



## مسیریابی خطوط انتقال برق با استفاده از الگوریتم NSGA-II

عبدالمطلب رستگار<sup>۱\*</sup>، علی منصوریان<sup>۲</sup>، محمد طالعی<sup>۳</sup>، دیاکو یاری<sup>۴</sup>، سارا بهشتی فرد<sup>۵</sup>

۱. مربی دانشکده فنی مهندسی علی‌آباد کتول، دانشگاه گلستان
۲. استادیار دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پژوهشکده سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۴. کارشناس ارشد فتوگرامتری دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۵. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تبریز

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۴/۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۵

### چکیده

روش‌های نوین بهینه‌سازی فرایند مسیریابی خطوط انتقال برق می‌توانند بسیاری از مسائل پیچیده‌ای را که تصمیم‌گیران مسیریابی خطوط انتقال برق با آن مواجه‌اند، حل کنند. با توجه به گستردگی عوامل درگیر در مسیریابی خطوط انتقال برق می‌توان الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه را به‌عنوان ابزاری مناسب در این زمینه در نظر گرفت. در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II و با ارائه عملگرهای ژنتیکی مناسب، به مسیریابی بهینه خط انتقال برق پرداخته شد. با نظر متخصصان صنعت برق در وزارت نیرو و برق منطقه‌ای مازندران، سه تابع هدف به‌منظور تولید مسیرهایی با ویژگی‌های F1- کمترین هزینه اقتصادی، F2- کمترین تأثیرات سوء زیست‌محیطی و اجتماعی و F3- دسترسی و نگهداری راحت از خط انتقال، طراحی شده است. اجرا و ارزیابی مدل ارائه‌شده در بستر سامانه اطلاعات مکانی (GIS) نشان داد که این مدل توانایی بالایی در بهینه‌سازی توابع هدف دارد. مدل مذکور برای مسیریابی بین دو پست برق ۴۰۰ کیلوولت ناریوران (شهر آمل) و حسن‌کیف (شهر کلاردشت) در برق منطقه‌ای مازندران اجرا شد. نتایج تحقیق، بهبود میانگین ۱۵ درصدی مقادیر توابع هدف را در مقایسه با مسیر موجود نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: مسیریابی، انتقال برق، NSGA-II، GIS.

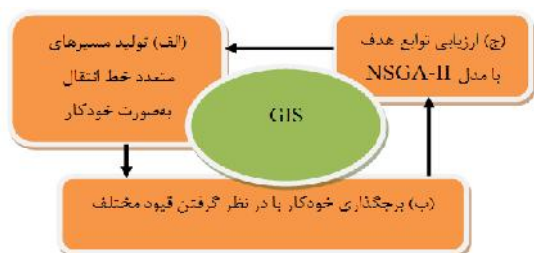
\* نویسنده مکاتبه‌کننده: استان گلستان، گنبدکاووس، بولوار سینا، کوچه ۲۱، پلاک ۸۸، تلفن: ۰۹۱۱۲۷۹۷۰۳۰

## ۱- مقدمه

مسیریابی سنتی خط انتقال جدید، پرهزینه و زمان‌بر است و نیاز به اطلاعات مکانی وسیعی دارد. در روال سنتی ابتدا با استفاده از نقشه‌های کوچک‌مقیاس، منطقه مورد نظر ارزیابی و مسیر تقریبی مشخص می‌شود، سپس با استفاده از نقشه‌های با جزئیات بیشتر و به همراه نقشه‌برداری و بازدید زمینی از منطقه، مسیر از نظر فنی ارزیابی می‌شود. در مرحله بعد با انجام محاسبات فنی و به کمک نقشه‌برداری مکان دقیق برج‌ها، مشخصات آنها تعیین می‌شود (دستورالعمل فنی و اجرایی طراحی خطوط انتقال شرکت توانیر، ۱۳۷۶). ماهیت مکان‌مند بودن عوامل تأثیرگذار بر مسیریابی، مانع از احداث مسیر مستقیم بین مبدأ و مقصد می‌شود و فرایند تصمیم‌گیری را دشوار می‌سازد. خودکارسازی فرایند مسیریابی با بهره‌گیری از اطلاعات دقیق مکانی و استفاده از دانش متخصصان در قالب سامانه اطلاعات مکانی می‌تواند در کاهش زمان، هزینه اقتصادی و کاهش فاصله زمانی بین طراحی و احداث مؤثر باشد (Yildirim & Nisanci, 2010). به‌تازگی از سامانه اطلاعات جغرافیایی و الگوریتم‌های مسیریابی - مانند کوتاه‌ترین مسیر یا الگوریتم‌های فراابتکاری - در مسائل مکانی مانند طراحی خطوط انتقال زیرزمینی برای زیرساخت‌ها و جاده‌ها استفاده شده است (Lin, Tsay & 1996). در سال ۱۹۹۶ از تصاویر ماهواره‌ای برای مشخص کردن محدوده مورد مطالعه و موقعیت محدودیت‌های زیست‌محیطی در فرایند مسیریابی خطوط انتقال برق استفاده شد و سپس به انتخاب مسیر با کوتاه‌ترین طول و کمترین تأثیرات زیست‌محیطی اقدام گردید (Vega & Sarmiento, 1996). والفندن<sup>۱</sup> (۱۹۶۷)، روش برنامه‌سازی پویا را به‌منظور مشخص کردن مکان و ارتفاع برج‌ها برای مسیری مشخص به‌طوری که کمترین هزینه اقتصادی ناشی از برج انتقال برق و ارتفاع آنها را داشته باشد،

پیشنهاد کرد. در تحقیقی دیگر، اولبریش<sup>۲</sup> (۱۹۸۱) با استفاده از روش تحقیق در عملیات و با بهره‌گیری از GIS و اطلاعات توپوگرافی در ساختار رستری با کمک روش برنامه‌ریزی غیرخطی به مسیریابی خط انتقال برق با کمترین هزینه از نظر برج‌ها و یراق‌آلات پرداخت و مسائل فنی زیادی را به‌عنوان قید در نظر گرفت. در پژوهشی دیگر با استفاده از الگوریتم دایسترا و با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی و بهره‌گیری از GIS، مسیریابی بهینه در ساختار رستری بین مبدأ و مقصد انجام شد. در این پژوهش لایه‌های شیب زمین، زمین‌شناسی، کاربری زمین، راه‌های دسترسی و لایه عوامل طبیعی در نظر گرفته شدند و با وزن‌دهی متخصصان به لایه‌ها با یکدیگر تلفیق شدند و لایه واحدی را ایجاد کردند (Ahmadi et al., 2008). در تحقیقی دیگر با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، کم‌هزینه‌ترین خطوط انتقال برق مسیریابی شدند و با استفاده از لایه‌های آماده‌سازی شده در ساختار رستری، میزان تأثیرگذاری انتخاب هر پیکسل از نظر هزینه اقتصادی بین صفر و یک انتخاب شد تا مسیرهایی که کمترین هزینه اقتصادی را دارند، تعیین شوند (Qiu and Bian, 2004). در سال ۲۰۰۵ با بهره‌گیری از GIS و الگوریتم برنامه‌سازی پویا و در نظر گرفتن محدودیت‌های زیست‌محیطی در کنار هزینه‌های نصب و نگهداری و تجهیزات، میزان تأثیرگذاری برای هر پیکسل با استفاده از ساختار رستری و آنالیزهای مکانی GIS محاسبه شد (Monteiro, 2005). با گسترش استفاده از سامانه اطلاعات مکانی در این زمینه در سال ۲۰۰۶، راهکاری برای برقراری تعامل بهتر میان گروه‌های تصمیم‌گیر در امر ایجاد مسیر با بهره‌گیری از GIS مطرح شد. این سامانه، مسیر را از دیدگاه اقتصادی-اجتماعی، زیست‌محیطی، سلامتی-ایمنی و عوامل مهندسی بررسی می‌کند (Singh Gill, 2006).

