

# برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال در یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه

فرزان رشیدی

تصمیم‌گیرنده انجام می‌شود. این سازمان بدون وابستگی به بازیگران بازار و با در نظر گرفتن قیود فنی، اقتصادی و محیطی می‌بایست تدابیری جهت توسعه شبکه و کاهش پراش خطوط در نظر بگیرد.

عدم اطمینان از بازگشت هزینه‌های احداث خطوط انتقال از مهم‌ترین نگرانی‌هایی است که باعث می‌شود سرمایه‌گذاران خصوصی انگیزه‌ای به سرمایه‌گذاری در این بخش از صنعت برق نداشته باشند [۱]. برای رفع این مشکل کارهای متعددی در حال انجام است. به طور نمونه نهادهایی راه‌اندازی شده تا با ایجاد مکانیزم‌هایی، بحث درآمدزایی و بازگشت سرمایه را مدیریت کرده و این بخش مهم صنعت برق را برای بخش خصوصی جذاب نمایند. هدف این نهادها فراهم کردن شرایط مناسب و ایجاد انگیزه‌های اقتصادی لازم جهت سرمایه‌گذاری بخش خصوصی است.

در صنعت برق تجدید ساختار یافته، بازیگران حاضر در بازار برق به طور مستقل عمل می‌کنند. بنابراین برای آن که شبکه انتقال و تولید متناسب با رشد مصرف، توسعه پیدا کنند باید از ابزار تشویقی استفاده کرد به گونه‌ای که هر شرکت در راستای کسب سود بیشتر اقدام به احداث خطوط جدید کند. در زمینه برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال و مدیریت پراش خطوط تحت قیود امنیتی، فنی و اقتصادی تا کنون مطالعات متعددی انجام شده است. به طور نمونه [۲] توسعه خطوط انتقال و تولید در شبکه جهت اضافه‌شدن منابع تولیدات پراکنده را مورد بررسی قرار داده و نتایج بر روی شبکه ۲۴ شینه آزمایش شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند استفاده از منابع تولیدات پراکنده می‌تواند به افزایش بار در شبکه پاسخ دهد و همچنین ضروری است که به موازات آن خطوط انتقال جدید نیز احداث شوند. در [۳] مسأله توسعه منابع تولیدات پراکنده و توسعه شبکه انتقال تجزیه و تحلیل شده است. از ویژگی‌های این مرجع، در نظر گرفتن محدودیت‌های جغرافیایی و بررسی تأثیر آن بر توسعه خطوط انتقال است. در [۴] یک مدل مفهومی برای بهینه‌سازی توسعه بخش انتقال و تولید معرفی شده است. این مرجع مسأله مورد نظر را از دید کلان بررسی کرده و در آن به مسایل فنی و محدودیت‌های فیزیکی توسعه خطوط انتقال پرداخته نشده است. مرجع [۵] مسأله توسعه خطوط انتقال را مورد توجه قرار داده ولی فقط کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری را به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته است. مرجع [۶] مسأله توسعه شبکه‌های انتقال در سیستم‌های تجدید ساختار یافته را با هدف کاهش تلفات و جلوگیری از بروز اضافه بار مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. مرجع [۷] مسأله توسعه شبکه انتقال به منظور اتصال منابع تولیدات پراکنده به شبکه سراسری را بررسی نموده است. در این مرجع با توجه به پتانسیل منابع تولیدات پراکنده مختلف، سعی شده با پیشنهاد طرح‌هایی، احداث خطوط انتقال جدید را به گونه‌ای تبیین نماید که امکان اتصال این نوع منابع به شبکه فراهم گردد. در [۸] برای احداث خطوط انتقال جدید یک راه حل قیمت‌گذاری جدید پیشنهاد شده است. مرجع [۹] نیز روشی برای مدیریت تراکم خطوط با استفاده از کمینه‌کردن

چکیده: با افزایش روزافزون مصرف برق و متعاقب آن افزایش تولید، شبکه‌های انتقال نیز می‌بایست همگام با آنها توسعه یابند. این در حالی است که هم‌زمان با تجدید ساختار در سیستم قدرت، علاوه بر تشدید تأثیر عدم قطعیت‌های فعلی، چالش‌ها و عدم قطعیت‌های جدید دیگری نیز به شبکه اضافه شده است. بالا بودن ریسک سرمایه‌گذاری در پروژه‌های کلان صنعت برق و همچنین عدم قطعیت‌های موجود در عرصه رقابت سبب شده تا سرمایه‌گذاری در پروژه‌های توسعه شبکه‌های انتقال فاقد انگیزه‌های لازم برای بخش خصوصی باشد. در این مقاله مدل نسبتاً جامعی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با هدف رقابتی ماندن بازار و دسترسی آسان مصرف‌کنندگان به انرژی ارزان و قابل اعتماد و همچنین تشویق سرمایه‌گذاران بخش خصوصی ارائه شده است. با توجه به این که مسأله مورد نظر در قالب یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه است، برای حل آن از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی چندهدفه استفاده شده است. به منظور تسریع در فرایند بهینه‌سازی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی نیز به الگوریتم اضافه شده‌اند. نتیجه اعمال این الگوریتم بر مسأله بهینه‌سازی مورد نظر، منجر به مجموعه‌ای از طرح‌های بهینه‌ای خواهد شد که نشان‌دهنده ناحیه مصالحه بین توابع هدف است. برای انتخاب طرح نهایی از بین چندین طرح بهینه موجود، از روش تصمیم‌گیری فازی max-min استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های متعددی بر روی شبکه ۲۴ شینه IEEE انجام می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند مدل ارائه‌شده می‌تواند در حضور عدم قطعیت‌های مختلف، علاوه بر کمینه‌کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و کاهش پراش خطوط، خطوط با سطح ریسک مورد قبول و سودآور را شناسایی و برای سرمایه‌گذاری به بخش خصوصی پیشنهاد نماید.

کلیدواژه: الگوریتم تکامل تفاضلی، بازار برق، برنامه، برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، بهینه‌سازی پارتو، تصمیم‌گیری فازی.

