابتدا و انتها قرار گرفته است (همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، این ناحیه‌ها شبیه‌سازی شده‌اند و قرار گرفتن ناحیه‌ای با حساسیت بالا در این راستا نیز عمدی و برای بررسی نتایج بهینه‌سازی بوده است).

در مورد هزینه نیز می‌توان گفت که این عامل در مورد سه مسیر فوق که دارای تعداد دکل‌های کششی یکسانی هستند، تقریباً به طول مسیر بستگی دارد، هر چند عوامل دیگری نظیر هزینه اخذ زمین نیز تا حدی آن را تحت تأثیر قرار داده است.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روشی را برای تعیین مسیر یک خط انتقال نیروی جدید به‌صورت خودکار ارائه شد. نتایج تحقیق نشان داد که GIS می‌تواند به‌گونه مناسبی با الگوریتم NSGA-II تلفیق شود و برای بهینه‌سازی مسیر مورد استفاده قرار گیرد. اطلاعات تولیدشده در محیط GIS نظیر نقشه‌های شیب و ارتفاع زمین به‌صورت لایه‌های ورودی در برنامه به‌کار رفتند. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل چند هدفه در ترکیب با GIS، مدیریت حجم بالایی از داده‌های مکانی و همچنین توجه هم‌زمان به معیارهای متعدد در مسیریابی خط انتقال نیرو را امکان‌پذیر ساخت. NSGA-II که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار

- Analysis and Multi Criteria Evaluation to Minimize Environmental Impacts**, Environmental Impact Assessment Review, Vol. 31, No. 3.
- Deb K., Pratap A., Agarwal S. & Meyarivan T., 2002, **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**, IEEE Transactions on Evolutionary computation, Vol. 6, No. 2.
- Deb K., 2001, **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, Wiley, PP. 171-252.
- Grossardt T., Bailey K. & Singh R.G., 2009, **A New Method for Public Involvement in Electric Transmission-Line Routing**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4.
- Konak A., Coitb D. W. & Smithc A. E., 2006, **Multi-objective Optimization Using genetic Algorithms**, Reliability Engineering and System Safety 91, PP. 992–1007.
- Kumar K. & Hirose N., 1995, **Optimization Using GIS: Case Study of Power-line Routing**, Japan, <http://www.mssanz.org.au/MODSIM95/Vol%201/Kumar.pdf>.
- 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, Vol. 20, No. 2.
- of Power Lines Through Least-cost Path**
- Murata, M., 1995, **A GIS Application for Power Transmission Line Siting**, Systems Engineering Center, PASCO Corporation, Tokyo, Japan.
- Najafi S., Sheikh Darani N., Eghtedarnia F. & Poor Agha Baba R., 2009, **Development of GIS Applications in Isfahan Electrical Industries**, International Power System Conference, Nov. 2009, Tehran, Iran.
- Qiu J., Bian X., & Li X., 2004, **Intelligent Design of Power Transmission Lines Based on 3D GIS**, Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, P.R. China.
- Ranyard J. C. & Wreirf A., 1967, **The Optimum Arrangement of Towers in an Electric Power Transmission Line**, The Computer Journal, 10(2), pp. 157-161.
- Singh Gill R., 2002, **Electric Transmission Line Routing Using a Decision Landscape Based Methodology**, Punjab Technical University, M. Sc. Thesis.
- Sumic Z., Venkata S. & Pistoiese T., 1993, **Automated Underground Residential Distribution Design**, Part I: Conceptual design, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 8, No. 2, PP. 637–643.
- West N.A., Dwolatzky B. & Meyer A.S., 1997, **Terrain Based Routing of Distribution Cables**, IEEE Computer Application Power, Vol. 10, No. 1, pp. 42–46.