1. Wolfenden  
2. Olbrycht



شکل ۱. فرایند مسیریابی بهینه

## ۲-۱- الگوریتم تکاملی چندهدفه

مسئله بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۲</sup> با بیش از یک تابع هدف سروکار دارد و در اغلب مسائل عملی تصمیم‌گیری که اهداف یا معیارهای چندگانه‌ای دارند، به کار می‌رود. نخستین مطالعات مربوط به بهینه‌سازی در مسائل چندهدفی در بسیاری از موارد به پاره‌تو<sup>۳</sup> (۱۸۹۶) منسوب است. در رابطه (۱) فرایند تحلیلی کلی مربوط به مسائل بهینه‌سازی چندهدفی نشان داده شده است. رابطه (۱)

$$\min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T$$

subject to  $x \in S$

$f$  یک بردار از  $m$  تابع هدف  $(f_1, f_2, \dots, f_m)$  است که بایستی کمینه‌سازی شوند،  $x$  یک بردار از متغیرهای تصمیم‌گیری و  $S$  یک دسته از همه راه‌حل‌های ممکن هستند. در این دست از مسائل، گفته می‌شود که راه‌حل  $x'$ ، بر راه‌حل  $x''$  چیره می‌شود اگر و فقط اگر  $\forall i (x') \leq f_i(x'')$  and  $\exists i (x') < f_i(x'')$  به این معنی که اگر هیچ مقدار تابع هدفی برای  $x'$  بزرگ‌تر (بدتر) از  $x''$  نباشد و حداقل یک مقدار تابع هدف برای  $x'$  وجود داشته باشد که کمتر (بهتر) از  $x''$  باشد، گفته می‌شود که راه‌حل  $x'$  بر راه‌حل  $x''$  غلبه کرده است.

همه گزینه‌های تصمیم‌گیری ممکن، یک فضای جواب را تشکیل می‌دهند. هر زیرمجموعه از همه

در سال ۲۰۰۸ تحقیقی در زمینه تأثیرات زیست‌محیطی خطوط انتقال برق در کمیسیون خدمات عمومی ویسکانسین<sup>۱</sup> انجام شد، که به روش‌های محاسبه تأثیرات زیست‌محیطی خطوط انتقال برق و همچنین عوامل تأثیرگذار و روش‌های کاهش تأثیرات پرداخت. پژوهش‌های دیگری نیز به فرایند مسیریابی با کمک GIS و تحلیل سلسله‌مراتبی، به وزن‌دهی و تلفیق مسیریها (Schmidt, 2009) و روش‌های چندمعیاره در انتخاب مسیر بهینه پرداختند (Husain et al., 2012).

تمامی تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهند که در مسئله مسیریابی خطوط انتقال برق به سه عامل هزینه اقتصادی، تأثیرات سوء زیست‌محیطی-اجتماعی و نگهداری و تعمیرات توجه شده است و هر یک به‌نوعی سعی در حل این مشکلات داشته‌اند. در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از الگوریتم تکاملی جدید سه عامل مهم گفته‌شده با روشی جدید و به‌صورت مسئله چندهدفی حل شد. برای این منظور، دیدگاه‌های گروه‌های تصمیم‌گیر که تا حدودی با یکدیگر ناسازگاری داشتند، در نظر گرفته شدند و نتایجی پذیرفتنی به‌دست آمد. در این روش برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین، علاوه‌بر یافتن مسیریهای بهینه، برج‌گذاری مسیر، جزئیات هزینه‌ها، موقعیت برج‌ها و گزارش‌گیری از ریز اطلاعات انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

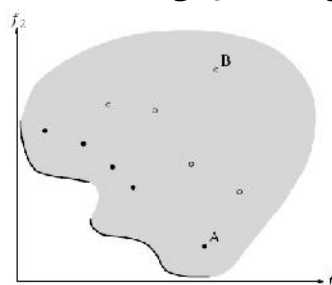
سه تابع هدف عمده و مهم هزینه اقتصادی (F1)، زیست‌محیطی-اجتماعی (F2) و دسترسی و نگهداری راحت خط انتقال (F3) در نظر گرفته شد. فرایند مسیریابی با در نظر گرفتن سه تابع فوق در ساختار الگوریتم NSGA-II انجام شد. شکل ۱ فرایند مسیریابی بهینه را نمایش می‌دهد.

1. Public Service Commission of Wisconsin  
2. Multi-objective Optimization Problem  
3. Pareto

و براساس درجه نامغلوب بودن مرتب می‌شود. به هر جواب یک مقدار شایستگی براساس درجه نامغلوب بودن آن اختصاص داده می‌شود (دسته اول، بهترین سطح است). انتخاب رقابتی باینری<sup>۳</sup>، ادغام و جهش، عملگرهایی هستند که برای ایجاد نسل فرزند با اندازه N استفاده می‌شوند ( $Q_0$ ). از نسل اول به بعد، روش الگوریتم متفاوت می‌شود. الگوریتم نخبه‌سالاری برای  $t \geq 1$  و برای یک نسل مشخص، در شکل ۳ نشان داده شده است.

ابتدا یک نسل ترکیبی به صورت  $R_t = P_t \cup Q_t$  تشکیل داده می‌شود. جمعیت  $R_t$  به اندازه  $2N$  خواهد بود. سپس جمعیت  $R_t$  مطابق با درجه نامغلوب بودن مرتب می‌شود. با اضافه کردن جواب‌ها از دسته اول و ادامه دادن تا رسیدن به اندازه N، نسل والد بعد  $P_{t+1}$  ایجاد می‌شود. در این مرحله تا زمانی که اندازه جمعیت والد جدید به N نرسد، فاصله ازدحام برای تمامی اعضای دسته‌های  $R_t$  محاسبه می‌شود و سپس براساس عملگر مقایسه‌ای ازدحام، مرتب‌سازی و در مرحله نخست N تایی اول انتخاب و جمعیت والد جدیدی تولید می‌شود. این جمعیت دوباره وارد مراحل انتخاب مسابقه دودویی و ادغام و جهش می‌شود تا جمعیت فرزند  $Q_{t+1}$  با اندازه N تولید شود.

راه‌حل‌های ممکن را یک دسته نامغلوب<sup>۱</sup> می‌نامند، اگر اعضای آن با هیچ راه‌حلی مغلوب نشوند و راه‌حل‌های خارج از این زیرمجموعه حداقل به وسیله یکی از اعضای زیرمجموعه مغلوب شوند. شکل ۲ جواب‌های نامغلوب را برای دو تابع هدف نشان می‌دهد.