## ۱- مقدمه

در شبکه‌های قدرت، میزان بار دائماً در حال افزایش است و همگام با افزایش بار، میزان تولید نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که تولید و بار از طریق خطوط انتقال به هم مرتبط هستند، با افزایش این دو پارامتر، لازم است خطوط انتقال نیز متناسب با آنها توسعه پیدا کند. امروزه یکی از مسایل مهم و حل‌نشده بازارهای برق، مالکیت خطوط انتقال به عنوان رابط بین تولیدکنندگان خصوصی و مصرف‌کنندگان است. در بعضی از کشورها مالکیت خطوط انتقال بر عهده بهره‌بردار شبکه است در حالی که در برخی کشورهای دیگر مالکیت آنها در انحصار بخش خصوصی است. به صورت متداول، برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال توسط یک سیستم واحد

این مقاله در تاریخ ۲۵ اسفند ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۹ مرداد ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.  
فرزان رشیدی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس،  
(email: rashidi@hormozgan.ac.ir)

در نظر گرفت که بتوان به کمک آنها توسعه خطوط انتقال را به خوبی انجام داد.

## ۲- عوامل مؤثر در برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال

احداث خطوط انتقال جدید یکی از پرهزینه‌ترین و طولانی‌مدت‌ترین پروژه‌های سیستم قدرت است. مالک شبکه که مسئولیت طراحی خطوط انتقال را بر عهده دارد می‌بایست به دنبال سود همه شرکت‌کنندگان بازار بوده و تلاش کند از امکان ایجاد قدرت بازار برای عده‌ای خاص جلوگیری نماید. یکی از فاکتورهایی که می‌بایست در بحث طراحی خطوط انتقال مورد توجه قرار داده شود، هزینه احداث آن است. هرچه این هزینه کمتر باشد تعرفه‌های استفاده از خطوط نیز کمتر شده و به تبع آن هزینه‌های عناصر شرکت‌کننده در بازار (خصوصاً استفاده‌کنندگان خدمات خطوط) کاهش خواهد یافت. رابطه ریاضی حاکم بر این فاکتور را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۵]

$$f_1 = \sum_{l \in \Omega} c_l n_l \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\Omega$  مجموعه خطوط نصب‌شده جدید،  $n_l$  تعداد خطوط کاندیدای نصب در حریم  $l$ ،  $c_l$  هزینه نصب یک خط جدید و  $f_1$  نیز کل هزینه سرمایه‌گذاری است. اولین تابع هدفی که می‌توان در مسأله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال در محیط‌های تجدید ساختار یافته در نظر گرفت، کمینه‌کردن هزینه سرمایه‌گذاری خطوط انتقال نصب‌شده یا همان (۱) است.

یکی دیگر از اهدافی که می‌تواند در برنامه شبکه‌های انتقال مورد توجه قرار گیرد، کمینه‌کردن هزینه پرشدگی شبکه مورد مطالعه است. چرا که کاهش سطح پرشدگی در شبکه انتقال از یک طرف منجر به افزایش رقابت در بازار خواهد شد و از طرف دیگر دسترسی آسان و بدون تبعیض مصرف‌کنندگان انرژی را به دنبال خواهد داشت. هزینه پرشدگی ساعتی و همچنین کل هزینه پرشدگی را می‌توان به ترتیب به صورت (۲) و (۳) بیان نمود [۱۶]

$$CC_t = Cost_{v,t} - Cost_{r,t} \quad (2)$$

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \frac{CC_t}{(1-D)^t} \quad (3)$$

در روابط فوق  $Cost_{v,t}$  و  $Cost_{r,t}$  به ترتیب بیانگر هزینه بهره‌برداری ساعتی با در نظر گرفتن محدودیت خطوط و بدون محدودیت خطوط و  $CC_t$  و  $D$  نیز به ترتیب هزینه پرشدگی ساعتی و نرخ تنزیل هستند. هزینه‌های بهره‌برداری ساعتی  $Cost_{v,t}$  و  $Cost_{r,t}$  به ترتیب از حل (۴) یک بار با در نظر گرفتن کل قیود (۵) تا (۷) و بار دیگر با در نظر گرفتن قیود (۵) تا (۶) به دست می‌آید [۱۶]

$$\min \{Cost_t\} = \sum_{i=1}^{n_g} p_{g_i} \times (a_i p_{g_i} + b_i) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N p_{g_i} = \sum_{i=1}^N p_{d_i} \quad (5)$$

$$0 \leq p_{g_i} \leq \bar{p}_{g_i}, \quad 0 \leq n_i \leq \bar{n}_i \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^N A_{l-k} \times (p_{g_k} - p_{d_k}) \leq \bar{f}_l \quad (7)$$

در روابط فوق پارامترهای  $n_g$ ،  $a_i$ ،  $b_i$ ،  $p_{g_i}$ ،  $p_{d_i}$ ،  $N$ ،  $n_i$ ،  $A_{l-k}$ ،  $\bar{f}_l$  و  $\bar{n}_i$  به ترتیب بیانگر تعداد ژنراتورها، پارامترهای پیشنهاد قیمت

مجموع جابه‌جایی در قراردادهای پیشنهاد داده است. مرجع [۱۰] مسأله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال را در قالب یک مسأله بهینه‌سازی تک‌هدفه ارائه کرده و با استفاده از نسخه اصلاح‌شده الگوریتم ژنتیک به حل آن پرداخته است. مرجع [۱۱] نیز نسخه اصلاح‌شده الگوریتم ازدحام ذرات را برای حل مسأله مورد نظر به کار برده است. در هر دو مرجع ذکرشده منحصراً مسأله کاهش تراکم خطوط به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است در حالی که در مسأله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال، علاوه بر مدیریت تراکم خطوط، توابع هدف دیگری مانند کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و غیره نیز باید در نظر گرفته شوند. مرجع [۱۲] نیز ساختاری برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال در محیط‌های تجدید ساختار یافته ارائه نموده است. هر چند در این مقاله معیارهای اقتصادی مانند رفاه عمومی و هزینه‌های نصب به عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شده است ولی با استفاده از روش ترکیب وزنی، مسأله مورد نظر به یک مسأله بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل و به کمک روش‌های بهینه‌سازی هوشمند به حل آن پرداخته شده است. در [۱۳] مسأله مورد نظر در قالب یک مسأله بهینه‌سازی دوهدفه شامل کمینه‌کردن پرشدگی خطوط و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری بیان شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک غیر مغلوب مسأله را حل نموده است. یکی از محدودیت‌های این مقاله آن است که فقط معیارهای اقتصادی را به عنوان توابع هدف در نظر گرفته و از معیارهای مالی مانند جذب سرمایه‌های خصوصی صرف نظر شده است.