شکل ۲. جواب‌های Non-dominated در بهینه‌سازی چندهدفی که دو تابع هدف  $f_1$  و  $f_2$  را کمینه می‌سازند

## ۲-۲- الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGA-II

الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه متعددی وجود دارند و یکی از جدیدترین آنها<sup>۲</sup> NSGA-II است که دب و همکاران (۲۰۰۲) ارائه کرده و به دلیل ویژگی‌هایی مانند سادگی در پیاده‌سازی، سرعت بیشتر، توانایی یافتن جواب‌های بهینه، پراکندگی مناسب و دقت بالا و از همه مهم‌تر نیاز کمتر به تنظیم پارامترهای مختلف و پیچیده بسیار محبوب و پرکاربرد است. در ادامه به نحوه کارکرد این الگوریتم پرداخته می‌شود. ابتدا یک نسل اولیه والد ( $P_0$ ) به طور تصادفی ایجاد

$R_t = P_t \cup Q_t$	combine parent and children population
$\mathcal{F} = \text{fast-nondominated-sort}(R_t)$	$\mathcal{F} = (\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots)$ , all non-dominated fronts of $R_t$
until $ P_{t+1}  < N$	till the parent population is filled
crowding-distance-assignment ( $\mathcal{F}_i$ )	calculate crowding distance in $\mathcal{F}_i$
$P_{t+1} = P_{t+1} \cup \mathcal{F}_i$	include $i$ -th non-dominated front in the parent pop
Sort( $P_{t+1}, \geq_n$ )	sort in descending order using $\geq_n$
$P_{t+1} = P_{t+1}[0 : N]$	choose the first N elements of $P_{t+1}$
$Q_{t+1} = \text{make-new-pop}(P_{t+1})$	use selection, crossover and mutation to create
$t = t + 1$	a new population $Q_{t+1}$

شکل ۳. چرخه اصلی الگوریتم NSGA-II

منبع: Deb et al., 2002

1. Non-dominated or Pareto Optimal
2. Non-dominated sorting genetic algorithms-II
3. Binary Tournament

باشد؛ و ب) مسیر حاصل از اتصال این نقاط شکست از مبدأ تا مقصد از روی مناطق غیرمجاز عبور نکند. مناطق غیرمجاز به دلیل خطرهایی که انسان‌ها، محیط‌زیست یا خود خط انتقال برق را تهدید می‌کنند، ممنوع شده‌اند. در جدول ۱ مناطق ممنوع آمده است.

### ۲-۳-۴-۲-۴- برج‌گذاری خودکار با در نظر گرفتن قیود

#### مختلف

پس از تولید مسیرهای پذیرفتنی، نوبت به برج‌گذاری مسیرها می‌رسد. در این فرایند بایستی محدودیت‌ها و قیودهای فنی در احداث خط انتقال در نظر گرفته شوند. قیود مذکور در اینجا فهرست شده‌اند.

- فاصله بین برج‌ها به اندازه طول اسپن طراحی شده باشد.
- در نقاط مبدأ، مقصد و نقاط شکستگی مسیر از برج‌های نوع کششی استفاده شود.
- در طول قسمت‌های مستقیم مسیر از برج‌های نوع آویزی استفاده شود.
- در طول قسمت‌های مستقیم مسیر پس از هر ۵ کیلومتر از برج نوع کششی استفاده شود.
- در صورتی که فاصله قائم سییم از سطح زمین از مقدار مجاز کمتر شود باید برج را به گونه‌ای جابه‌جا کرد که این مشکل برطرف شود. از طرفی باید دقت کرد که فاصله برج‌ها از هم در بازه مورد قبولی باشد. این بازه از ۰/۴ طول اسپن طراحی تا ۱/۵ برابر طول اسپن طراحی است. مقادیر جدول‌های ۱، ۲ و ۳ از طریق مشاوره با افراد خیره و دفترچه‌های دستورالعمل‌های راهنمای فنی و اجرایی برج‌گذاری خط انتقال برق به دست آمده‌اند.

### ۲-۳- عملگرهای ژنتیکی ارائه شده برای حل

#### مسئله مسیریابی خط انتقال برق

#### ۲-۳-۱- ساختار جواب (کروموزوم)

برای نمایش جواب از ساختار الگوریتم ژنتیک پارامتر واقعی استفاده شد. یک جواب که بیانگر مسیر در فضای هدف است به صورت شکل ۴ در نظر گرفته شد. در این ساختار جواب، مختصات نقاط شکستگی در مسیر خط انتقال به عنوان ژن‌های کروموزوم در نظر گرفته شدند.

$x_1$	$y_1$	$x_2$	$y_2$	...	$x_n$	$y_n$
-------	-------	-------	-------	-----	-------	-------

شکل ۴. ساختار کروموزوم

### ۲-۳-۲- عملگرهای تقاطع و جهش مورد استفاده

#### برای فرایند مسیریابی

برای حل مسئله از عملگر تقاطع شبیه‌سازی شده دودویی<sup>۱</sup> (SBX) و از عملگر جهش چندجمله‌ای<sup>۲</sup> استفاده شد. این عملگرها در زمینه الگوریتم ژنتیک پارامتر واقعی بسیار پرکاربرد هستند (Metaxiotis & Liagkouras, 2011). عملگرهای مذکور دو ویژگی اصلی دارند: الف) فاصله بین فرزندان متناسب با جواب‌های والد است؛ ب) احتمال اینکه جواب‌هایی نزدیک به والدین به عنوان فرزندان انتخاب شوند بیشتر از جواب‌هایی است که دور از والدین هستند و توزیع در خلال نسل‌ها به صورت پویا تغییر نمی‌کند (Deb and Agarwal, 1995).

### ۲-۳-۲- تولید خودکار مسیرهای متعدد خط

#### انتقال

برای انجام این فرایند ابتدا با در نظر گرفتن تعداد نقاط شکستگی مورد انتظار از طرف کاربر، ساختار جواب (کروموزوم) تشکیل می‌شود و با توجه به این ساختار، مسیرهای پذیرفتنی به تعداد جمعیت اولیه تولید می‌شوند. مسیری پذیرفتنی است که الف) هیچ‌یک از نقاط شکستی مسیر روی مناطق غیرمجاز قرار نگرفته

1. Simulated Binary Crossover  
2. Polynomial Mutation

جدول ۱. لایه‌های مورد استفاده در تهیه نقشه مناطق ممنوعه

نام لایه	توضیحات
شهرها	بافر ۲۰۰ متری در اطراف شهرها به‌خاطر مسائل ایمنی و سلامتی
روستاها	بافر ۴۰۰ متری به‌خاطر نمایش روستا و همچنین مسائل ایمنی و سلامتی
مناطق نظامی	بافر ۲۰۰ متری به‌خاطر مسائل امنیتی
فرودگاه	بافر ۵۰۰ متری به‌خاطر مسائل ایمنی
سد و دریاچه	به‌دلیل عدم برج‌گذاری
شیب	از روی لایه توپوگرافی تهیه شده است. مناطق با شیب بیشتر از ۳۰ درجه به‌عنوان مناطق ممنوعه در نظر گرفته شدند.