مرجع [۱۴] با رویکرد دیگری مسأله برنامه‌ریزی تولید و انتقال را مورد توجه قرار داده است. این مقاله مسأله حراج هم‌زمان انرژی و خدمات کنترل فرکانس را در قالب یک مسأله بهینه‌سازی بیان کرده و محدودیت‌هایی مانند تراکم خطوط انتقال و اثرات خودتنظیمی بار را در ساختار مسأله وارد نموده است. سپس به کمک روش‌های برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح به حل آن پرداخته شده است. از نکات برجسته این مقاله، در نظر گرفتن مدلی مشابه بازار ایران است. با این حال در این مقاله فقط ذخیره‌های کنترل فرکانس اولیه مورد توجه قرار گرفته و از اثرات گذرای افت فرکانس در قبال وقوع حادثه صرف نظر شده است. مطالعات انجام‌شده در زمینه برنامه‌ریزی شبکه‌های انتقال، بیشتر از دیدگاه قابلیت اطمینان، مدیریت تراکم خطوط و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری بوده است و تا کنون کمتر به مسأله توسعه شبکه با هدف جذب سرمایه‌های بخش خصوصی توجه شده است. علاوه بر این در بسیاری از مراجع ذکرشده برای حل مسأله از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه استفاده شده در حالی که مسأله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه است.

در این مقاله مسأله برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال از دیدگاه یک سرمایه‌گذار خصوصی حاضر در بازار بررسی و در قالب یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی شده است. اهداف مورد نظر عبارتند از کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کاهش هزینه‌های پرشدگی خط و افزایش میزان سرمایه‌گذاری بخش خصوصی. با توجه به چندهدفه بودن مسأله، برای حل آن از روش بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است. خروجی مسأله شامل تعدادی طرح بهینه به مفهوم پارتو است که برای انتخاب یک طرح از بین چندین طرح بهینه موجود از سیستم تصمیم‌گیر فازی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند در صورتی که سود مناسبی برای شرکت‌های موجود در بازار وجود داشته باشد، می‌توان متناسب با رشد بار هم پرشدگی خطوط را مدیریت کرد و هم در صورت نیاز مشوق‌هایی برای بخش‌های خصوصی

یک بازار خاص بالاتر باشد آن پروژه خط انتقال برای بخش خصوصی جذاب بوده و می‌تواند انگیزه‌های اقتصادی ایجاد کند. پروژه خطوط انتقال جذاب برای سرمایه‌گذاری از دید بخش خصوصی، پروژه‌هایی هستند که شرط زیر در مورد آنها صادق باشد [۱۹]

$$RoR_i \geq MARR \quad (11)$$

در رابطه فوق،  $MARR$  حداقل نرخ بازگشت سرمایه جذاب و  $RoR_i$  نرخ بازگشت سرمایه ناشی از درآمد احداث خط انتقال است. با توجه به موارد فوق، (۱۲) می‌تواند به عنوان سومین تابع هدف در مسأله طرح توسعه خطوط انتقال در محیط‌های تجدید ساختار یافته در نظر گرفته شود [۱۹]

$$f_3 = \sum_{i=1}^L IC_i^{Attractive Line} \quad (12)$$

در رابطه فوق  $IC_i^{Attractive Line}$  هزینه سرمایه‌گذاری خطوط جذاب از دیدگاه بخش خصوصی و  $L$  نیز کل خطوط انتقال در طرح بهینه است. از دیدگاه بهره‌بردار مستقل شبکه (۱۲) بیانگر میزانی از سرمایه‌گذاری است که می‌تواند برای سرمایه‌گذارها جذاب بوده و ابزاری جهت تشویق آنها برای سرمایه‌گذاری در این بخش باشد.

### ۳- الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی برای برنامه‌ریزی چندهدفه توسعه خطوط انتقال

در بخش‌های قبل، عوامل مؤثر بر برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال در محیط تجدید ساختار شده تشریح و توابع هدف متناظر با آنها معرفی شدند. هنگام برنامه‌ریزی توسعه برای یک شبکه، کاندیداهای توسعه خطوط بسیار زیاد هستند. به عنوان مثال اگر قرار باشد در یک شبکه ۲۴ شینه با ۴۱ کاندید توسعه، چهار خط جدید احداث شود، تعداد طرح‌های موجود ۲۸۲۵۷۶۱ خواهد بود که محاسبه توابع هدف به ازای این تعداد طرح در عمل امکان‌پذیر نیست. برای رفع این مشکل در این مقاله از الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده شده است. علاوه بر این به منظور تسریع در فرایند بهینه‌سازی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی نیز به الگوریتم اضافه شده‌اند. با توجه به این که مسأله بهینه‌سازی از نوع چندهدفه است الگوریتم تکامل تفاضلی معرفی شده در این مقاله به گونه‌ای توسعه داده شده که بتواند در حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه نیز مورد استفاده قرار گیرد. در بخش بعد این الگوریتم به طور خلاصه تشریح شده و جزئیات بیشتری از این الگوریتم در [۲۰] ذکر شده است.

### ۴- الگوریتم تکامل تفاضلی

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت در حل مسایل بهینه‌سازی کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. الگوریتم تکامل تفاضلی یکی از انواع این الگوریتم‌ها است که نخستین بار در سال ۱۹۹۵ توسط استورن و پرایس معرفی شد [۲۰]. استراتژی این الگوریتم در تولید جمعیت اولیه و ادامه تکامل نسل‌های بعدی و همچنین نگاه به شایستگی تابع هدف، همانند الگوریتم ژنتیک است با این حال تفاوت‌هایی در چگونگی عمل ترکیب و جهش بین آنها وجود دارد. در این الگوریتم بر خلاف الگوریتم ژنتیک، همه اعضا دارای شانس یکسانی جهت انجام عمل ترکیب هستند و به عبارت دیگر شانس انتخاب شدن هر کروموزم جهت عمل ترکیب، مستقل از مقدار شایستگی آن است. از دیگر ویژگی‌های این الگوریتم داشتن حافظه است که اطلاعات جواب‌های مناسب را در جمعیت فعلی حفظ می‌کند. همچنین کم‌بودن تعداد

ژنراتور شین  $i$ ام، میزان تولید ژنراتور شین  $i$ ام، بار شین  $i$ ام، تعداد شین‌های شبکه قدرت، تعداد خطوط هر محدوده، ضریب عمومی جابه‌جایی، حداکثر ظرفیت خط  $i$ ام و حداکثر تعداد خطوط جدید قابل نصب هستند.