### ۲-۳-۵- ارزیابی توابع هدف NSGA-II

برق است. پس از مشاوره با افراد خبره اغلب مواردی که باعث تحمیل هزینه اقتصادی می‌شوند، در نظر گرفته شدند. این موارد شامل قیمت زمین، هزینه برج‌ها، هزینه مقره و یراق‌آلات و هزینه‌های ساختمانی است. در جدول‌های ۲ و ۳ قیمت خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت در برق منطقه‌ای مازندران و گلستان آمده است.

پس از انجام فرایند برج‌گذاری، بایستی مسیرهای خط انتقال برق از منظر توابع هدفی که در ادامه می‌آیند بررسی شوند.

### الف) تابع هدف اقتصادی (F1)

هدف این تابع کمینه‌کردن هزینه‌های احداث خط انتقال

جدول ۲. قیمت زمین برای کلاس‌های مختلف

نام کلاس	قیمت به‌ازای هر دکل (میلیون تومان)
مناطق جنگلی	۳۳
مناطق زراعی	۵
باغ‌ها	۱۰
بایر و مرتع	۳

جدول ۳. قیمت برج‌ها، سیم‌ها، مقره و یراق‌آلات و هزینه ساختمانی

ردیف	عامل هزینه	قیمت (میلیون تومان)	توضیحات
۱	برج کششی	۵۰	شامل هزینه فلزات و برج‌سازی
	برج آویزی	۳۳	
۲	مقره و یراق‌آلات	۳/۳	در تابع هدف به قیمت هر برج افزوده می‌شود.
	برج آویزی	۲/۲	
۳	سیم	۰/۱	شامل سیم‌های هادی، گارد و در صورت وجود سیم‌های انتقال دیتا که گاه به‌وسیله خطوط انتقال برق منتقل می‌شود. قیمت ذکر شده مربوط به مجموع قیمت‌های یک متر از انواع مختلف سیم‌ها و تعداد رشته‌های هر نوع سیم است.
۴	هزینه ساختمانی	۱۵	شامل هزینه احداث فونداسیون و نصب برج برای هر برج

در رابطه (۲) این تابع هدف بیان شده است

رابطه (۲)

$$(F_1) : \min \sum \left[ (n(TT) * TT^c + n(ST) * ST^c + (n(TT) + n(ST)) * F^c + W^c * \left( \sum_{i=1}^{n(TT)+n(ST)-1} l_i \right) + \sum_{i=1}^{n(TT)+n(ST)} LP_i \right]$$

در این رابطه  $n(TT)$  تعداد برج‌های کششی در مسیر مورد نظر،  $n(ST)$  تعداد برج‌های آویز،  $TT^c$  هزینه یک برج کششی،  $ST^c$  هزینه یک برج آویز،  $F^c$  هزینه احداث فونداسیون و نصب برج،  $W^c$  هزینه مربوط به سیم‌ها به ازای هر یک متر،  $l_i$  طول سیم بین دو برج، و  $LP_i$  قیمت زمین برای احداث است. برای محاسبه  $l_i$  که طول سیم بین دو برج متوالی  $p$  و  $q$  است، از روابط (۳) و (۴) استفاده شد.

رابطه (۳)

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

$$l_i = S + 1 + \frac{\Delta_{p,q}^2}{2S} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آنها،  $S$  طول اسپن بین دو برج مورد نظر و  $\Delta h$  اختلاف ارتفاع دو برج است.

### (ب) تابع هدف زیست‌محیطی و اجتماعی (F2)

این تابع برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی مسیری طراحی شده و هدف آن کمینه‌کردن تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی است. در این تابع هدف موارد زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۱. از منظر زیبایی‌شناختی

احداث خط انتقال جدید بر زیبایی محیط تأثیر منفی می‌گذارد. برای کاهش این تأثیر بهتر است خط انتقال هرچه بیشتر از دید عموم فاصله داشته باشد.

۲. تأثیرات بر جنگل

فاصله خط انتقال از جنگل به‌عنوان یکی از معیارهای مؤثر در ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود.

۳. تأثیرات بر مناطق زراعی و باغ‌ها

برای بررسی میزان تأثیر خط انتقال بر این عامل، معیار فاصله خط انتقال از آنها در نظر گرفته شده است.

۴. اثر گسل

گسل‌ها مناطق نامناسبی برای احداث برج‌ها به‌شمار می‌آیند.

۵. اثر رودخانه

اطراف رودخانه‌ها همواره در معرض طغیان و بروز سیل‌اند و بر خط انتقال و به تبع آن اجتماع انسان‌ها تأثیر منفی خواهد گذاشت.

این عوامل به‌صورت لایه‌های رستری آماده‌سازی و پس از وزن‌دهی به روش Index Overlay تلفیق شدند و خروجی آن نقشه تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی خط است و مقدار هر پیکسل عددی بین صفر و یک قرار دارد.

رابطه (۵)، تابع هدف زیست‌محیطی و اجتماعی را نشان می‌دهد.

رابطه (۵)

$$(f_2) : \min \sum_{i=1}^{n(TT)+n(ST)-1} \left( \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \right) * D_{i,i+1}$$

در محاسبه این تابع، از مقدار ارزش پیکسلی که برج اول ( $v_i$ ) و مقدار ارزش پیکسلی که برج دوم ( $v_{i+1}$ ) در آن قرار دارد میانگین گرفته و سپس در فاصله بین آن دو ( $D_{i,i+1}$ ) ضرب می‌شود.

در این رابطه  $D_{i,i+1}$  از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

رابطه (۶)

$$D_{(i,i+1)} = \sqrt{(x_{(i+1)} - x_i)^2 + (y_{(i+1)} - y_i)^2 + (z_{(i+1)} - z_i)^2}$$

پست ۴۰۰ کیلوولت حسن کیف (شهر کلاردشت) و ناریوران (شهر آمل) در برق منطقه‌ای مازندران در نظر گرفته شد. ناحیه مورد جست‌وجو مستطیلی با ابعاد ۱۳۱×۲۸ کیلومتر با مختصات (51°9'E 36°17'N) گوشه پایین سمت چپ و (52°37'E 36°31'N) گوشه بالا سمت راست، در سیستم مختصات ژئودتیک WGS84 است. در شکل ۵ این منطقه مشاهده می‌شود.

برای یافتن مسیرهای مناسب در منطقه مورد نظر، الگوریتم به دفعات متعددی اجرا شد و مشخص گردید که برای این منطقه اجرای الگوریتم با تعداد ۱۲ و ۱۴ و ۱۶ نقطه شکستگی در مسیر و ۵۰ جمعیت اولیه و ۵۰ نسل، قادر به یافتن جواب‌های بهینه و مسیرهای مناسب است. در شکل ۶ الگوریتم با ۱۴ نقطه شکستگی، ۵۰ جمعیت اولیه و ۵۰ نسل اجرا شد. در این شکل، نمودار اول مقدار بیشینه و کمینه  $F_1$  را برای مسیرهای موجود در دسته نامغلوب اول (بهترین دسته جواب‌های بهینه) در هر نسل نمایش می‌دهد. نمودار دوم، مقادیر بیشینه و کمینه  $F_2$  و نمودار سوم، مقادیر بیشینه و کمینه  $F_3$  را برای جواب‌های موجود در دسته نامغلوب اول در هر نسل نمایش می‌دهند. نمودار چهارم نیز تعداد مسیرهای موجود در دسته نامغلوب اول در هر نسل نمایش می‌دهد.

(ج) تابع هدف دسترسی و نگهداری راحت از خط انتقال (F3)

این تابع بسیار مهم و ارزشمند است. هزینه خروج خط از مدار، هزینه نگهداری و تعمیرات و رفع سریع خرابی با کمک این تابع کنترل‌شدنی است. در این تابع دو عامل نزدیکی به راه‌های دسترسی و نزدیکی به خطوط انتقال برق موجود تأثیرگذار است. این تابع مجموع فاصله مستقیم برج‌ها از راه‌های دسترسی و خطوط انتقال موجود  $(d_i)$  را محاسبه می‌کند و به صورت رابطه (۷) بیان شده است.

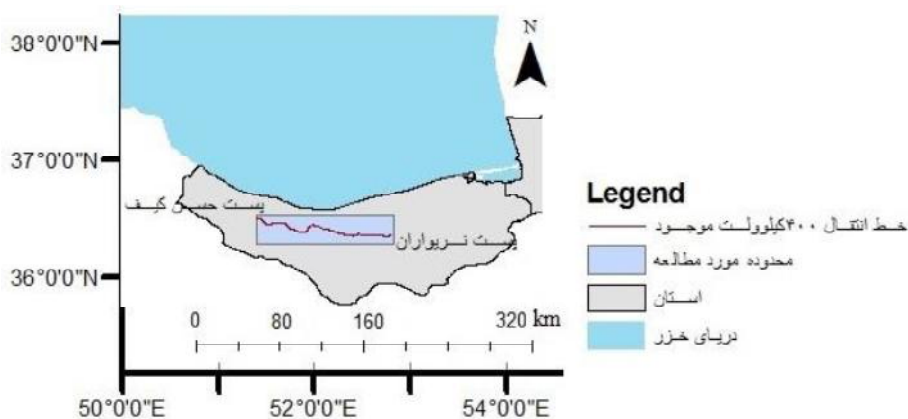
$$(f_7): \min \sum_{i=1}^{n(TT)+n(ST)} d_i \quad (7)$$

توابع هدف براساس الگوریتم NSGA-II ارزیابی و مرتب‌سازی نامغلوب شدند و جواب‌هایی که در سطح اول نامغلوب بودن قرار گرفتند، جواب‌های نخبه در آن نسل را تشکیل دادند. عملگرهای ژنتیکی روی جواب‌ها اعمال شدند و فرایند بهینه‌یابی تا پایان نسل مورد نظر، مطابق با الگوریتم ادامه یافت.

### ۳- نتایج اجرا و ارزیابی مدل مسیریابی بهینه روی داده‌های واقعی

#### ۳-۱- اجرای مدل مسیریابی بهینه خط انتقال برق توسعه داده شده

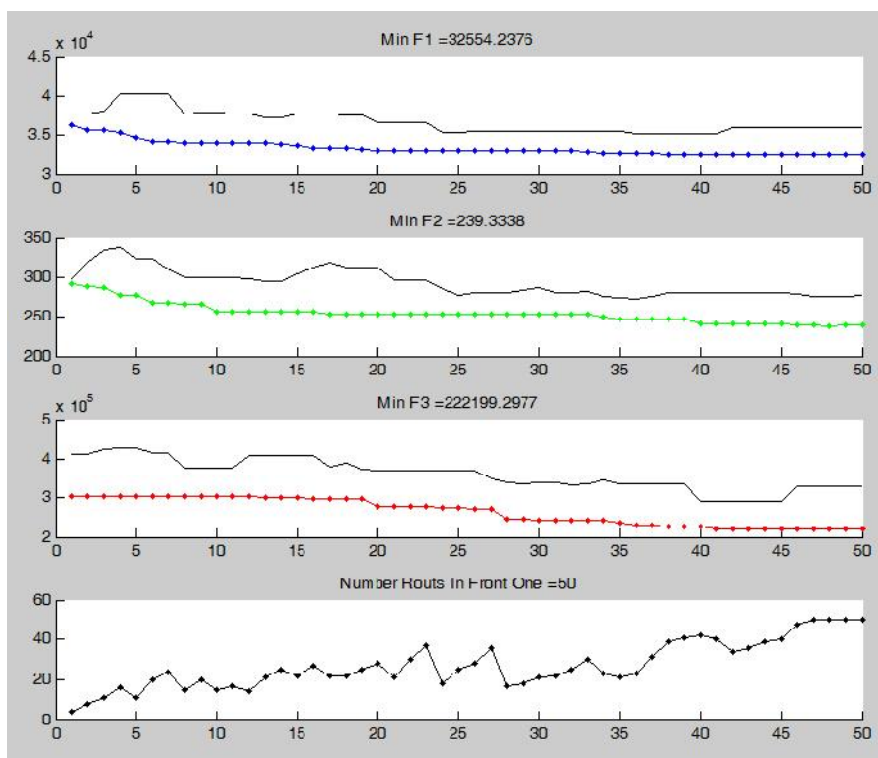
در پژوهش حاضر، عملیات مسیریابی بهینه بین دو



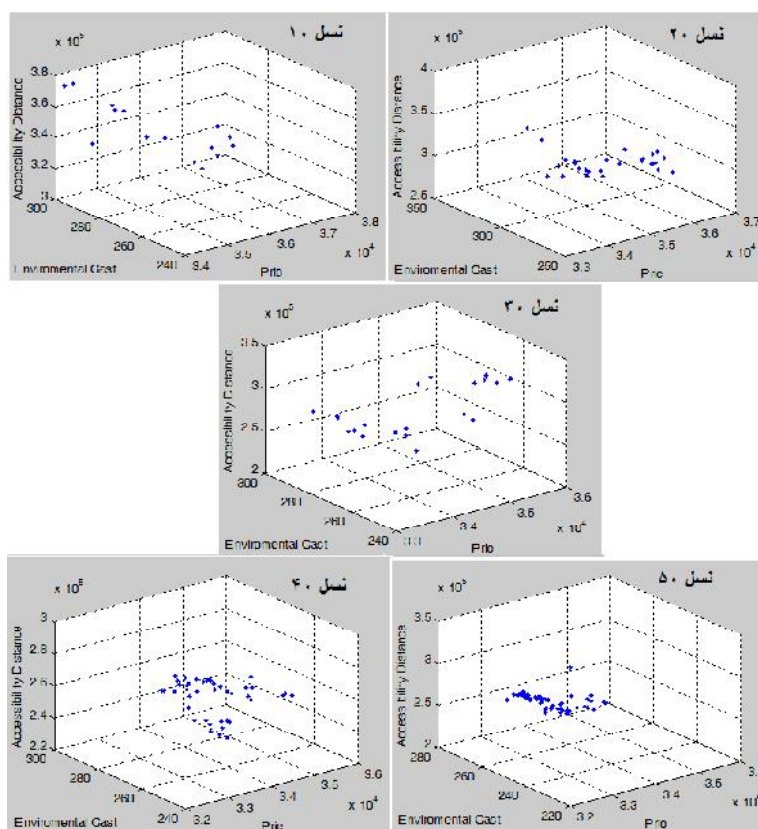
شکل ۵. موقعیت و محدوده منطقه مورد مطالعه