یکی از معضلات عمده در سیستم‌های تجدید ساختار شده، انحصاری‌ماندن شبکه انتقال و عدم تمایل بخش خصوصی برای سرمایه‌گذاری در آن است. برای سرمایه‌گذاران خصوصی یک فاکتور مهم در انتخاب پروژه، نرخ بازگشت هزینه‌ها و کسب سود بیشتر است. بنابراین پیشینه‌نمودن میزان سرمایه جذب شده از بخش خصوصی به منظور احداث خطوط جدید، فاکتور مهم دیگری است که می‌تواند به عنوان سومین تابع هدف مطرح شود. فرض کنیم مکانیزم قیمت‌گذاری در شبکه انتقال بر اساس روش مگاوات مایل باشد، بنابراین خواهیم داشت [۱۷]

$$TC_t = TC \frac{\sum_{k=1}^K C_k L_k F_{t,k}}{\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K C_k L_k F_{t,k}} \quad (8)$$

در رابطه فوق  $F_{t,k}$  جریان خط  $k$  ناشی از قرارداد  $t$ ،  $TC_t$  هزینه قرارداد  $t$ ،  $TC$  هزینه‌های کل همه خطوط،  $L_k$  طول خط  $k$  بر حسب مایل،  $C_k$  هزینه مگاوات در واحد طول خط  $k$ ،  $T$  تعداد قراردادهای  $K$  تعداد خطوط است.

با توجه به (۸) برای یک خط انتقال، مجموع کل هزینه‌های تخصیص یافته به هر مبادله را می‌توان به فرم زیر بیان نمود [۱۷]

$$TC_t = \sum_{k=1}^K C_k \frac{|F_{t,k}|}{|F_{k,max}|} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $F_{t,k}$ ،  $C_k$ ،  $K$ ،  $F_{k,max}$  و  $TC_t$  به ترتیب بیانگر سهم فلوی عبوری هر مبادله  $t$  از کل فلوی عبوری خط انتقال  $k$ ، هزینه نصب خط انتقال  $k$ ، کل خطوط انتقال شبکه، پیشینه فلوی خط انتقال  $k$  و هزینه تخصیص یافته به هر مبادله  $t$  می‌باشد.

شایان ذکر است این مکانیزم تخصیص هزینه باید با توجه به جهت سهم فلوی عبوری هر مبادله نسبت به جهت فلوی عبوری از خط انتقال خود در نظر گرفته شود. به عنوان مثال اگر این سهم فلوی، مخالف فلوی عبوری از خط انتقال باشد نباید برای آن هزینه‌ای منظور شود چرا که مبادله در جهت مخالف فلوی اصلی به مثابه افزایش ظرفیت خط خواهد بود [۱۸]. مرجع [۱۹] پیشنهاد می‌دهد به این گونه مبادلات هزینه‌ای تعلق نگیرد و حتی گاهی مقداری از هزینه انتقال به آنها پرداخت شود چرا که کاهش جریان خالص گذرنده از مسیر برای کل سیستم سودمند است. چنانچه درآمدها طبق (۹) در بازه‌های زمانی یکسان کسب شود برای محاسبه نرخ بازگشت سرمایه (همان  $i$ ) می‌بایست (۱۰) نسبت به پارامتر  $i$  حل گردد [۱۹]

$$\sum_{t=1}^T \frac{A_t}{(1+i)^t} = I - W \quad (10)$$

در رابطه فوق  $I$ ،  $W$ ،  $A_t$  و  $i$  به ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری خطوط انتقال، هزینه اسقاطی، درآمد زمانی ناشی از هر خط انتقال و نرخ بازگشت سرمایه می‌باشد. در بحث سرمایه‌گذاری، حداقل نرخ بازگشت سرمایه در کشورهای مختلف، متفاوت و وابسته به عوامل متعددی همچون نرخ سود خالص بانکی آن کشور است. برای در نظر گرفتن این قیود می‌توان چنین فرض کرد چنانچه نرخ بازگشت سرمایه یک پروژه از حداقل نرخ مطلوب

در حالی که مفهوم استخراج باعث می‌شود الگوریتم بتواند مکان‌های بهینه را به صورت محلی و متمرکز برای یافتن بهترین جواب، جستجو نماید. به عبارت دیگر، استخراج به معنی قابلیت متمرکز کردن جستجو در محدوده مطلوب است تا جواب مورد نظر موشکافی شود. بنابراین برای رسیدن به جواب بهینه سراسری می‌بایست تعادلی بین دو مفهوم اکتشاف و استخراج صورت پذیرد. معمولاً یک راهکار جهت برقراری این تعادل آن است که در اولین تکرارهای الگوریتم، تأثیر مفهوم اکتشاف بیشتر از استخراج باشد و با گذشت زمان و تکرار الگوریتم، از تأثیر مفهوم اکتشاف کاسته شده و اهمیت بیشتری به مفهوم استخراج داده شود. به این معنی که در تکرارهای اولیه، الگوریتم یک جستجوی سراسری در فضای جواب انجام داده و در تکرارهای آخر، ناحیه‌های یافته‌شده را با دقت بیشتری جستجو کند.

در الگوریتم تکامل تفاضلی معرفی شده در فوق، سه پارامتر کنترلی  $\lambda$ ،  $F$  و  $CR$  وجود دارند که با انتخاب مناسب آنها می‌توان علاوه بر ایجاد مصالحه بین دو مفهوم اکتشاف و استخراج، هم سرعت همگرایی الگوریتم را افزایش داد و هم از گیرافتادن آن در بهینه‌های محلی جلوگیری کرد. طبق (۱۳) در صورتی که بخواهیم در تکرارهای اولیه تأثیر اکتشاف بیشتر از استخراج باشد می‌بایست مقدار  $F$  بیشتر از مقدار  $\lambda$  انتخاب شود. به همین ترتیب با گذشت زمان و تکرار الگوریتم می‌بایست مقدار  $F$  کم شده و مقدار  $\lambda$  افزایش یابد. با این عمل در شروع، عملکرد الگوریتم بیشتر شبیه عملکرد الگوریتم‌های با جستجوی کاملاً تصادفی خواهد بود ولی در تکرارهای آخر، از ماهیت تصادفی بودن الگوریتم کاسته شده و الگوریتم بیشتر مایل به انجام یک جستجوی محلی در همسایگی  $gbest$  که همان بهترین عضو جمعیت است خواهد بود. به عبارت دیگر جستجوی سراسری و کشف فضاهای جدید با مقادیر زیاد  $F$  و مقادیر کم  $\lambda$  صورت می‌گیرد. از طرف دیگر اگر مقدار  $F$  کم و  $\lambda$  بزرگ انتخاب شود مفهوم استخراج تأثیر بیشتری خواهد داشت.

طبق (۱۴) مقادیر بزرگ  $CR$  باعث ایجاد تنوع و گوناگونی بیشتری در بافت جمعیت خواهد شد چرا که عضو جدید به وجود آمده (یا همان فرزند) شباهت کمتری به والد اصلی خود خواهد داشت. این امر می‌تواند علاوه بر افزایش تأثیر مفهوم اکتشاف نسبت به استخراج، از همگرایی زودرس الگوریتم نیز جلوگیری کند. بالعکس با کاهش مقدار  $CR$ ، شباهت فرزند به والد اصلی نیز افزایش یافته که این خود به مفهوم افزایش قابلیت الگوریتم در انجام جستجوی محلی در همسایگی والد اصلی است.

با توجه به موارد فوق مشاهده می‌شود جهت افزایش سرعت همگرایی و همچنین جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه محلی، می‌بایست پارامترهای  $CR$  و  $F$  از یک مقدار بزرگ شروع و طی روند تکامل جمعیت کاهش یابند. همچنین مقدار  $\lambda$  نیز می‌بایست از یک مقدار کوچک شروع و در طول زمان افزایش یابد تا سبب تمرکز بیشتر الگوریتم در جستجو حول بهترین جواب  $gbest$  شود. نحوه تغییرات این پارامترها در بخش شبیه‌سازی‌ها ذکر شده است.

## ۵- الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم تکامل تفاضلی، علاوه بر همگرایی سریع آن، عدم گیرافتادن در بهینه محلی است [۲۲]. ولی الگوریتم معرفی شده در بخش قبل، الگوریتمی است که برای حل مسایل بهینه‌سازی تک‌هدفه کاربرد دارد اما مسأله مورد نظر در این مقاله از نوع مسایل بهینه‌سازی چندهدفه است. در مسایل بهینه‌سازی چندهدفه، پیدا کردن یک جواب منحصر به فرد که بتواند به طور هم‌زمان تمامی

پارامترهای کنترلی که وظیفه هدایت الگوریتم جهت دستیابی به پاسخ بهینه سراسری را بر عهده دارند نیز می‌تواند به عنوان یکی دیگر از مزایای این الگوریتم به شمار آید. روند اجرای الگوریتم در ادامه آمده است [۲۱].

### ۴-۱ تولید جمعیت اولیه

در این الگوریتم همانند سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، ابتدا جمعیت اولیه‌ای به صورت تصادفی و در محدوده مقادیر مسأله تولید می‌شود.

### ۴-۲ اعمال عملگر جهش

در این مرحله دو عضو از بین اعضای جمعیت به صورت تصادفی انتخاب و طبق رابطه زیر با یکدیگر ادغام و یک عضو جدید تولید می‌شود

$$Temp\_x_i = x_i + \lambda \times (gbest - x_i) + F \times (x_{r_1} - x_{r_2}) \quad (13)$$

$$gbest \neq x_{r_1} \neq x_{r_2} \neq x_i$$

در رابطه فوق  $gbest$  بهترین عضو جمعیت،  $x_{r_1}$  و  $x_{r_2}$  دو عضو دلخواه از جمعیت و  $x_i$  نیز عضوی است که عملگر جهش بر روی آن انجام می‌شود. پارامترهای  $\lambda$  و  $F$  نیز سرعت همگرایی الگوریتم را کنترل می‌کنند. مقادیر این دو پارامتر معمولاً در محدوده صفر تا دو در نظر گرفته می‌شود.

### ۴-۳ اعمال عملگر ترکیب

در این مرحله متناظر با هر یک از ژن‌های عضو جهش‌یافته، یک عدد تصادفی در محدوده صفر و یک تولید و سپس طبق رابطه زیر که عمل ترکیب نامیده می‌شود عضو جدید به وجود می‌آید [۲۱]

$$u_{ij} = \begin{cases} Temp\_x_{ij} & \text{if } rand < CR \\ x_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

در رابطه فوق  $u_{ij}$  بیانگر ژن  $i$ ام از کروموزوم  $i$ ام و  $CR$  نیز احتمال انجام ترکیب است که مقدار آن معمولاً بین صفر تا یک انتخاب می‌شود. فرایند عمل ترکیب در الگوریتم تکامل تفاضلی شباهت بسیار زیادی با الگوریتم ژنتیک دارد. در هر دو الگوریتم تعدادی از ژن‌های والد به فرزند منتقل می‌شود و به همین دلیل معمولاً در الگوریتم تکامل تفاضلی  $x_i$  را والد اصلی و  $u_i$  را فرزند می‌نامند.

### ۴-۴ عمل انتخاب

در این مرحله، مقدار تابع هدف فرزند و والد با هم مقایسه می‌شود. در صورتی که فرزند بهتر از والد باشد فرزند جایگزین والد می‌شود و در غیر این صورت همان والد به نسل بعد منتقل خواهد شد.

### ۴-۵ همگرایی الگوریتم تکامل تفاضلی

در حالت کلی مهم‌ترین عاملی که باعث افزایش سرعت همگرایی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند در بهینه‌های محلی می‌شود، ایجاد مصالحه بین دو مفهوم اکتشاف و استخراج است. مفهوم اکتشاف به الگوریتم این امکان را می‌دهد که بتواند جهت دستیابی به پاسخ‌های جدید، فضای جواب مسأله را با بالاترین راندمان و بدون گیرافتادن در بهینه‌های محلی جستجو نماید. به عبارت دیگر در یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند، اکتشاف به معنای توانایی الگوریتم در جستجوی مناطق مختلف فضای جواب جهت یافتن پاسخ‌های جدید است.

$$CD_{im} = \frac{f_m(x_{i+1}) - f_m(x_{i-1})}{f_m(x_{\max}) - f_m(x_{\min})}, \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (15)$$

$$CD_i = \sum_{m=1}^M CD_{im}$$

در رابطه فوق  $CD_{im}$  فاصله اقلیدسی  $i$  امین عضو در جهت تابع هدف  $m$ ام،  $f_m(x_{\max})$  و  $f_m(x_{\min})$  به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه  $m$  امین تابع هدف به ازای  $i$  امین عضو و  $CD_i$  فاصله ازدحامی  $i$  امین عضو می‌باشد. هرچه فاصله ازدحامی مربوط به یک عضو بزرگ‌تر باشد به معنی آن است که در محدوده بیشتری از آن عضو، جواب بهینه پارتو وجود ندارد. بنابراین آن محدوده جزو محدوده‌های بکر محسوب شده و اعضای بیشتری باید به سمت این محدوده همگرا شوند. بعد از تعیین فاصله ازدحامی اعضای موجود در آرشیو، برای انتخاب  $gbest$  متناظر با هر عضو جمعیت از روش چرخ رولت استفاده می‌کنیم. در این روش احتمال انتخاب هر عضو متناسب با میزان فاصله ازدحامی آن خواهد بود. به عبارت دیگر عضو  $i$  که فاصله ازدحامی بزرگ‌تری دارد شانس بیشتری برای انتخاب شدن به عنوان  $gbest$  خواهد داشت. این امر باعث خواهد شد جواب‌ها به بخش‌هایی از فضای مسأله همگرا شوند که پراکندگی در آنها بیشتر است.