## مسیریابی خطوط انتقال برق با استفاده از الگوریتم NSGA-II



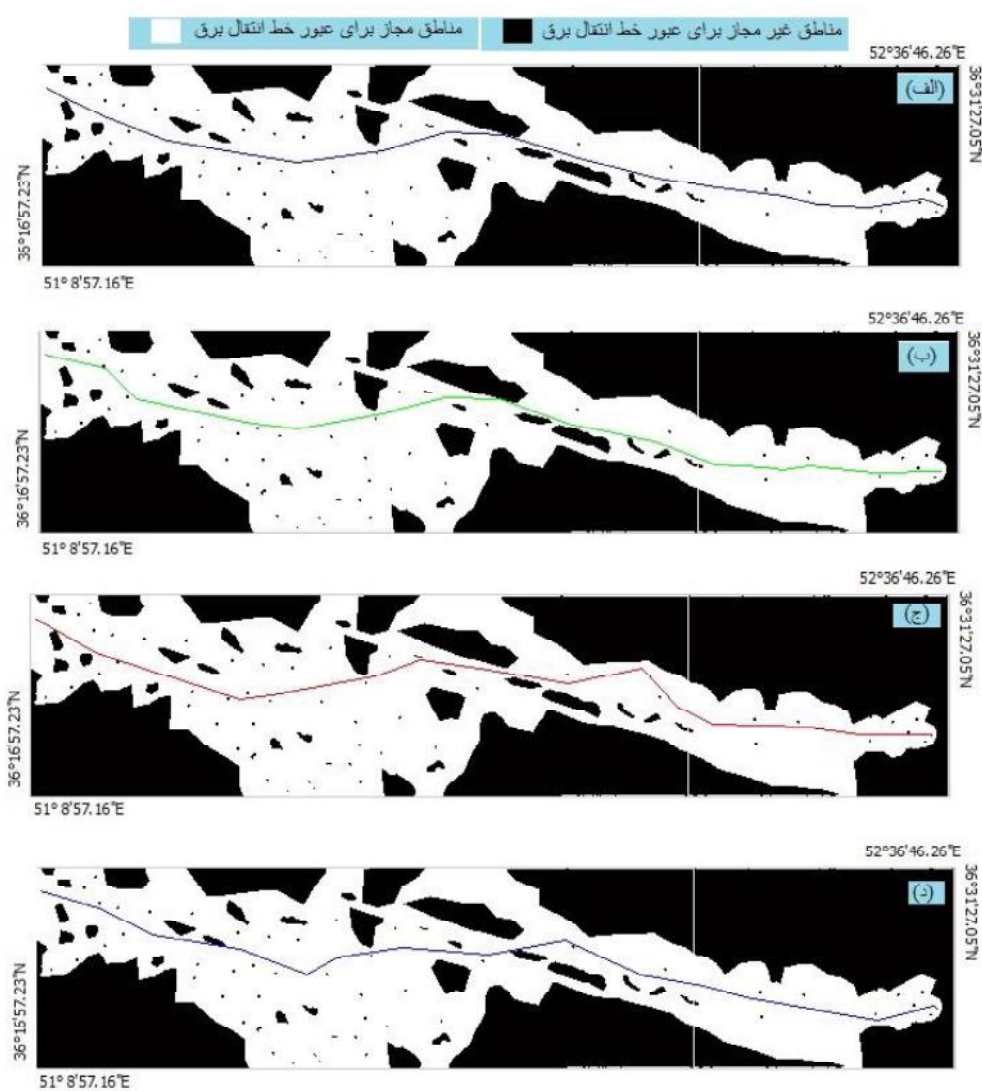
شکل ۶. مقادیر بیشینه و کمینه توابع هدف  $F_1$ ،  $F_2$ ،  $F_3$  و تعداد جواب‌های دسته اول بهینگی در نسل‌های مختلف



شکل ۷. مسیرهای موجود در دسته نامغلوب اول برای توابع هدف طی نسل‌های مختلف

نامغلوب بودن، افزایش می‌یابد و همگرا می‌شوند. برای نمایش روند بهبود در نسل‌های مختلف (نسل‌های شماره ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰) در شکل ۷ نمودار سه‌بعدی مسیرهای موجود در دسته نامغلوب اول برای توابع هدف آورده شده است. در شکل ۸ و جدول ۴ نیز بهترین مسیرهای بهینه حاصل از اجرای مدل در نسل ۵۰ به‌ازای توابع هدف  $F_1$ ،  $F_2$ ،  $F_3$  و مسیری که از هر سه منظر بهترین است نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، تعداد جواب‌های موجود در دسته نامغلوب اول در نسل‌های ابتدایی کم بود و با افزایش نسل‌ها به تعداد جواب‌های بهینه افزوده شد؛ به‌طوری‌که در نسل ۵۰ تمامی جواب‌ها در دسته اول قرار گرفتند. نمودارهای مربوط به توابع هدف نشان می‌دهند که با افزایش نسل مقادیر آنها بهبود یافته و جواب‌های بهینه حفظ شده‌اند. در نسل‌های پایانی، جواب‌های بهینه بسیار شبیه و نزدیک به یکدیگر می‌شوند و تعداد آنها در دسته اول



شکل ۸- الف) بهترین مسیر از نظر  $F_1$ ؛ ب) بهترین مسیر از نظر  $F_2$ ؛ ج) بهترین مسیر از نظر  $F_3$ ؛ د) بهترین مسیر از نظر هر سه تابع

### ۳-۲- تست و ارزیابی مدل

آزمون‌های مختلفی به منظور بررسی کارایی الگوریتم‌های ژنتیکی وجود دارد که برحسب کاربرد و مسئله مورد نظر می‌توان هر یک از آنها را به کار گرفت. دو نمونه از آزمون‌های پرکاربرد، تست تکرارپذیری و تست تنظیم پارامترهاست (Zitzler et al., 2003). در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی بیشتر کارایی مدل، نتایج حاصل از مسیریابی بهینه با مسیر خط انتقال موجود مقایسه شدند. علاوه بر تست‌های مذکور، با تفسیر بصری مسیرهای بهینه مشخص شد که همه مسیرها با توجه به قیدهایی که در نظر گرفته شده‌اند، از مناطق مناسب و مساعد برای احداث خط انتقال عبور کرده‌اند و افراد خبره قابلیت اجرایی بودن آنها را تأیید کردند.

### ۳-۲-۱- تست تکرارپذیری

در روش‌های حل ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک ممکن است نتایج در تکرارهای مختلف، متفاوت باشند. به منظور تخمین میزان تغییرات در اجراهای مختلف مدل توسعه داده شده تحت شرایط یکسان پارامترها، با ۵۰ جمعیت اولیه، ۵۰ نسل و ۱۴ نقطه شکستگی، الگوریتم ۵ بار اجرا شد و نتایج حاصل از آن در جداول ۵ و ۶ آمده است (Saadatseresht et al., 2009). محاسبه میزان تغییرات در توابع هدف (جدول ۶)، نشان می‌دهد که مقدار متوسط درصد تغییرات تقریباً ۱۰ درصد است، بنابراین می‌توان تکرارپذیری مدل ارائه شده را ۹۰ درصد در نظر گرفت، که عدد مناسبی است.