در مسایل بهینه‌سازی چندهدفه چون حداقل دو تابع هدف وجود دارد دیگر نمی‌توان در خصوص بهبود یک جواب به صورت قطعی نظر داد. برای رفع این مشکل عملگر انتخاب در الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه را به صورت زیر اصلاح می‌کنیم:

اگر فرزند، والد را مغلوب نماید فرزند جایگزین والد خواهد شد ولی اگر والد فرزند را مغلوب نماید والد به عنوان عضو بهتر به نسل بعد منتقل می‌شود. اگر والد و فرزند هیچ یک بر همدیگر غلبه نکنند، چون فقط یکی از آنها می‌بایست به نسل بعد منتقل شود با احتمال مساوی یکی از آنها را به صورت تصادفی به نسل بعد منتقل می‌کنیم.

شبه‌کد الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه به صورت زیر است:

۱) تعیین پارامترهای مورد نیاز الگوریتم مانند تعداد اعضای جمعیت، تعداد تکرار، احتمال عمل ترکیب، همچنین مقادیر پارامترهای  $\lambda$  و  $F$ .

۲) ایجاد جمعیت اولیه به صورت تصادفی.

۳) محاسبه توابع هدف به ازای تمامی اعضای جمعیت.

۴) تعیین اعضای نامغلوب (جواب‌های پارتو) در صورت وجود و انتقال آنها به لیست آرشیو.

۵) محاسبه فاصله ازدحامی هر عضو موجود در لیست آرشیو (در صورت وجود عضو).

۶) برای هر عضو از جمعیت با مکانیزم چرخ رولت و بر اساس فاصله ازدحامی  $gbest$  تعیین شود. در صورت خالی بودن لیست آرشیو، یک عضو به صورت تصادفی از بین اعضای جمعیت انتخاب شود.

۷) انجام مراحل زیر برای تمامی اعضای جمعیت:

۷-۱) اعمال اپراتور جهش طبق (۱۳).

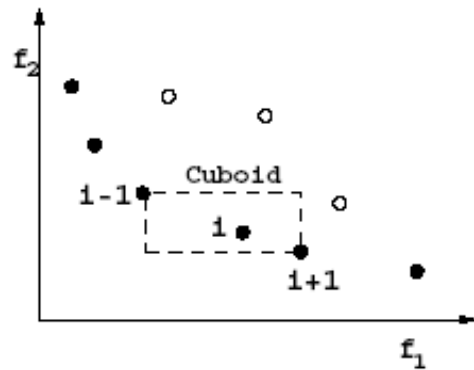
۷-۲) اعمال اپراتور ترکیب طبق (۱۴).

۷-۳) اعمال اپراتور انتخاب اصلاح‌شده برای الگوریتم چندهدفه.

۸) تعیین اعضای نامغلوب جدید و اضافه کردن آنها به لیست آرشیو.

۹) مقایسه اعضای موجود در لیست آرشیو و حذف اعضای مغلوب.

۱۰) در صورتی که شرط خاتمه محقق نشده، الگوریتم از مرحله ۵ تکرار شود.



شکل ۱: مفهوم فاصله ازدحامی برای عضو  $i$  ام.

توابع هدف را بهینه نماید تقریباً غیر ممکن است. با این حال می‌توان به مجموعه‌ای از جواب‌ها دست یافت که بهترین تعامل را بین اهداف برقرار کنند. به این مجموعه جواب‌ها، جواب‌های پارتو یا جبهه پارتو گفته می‌شود [۲۳]. جبهه پارتو در حقیقت همان جواب‌های بهینه‌ای است که توسط هیچ جواب دیگری از مجموعه جواب‌ها مغلوب نمی‌شوند. در ادامه با استفاده از توضیحات فوق، الگوریتم تکامل تفاضلی تک‌هدفه معرفی شده در بخش قبل را به گونه‌ای تعمیم می‌دهیم که قابل استفاده برای حل مسأله بهینه‌سازی چندهدفه نیز باشد.

برای این که الگوریتم تکامل تفاضلی بتواند در حل مسایل چندهدفه به کار رود، ابتدا مفهومی به نام لیست آرشیو را معرفی می‌کنیم. لیست آرشیو لیستی است که جواب‌های بهینه به مفهوم پارتو در آن قرار می‌گیرند یعنی جواب‌هایی که اولاً مغلوب هیچ یک از اعضا نمی‌شوند و ثانیاً بهبود در یک تابع هدف، منجر به بدتر شدن حداقل یک تابع هدف دیگر می‌شود.

در شروع الگوریتم این لیست خالی بوده و هیچ جوابی در آن قرار ندارد. بعد از اجرای اولین تکرار، تمامی جواب‌ها با هم مقایسه شده و جواب‌هایی که توسط هیچ یک از اعضای جمعیت مغلوب نشده‌اند به این لیست منتقل می‌شوند. لازم به ذکر است این احتمال وجود دارد که در چندین تکرار، هیچ جواب بهینه‌ای به مفهوم پارتو به وجود نیاید و بنابراین لیست آرشیو همچنان خالی خواهد بود. این بدین معنی است که هر عضو حداقل توسط یک عضو دیگر مغلوب شده است. در تکرارهای بعدی نیز بعد از تولید فرزند و اعمال اپراتور انتخاب، ابتدا تمامی اعضای جدید با هم مقایسه شده و اعضای نامغلوب به لیست آرشیو اضافه می‌شوند. با توجه به این که اعضای جدید منتقل شده به لیست آرشیو ممکن است توسط یک یا چند عضو قبلی لیست مغلوب شوند یا بالعکس تعدادی از اعضای قبلی لیست مغلوب این اعضای جدید گردند، می‌بایست در هر تکرار الگوریتم و بعد از اضافه شدن اعضای جدید به لیست، لیست آرشیو مجدداً پالایش شده و اعضای مغلوب حذف شوند. این فرایند تا زمانی که شرط خاتمه الگوریتم برآورده نشود تکرار خواهد شد.