جدول ۴. مقادیر توابع هدف برای بهترین مسیرها از نظر  $F_1$ ،  $F_2$ ،  $F_3$  و بهترین مسیر از نظر هر سه تابع

نام مسیر	مقدار $F_3$ (متر)	مقدار $F_2$	مقدار $F_1$ (میلیون تومان)	توضیحات
الف	۲۸۴۲۴۸	۲۵۴/۹۵	۳۲۵۵۴	بهترین مسیر از نظر $F_1$
ب	۳۲۸۶۹۵	۲۳۹/۳۳	۳۲۹۹۹	بهترین مسیر از نظر $F_2$
ج	۲۲۲۱۹۹	۲۷۴/۸۸	۳۴۲۳۱	بهترین مسیر از نظر $F_3$
د	۲۵۵۲۳۹	۲۵۳/۴۷	۳۳۵۱۹	مسیری که از هر سه منظر بهترین است

جدول ۵. بهترین مقادیر توابع هدف در ۵ بار تکرار

شماره تکرار	تعداد نسل	تعداد جمعیت اولیه	تعداد مسیرهای در دسته بهینگی اول	کمینه $F_3$	کمینه $F_2$	کمینه $F_1$
۱	۵۰	۵۰	۵۰	۲۳۳۱۷۳	۲۳۴/۹۵	۳۲۷۶۰
۲	۵۰	۵۰	۵۰	۲۲۲۱۹۹	۲۳۹/۳۳	۳۲۵۵۵
۳	۵۰	۵۰	۴۵	۲۳۹۷۳۷	۲۴۲/۸۴	۳۳۳۰۹
۴	۵۰	۵۰	۵۰	۲۳۵۹۷۵	۲۱۲/۳۵	۳۳۰۷۹
۵	۵۰	۵۰	۴۱	۲۶۱۲۸۷	۲۳۳/۹۷	۳۲۸۷۹

جدول ۶. میزان تغییرات بهترین مقادیر توابع هدف در ۵ بار تکرار

تابع هدف	درصد تغییرات (درصد)	دامنه تغییرات	میانگین مقادیر تابع هدف
F <sub>1</sub>	۲/۳	۷۵۴	۳۲۹۱۶/۴
F <sub>2</sub>	۱۳	۳۰/۴۹	۲۳۲/۶۸
F <sub>3</sub>	۱۶	۳۹۰۸۸	۲۳۸۴۷۴

جدول ۷. بهترین مقادیر توابع هدف در ۵ بار اجرای مدل برای تست تنظیم پارامترها

شماره اجرا	تعداد نسل	تعداد جمعیت اولیه	تعداد مسیرهای دسته بهینگی اول	کمینه F <sub>1</sub>	کمینه F <sub>2</sub>	کمینه F <sub>3</sub>
۱	۱۰	۲۵۰	۲۷	۳۴۱۳۸	۲۳۴/۸۶	۲۸۸۲۲۲
۲	۲۵	۱۰۰	۵۶	۳۳۵۳۷	۲۲۶/۲۶	۲۳۶۳۲۸
۳	۵۰	۵۰	۵۰	۳۲۷۶۰	۲۳۴/۹۵	۲۳۳۱۷۳
۴	۷۰	۳۶	۱۴	۳۳۷۳۴	۲۴۷/۱۵	۲۵۶۴۳۳
۵	۱۰۰	۲۵	۱۴	۳۴۳۵۹	۲۵۹/۹۱	۲۴۴۱۱۰

### ۳-۲-۲- تست تنظیم پارامترها

دو پارامتری که نیاز به تنظیم دارند، تعداد نسل و تعداد جمعیت اولیه‌اند. حاصل ضرب این دو پارامتر، فاکتوری به نام تابع ارزیابی<sup>۱</sup> است که پیچیدگی الگوریتم را نشان می‌دهد. برای بررسی تأثیر تنظیمات دو پارامتر مذکور، به صورت تجربی و آزمایشی مقدار ثابت ۲۵۰۰ برای تابع ارزیابی در نظر گرفته شد. اینجا نیز همانند تست تکرارپذیری، مدل ارائه شده ۵ بار با مقادیر مختلف برای جمعیت اولیه و نسل به اجرا درآمد. نتایج این بررسی در جدول ۷ آمده است.

در جدول ۷ ملاحظه می‌شود که بهترین مقادیر توابع F<sub>1</sub> و F<sub>3</sub> در اجرای شماره سوم و بدترین مقادیر آنها در اجرای شماره اول بوده است که تأییدی بر کارایی فرایند عملگرهای ژنتیکی و فرایند نخبه‌سالاری الگوریتم با افزایش تعداد نسل‌هاست. در نظر گرفتن نسبت مناسب بین تعداد جمعیت اولیه و تعداد نسل، افزون بر تولید جواب‌های بهینه در کاهش زمان اجرای الگوریتم نیز تأثیرگذار است.

### ۳-۲-۳- مقایسه مسیر موجود با مسیرهای بهینه

#### تولید شده به وسیله مدل

برای این منظور مسیر موجود در منطقه که شامل ۱۶ نقطه شکستگی است، وارد مدل شد و مقادیر توابع هدف آن محاسبه گردید. در جدول ۸ مقادیر توابع هدف این مسیر و مسیرهای بهینه حاصل از مدل آمده است.

در جدول ۸ ملاحظه می‌شود که مسیر موجود از نظر تابع F<sub>1</sub>، تقریباً ۴/۵ میلیارد تومان هزینه بیشتری را تحمیل کرده و F<sub>2</sub> نیز در میان توابع از تمامی مسیرها بدتر است. تابع F<sub>3</sub> نیز تقریباً ۸۰ کیلومتر فاصله بیشتری در مقایسه با بقیه مسیرها از راه‌های دسترسی و مسیرهای خطوط انتقال دیگر دارد. مسیر موجود را می‌توان مسیری مغلوب در برابر هر سه مسیر تولید شده به وسیله مدل ارزیابی کرد.