در این مقاله برای حفظ تنوع و توزیع مناسب جواب‌های پارتو، برای انتخاب  $gbest$  در (۱۳) از ترکیب روش چرخ رولت و مفهوم فاصله ازدحامی استفاده شده است. فاصله ازدحامی مشخص می‌کند مقدار فاصله هر عضو موجود در لیست آرشیو با دو عضو مجاور خود (که آنها نیز در لیست آرشیو هستند) چقدر است. این مفهوم برای یک مسأله بهینه‌سازی دوهدفه در شکل ۱ نشان داده شده است. برای محاسبه فاصله ازدحامی اعضای موجود در لیست آرشیو به صورت زیر عمل می‌کنیم. ابتدا تمامی اعضای موجود در لیست را بر حسب توابع هدف به صورت صعودی مرتب می‌کنیم و سپس با استفاده از (۱۵) فاصله ازدحامی هر عضو را به دست می‌آوریم [۲۳]

جدول ۲: پارامترهای پیشنهاد واحد های تولیدی شبکه IEEE.

| Generators | $a_i$   | $b_i$  |
|------------|---------|--------|
| G1         | ۰٫۰۱۱۳۱ | ۱۲٫۱۴۵ |
| G2         | ۰٫۰۱۱۳۱ | ۱۲٫۱۴۵ |
| G3         | ۰٫۰۱۲۲  | ۱۷٫۹۲۴ |
| G4         | ۰٫۰۰۳   | ۲۰٫۰۲۳ |
| G5         | ۰٫۰۰۱   | ۱۰۰    |
| G6         | ۰٫۰۰۶۶۷ | ۹٫۲۷۰۶ |
| G7         | ۰٫۰۰۶۶۷ | ۹٫۲۷۰۶ |
| G8         | ۰٫۰۰۰۲۸ | ۵٫۳۴۵  |
| G9         | ۰٫۰۰۰۲۸ | ۵٫۳۴۵  |
| G10        | ۰٫۰۰۱   | ۰٫۵    |
| G11        | ۰٫۰۰۳۹۲ | ۸٫۹۱۹  |

جدول ۱: هزینه نصب خطوط در حریم های جدید شبکه ۲۴ باسه.

| From | To | Investment Cost (M\$) | From | To | Investment Cost (M\$) |
|------|----|-----------------------|------|----|-----------------------|
| ۱    | ۸  | ۳٫۱۵                  | ۱۳   | ۱۴ | ۱۵٫۵                  |
| ۲    | ۸  | ۲٫۸۹                  | ۱۴   | ۲۳ | ۲۱٫۵                  |
| ۶    | ۷  | ۴٫۳۶                  | ۱۶   | ۲۳ | ۲۸٫۵                  |
| ۶    | ۸  | ۱٫۵۸                  | ۱۹   | ۲۳ | ۲۱                    |
| ۷    | ۲  | ۲٫۱۹                  | ۲۰   | ۲۲ | ۹                     |

## ۶- آنالیز تصمیم گیری

بر خلاف مسایل بهینه سازی تک هدفه، حل مسایل بهینه سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی هوشمند، منجر به مجموعه ای از جواب های بهینه خواهد شد که هیچ کدام آنها نسبت به هم برتری ندارند و هر یک به نوعی بیانگر جواب مسئله هستند. بنابراین می بایست با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی از بین چندین جواب به دست آمده، مطلوب ترین آنها را انتخاب نمود. در این مقاله برای انتخاب بهینه ترین طرح از بین طرح های موجود از روش تصمیم گیری فازی max-min استفاده شده است. در این روش از تصمیم گیرنده خواسته می شود تا برای هر تابع هدف، مقدار مطلوبش را که سطوح ارضا نامیده می شود مشخص نماید. سیستم تصمیم گیر فازی با توجه به این سطوح، طرح نهایی را انتخاب می کند. بدین منظور ابتدا برای هر یک از توابع هدف  $f_i$  یک تابع عضویت فازی  $\mu_{f_i}$  تعریف می کنیم. این تابع عضویت می تواند هر مقداری بین صفر و یک را به خود اختصاص دهد. چنانچه طراح شبکه رضایت کامل از تابع هدف  $f_i$  داشته باشد در این صورت تابع عضویت متناظر با آن برابر یک خواهد بود. بالعکس اگر مقدار تابع عضویت یک تابع هدف برابر صفر باشد طراح کمترین میزان رضایت را از این تابع هدف خواهد داشت. در این مقاله تابع عضویت متناظر با هر یک از توابع هدف به صورت (۱۶) تعریف شده است

$$\mu_{f_i} = \begin{cases} 0 & f_i(X) > f_i^{\max} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(X)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i(X) \leq f_i^{\max} \\ 1 & f_i(X) < f_i^{\min} \end{cases} \quad (16)$$

در رابطه فوق  $\mu_{f_i}$  مقدار تابع عضویت متناظر با تابع هدف  $i$  ام و پارامترهای  $f_i^{\max}$  و  $f_i^{\min}$  مقادیر واقعی، بیشینه و کمینه  $i$  امین تابع هدف هستند. متغیر  $X$  نیز همان جواب های پارتو می باشند. در مرحله بعد با توجه به سطح مطلوبی که توسط سیستم تصمیم گیر فازی انتخاب شده، طرح بهینه نهایی طبق (۱۷) که موسوم به فازی max-min است محاسبه می شود [۲۴]

$$\min \{ \max | \mu_{d_i} - \mu_{f_i}(X) | \} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

در رابطه فوق  $m$  تعداد توابع هدف است.