#### 1. Function Evaluation

## مسیریابی خطوط انتقال برق با استفاده از الگوریتم NSGA-II

جدول ۸. مقایسه مقادیر توابع هدف جواب‌های حاصل از مدل با مقادیر مسیر موجود

شماره مسیر	تعداد نقطه شکستگی در مسیر	کمینه F <sub>3</sub>	کمینه F <sub>2</sub>	کمینه F <sub>1</sub>
۱	۱۲	۲۱۵۲۸۰	۲۱۶/۳۷	۳۴۴۴۵
۲	۱۴	۲۲۲۱۹	۲۳۹/۳۳	۳۲۵۵۵
۳	۱۶	۲۳۲۹۴۴	۲۵۴/۲۲	۳۲۶۰۷
۴ (مسیر موجود)	۱۶	۳۰۷۸۱۰	۲۸۶/۶۳	۳۷۶۶۹

### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

ایجاد ساختار تصمیم‌گیری چندهدفه در پژوهش حاضر منجر شد که بسیاری از عوامل مؤثر در هزینه‌های احداث، عوامل تأثیرگذار بر اجتماع و محیط‌زیست، و همچنین دسترسی به خط انتقال و نگهداری از آن به‌صورت توابع هدف تنظیم شود. مناطق غیرمجاز برای عبور مسیر به عنوان یکی از قیود مسئله در کنار قیود فنی به مدل معرفی شد تا مسیریابی خودکار با مسیریابی سنتی هم‌خوانی و مطابقت بیشتری داشته باشد. انتخاب بهینه‌ساز تکاملی NSGA-II برای فرایند حل مسئله قابلیت‌های مناسبی را به‌منظور رسیدن به جواب‌های بهینه فراهم کرد. در ادامه به وجوه متمایز این روش با سایر کارهای انجام‌شده اشاره می‌شود.

الگوریتم NSGA-II به‌دلیل نیازنداشتن به پارامترهای مختلف و تنظیم آنها، پیچیدگی محاسباتی کمتر، سرعت بالاتر و فرایند نخبه‌سالاری کارآمدی دارد و رسیدن به جواب‌های مناسب را در زمان پذیرفتنی امکان‌پذیر کرده است. ساختار کروموزوم طراحی‌شده قابلیت انعطاف و کارایی زیادی دارد و با معرفی تعداد نقاط شکستگی متناسب با پیچیدگی منطقه مورد مطالعه، امکان تولید مسیرهای بهینه را فراهم می‌آورد. کروموزوم ارائه‌شده این قابلیت را دارد که خط انتقال از نقطه یا نقاطی از قبل مشخص‌شده به‌وسیله کاربر عبور کند. از دیگر قابلیت‌های مدل ارائه‌شده این است که می‌توان در آن مسیرهای سنتی طراحی‌شده را برای ارزیابی از منظر توابع هدف وارد مدل کرد یا آنها را به‌عنوان جمعیت اولیه وارد الگوریتم کرد تا فرایند

بهینه‌یابی و بهبود را طی کند و مسیرهای بهتری به‌وجود آورد. اطلاعات متنوعی از قبیل تعداد برج‌ها، موقعیت برج‌ها، فاصله سیم از سطح زمین در هر نقطه، جزئیات هزینه مسیرها نظیر تعداد اقلام و تجهیزات مورد استفاده و بسیاری از اطلاعات آماری مسیر را می‌توان استخراج کرد.

نتایج ارزیابی‌های مدل نشان می‌دهند که مدل ارائه‌شده توانایی بالایی در هم‌گرایی به جواب‌های بهینه با درصد بالایی از تکرارپذیری دارد. مسیرهای بهینه یافت‌شده در مدل از هر نظر از مسیر موجود در منطقه بهتر بوده است. ساختار کروموزوم طراحی‌شده به‌همراه عملگرهای ژنتیکی دیگری که در این مدل به‌کار گرفته شده به‌منظور مسیریابی بهینه برای سایر تأسیسات و زیرساخت‌ها مانند خطوط لوله‌ها و جاده‌ها و تعیین کردور آن قابل استفاده است.

مدل ارائه‌شده را می‌توان با اعمال تغییراتی مناسب برای مسیریابی خطوط در زمینه توزیع و فوق‌توزیع برق بهره‌گرفت. در صورت داشتن لایه‌های اطلاعاتی جامع‌تر مانند باد، دما، اطلاعات زمین‌شناسی و خاک‌شناسی و محاسبات فنی و تخصصی نظیر کشش و فشار در برج‌ها می‌توان کیفیت مسیریابی را بهبود بخشید. ترکیب روش ارائه‌شده با الگوریتم‌های برنامه‌سازی پویا در بخش برج‌گذاری و امکان در نظر گرفتن برج‌های مختلف و انتخاب تجهیزات گوناگون در شرایط متفاوت محیطی می‌تواند روند مسیریابی را بهبود بخشد.

- Exploratory Crossover Operator for Improving the Performance of MOEAs**, Journal of Advances in Applied and Pure Mathematics, Vol. 12, No. 3, PP. 158-162.
- Monteiro, C. & Ramirez, J., 2005, **GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, PP. 934-942.
- Olbrycht, L., 1981, **Algorithm for the Design of Overhead Transmission Lines**, Department of Electrical Engineering Technical University of Gdansk Poland, Vol. 13, No. 5, PP. 265-269.
- Pareto, V., 1896, **Cours D'Economie Politique. F. Rouge: Lausanne**, English translation published in 1971 by Augustus M. Kelley, New York.
- Saadatseresht M., Mansourian A. & Taleai M., 2009, **Evacuation Planning using Multiobjective Evolutionary Optimization Approach**, European Journal of Operational Research, 198, PP. 305-314.
- Schmidt Andrew, J., 2009, **Implementing a GIS Methodology for Siting High Voltage Electric Transmission Lines**, Volume 11, Papers in Resource Analysis, 17 pp. Saint Mary's University of Minnesota, University Central Services Press.
- Singh Gill, R., 2006, **Engineering Aspects of Transmission Line Routing**, IEEE, PSCE, PP. 383-384.
- Vega M. & Sarmiento, H.G., 1996, **Image Processing Application Maps Optimal Transmission Routes**, IEEE Comput. Appl. Power, Vol. 9, No. 2, PP. 47-51.
- شرکت توانیر، ۱۳۷۶، استاندارد جامع مهندسی و طراحی خطوط انتقال نیروی برق ایران- دستورالعمل فنی و اجرایی برج‌گذاری خطوط انتقال نیرو، معاونت تحقیقات و تکنولوژی، دفتر استانداردها.
- Ahmadi, S., Ebadi, H. & Valadan Zeoj, M.J., 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), PP. 269-277.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. & Meyarivan, T., 2002, **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), PP. 182-197.
- Husain, F., Sulaiman, N.A. & Hashim, K., 2012, **Multi-Criteria Selection for TNB Transmission Line Route Using AHP and GIS**, In Proc. Int. Conf on syst. Eng and Tech, ICSET, PP. 1-6.
- Jiaj, Q., Xiaomeng, B. & Xiaojun, L., 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, PP. 5125-5128.
- Lin, M., Tsay, T. & Wu, S.W., 1996, **Application of Geographic Information System for Substation and Feeder Planning**, Int. J. Electr. Power Energy Syst, Vol. 18, PP. 175-183.
- Metaxiotis, K. & Liagkouras, K., 2011, **An**

- Wolfenden K. & Mitra G., 1967, **A Computer Technique for Optimizing the Sites and Heights of Transmission Line Towers- a dynamic programming approach**, London Institute of Computer Science, PP. 347-351.
- Yildirim, V. & Nisanci, R., 2010, **Developing a Geospatial Model for Power Transmission Line Routing in Turkey**, Presented at the XXIV FIG cong- fac.sydney.
- Zitzler, E., Thiele, L. & Laumanns, M., 2003, **Performance Assessment of Multiobjective Optimizers: an Analysis and Review**, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 7(2), PP. 117-132.