## ۷- شبیه سازی و تحلیل نتایج

### ۷-۱ معرفی شبکه مورد مطالعه

در این بخش با اعمال روش ها و الگوریتم های پیشنهادی، مسأله برنامه ریزی توسعه شبکه های انتقال را در یک محیط تجدید ساختار یافته تجزیه و تحلیل خواهیم کرد. شبکه مورد مطالعه در این مقاله، شبکه

قدرت ۲۴ شینه IEEE است که اطلاعات آن در [۲۵] آمده و این سیستم دارای ۳۲ ژنراتور با ظرفیت های ۱۲ تا ۴۰۰ مگاوات می باشد. شبکه انتقال این سیستم متشکل از ۳۸ خط انتقال و ۵ ترانسفورماتور است و شین های این سیستم از ۱۰ شین ژنراتوری، ۱۰ شین بار و ۴ شین اتصال تشکیل شده است. ظرفیت نصب شده در این شبکه، ۳۴۰۵ مگاوات و پیک بار آن ۲۸۵۰ مگاوات است. دیاگرام تک خطی و اطلاعات شبکه مانند مشخصات خطوط انتقال و واحدهای تولیدی در [۲۵] ارائه شده اند. در شبیه سازی ها فرض کرده ایم که سیستم برای ده سال آینده با افزایش میزان تولید و بار به اندازه ۲/۲ برابر مقدار اولیه آن گسترش خواهد یافت. در این صورت میزان بار شبکه به مقدار ۶۲۷۰ مگاوات و میزان تولید کل شبکه به ۷۴۹۰ مگاوات خواهد رسید. تعداد کاندیدای خطوط جدید را ۴۴ در نظر گرفته ایم و همچنین فرض کرده ایم که ۳۴ تای آنها در حریم کنونی و ۱۰ کاندید دیگر در حریم جدید باشند. اطلاعات مربوط به این خطوط در جدول ۱ آورده شده است [۱۷]. هزینه سرمایه گذاری را برای نصب خطوط جدید ۱۲۰۰ دلار بر مگاوات- مایل در نظر گرفته ایم [۱۰]. پارامترهای پیشنهاد قیمت واحدهای تولیدی نیز مطابق جدول ۲ انتخاب شده است [۲۶].

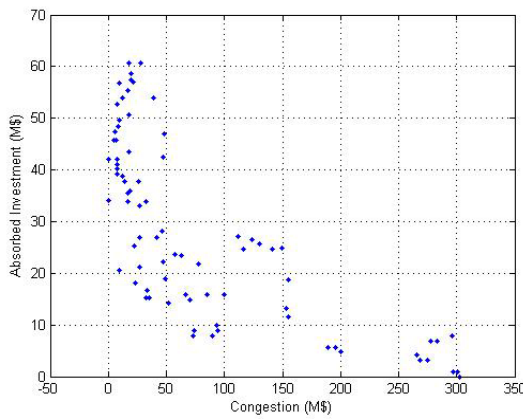
### ۷-۲ معرفی حالات مختلف

معمولاً روش های موجود برای محاسبه هزینه استفاده از خطوط انتقال به گونه ای هستند که فقط بیانگر نحوه بازگشت هزینه ها می باشند و اثری از زمان در این بازیابی هزینه ها وجود ندارد. لذا نیازمند تعریف یک ضریب بازگشت سرمایه  $(\alpha)$  خواهیم بود که مشخص کند نرخ بازگشت سرمایه در محدوده زمانی مثلاً یک سال چقدر خواهد بود. تعیین مناسب  $\alpha$  در تعیین نرخ بازگشت سرمایه واقعی بسیار مؤثر است. این پارامتر به عوامل مختلفی همچون مکانیزم بازیابی هزینه ها و نرخ سود بانکی وابسته است. در ادامه روش پیشنهادی برای مکانیزم قیمت گذاری برای سه حالت با ضریب بازگشت سرمایه مختلف آزمایش شده است.

### ۷-۳ نتایج اعمال الگوریتم پیشنهادی

در این بخش نتایج شبیه سازی ها در قالب سه سناریو ارائه شده و پارامترهای الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه به شرح زیر انتخاب شده اند

$$\begin{aligned} N_p &= 200, \quad CR = 0.85, \quad MaxGen = 300 \\ CR_{\max} &= \lambda_{\max} = F_{\max} = 0.95 \\ CR_{\min} &= \lambda_{\min} = F_{\min} = 0.25 \\ \lambda &= \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \frac{Iter}{Maxgen} \end{aligned} \quad (18)$$



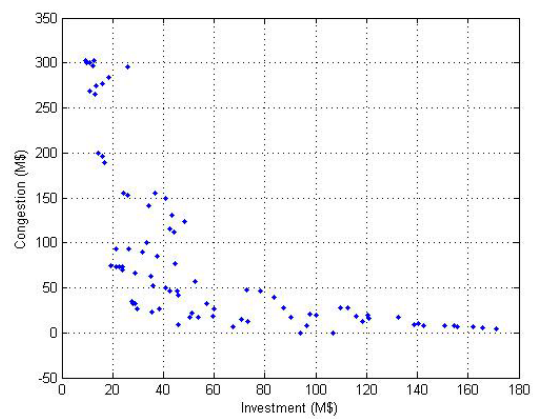
شکل ۴: ناحیه مصالحه بین کل هزینه پرشدگی و میزان سرمایه‌گذاری جذب‌شده.

میلیون دلار)، هزینه پرشدگی در کل دوره برنامه‌ریزی (میلیون دلار) و میزان سرمایه جذب‌شده (میلیون دلار) اعمال شده است. تعداد خطوط اضافه‌شده بین ۴ تا ۳۶ بوده و میزان سرمایه جذب‌شده خصوصی بین ۰ تا ۷۲ درصد کل سرمایه‌گذاری در برنامه مربوط می‌باشد. با شرایط فوق کلاً ۸ خط قابل نصب است که ۴ خط آن جذاب می‌باشد. شکل ۲ پاسخ‌های بهینه بر اساس دو تابع هدف هزینه سرمایه‌گذاری و کل هزینه پرشدگی را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود هزینه پرشدگی در طول دوره برنامه‌ریزی با میزان سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده رابطه عکس دارد. این شکل به طور ضمنی بیان می‌کند با افزایش سرمایه‌گذاری‌ها، خطوط انتقال احداث‌شده در حریم‌ها نیز افزایش یافته و در نتیجه میزان پرشدگی خطوط و هزینه‌های ناشی از آنها کمتر می‌شود.

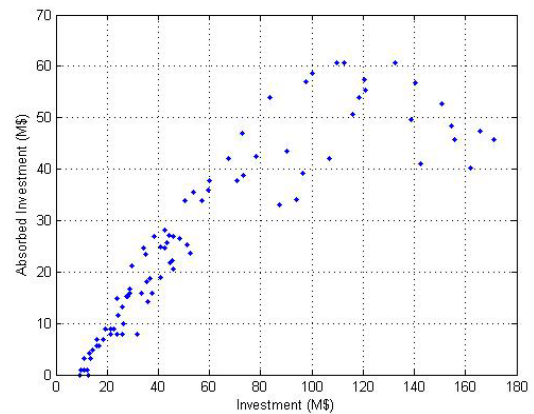
شکل ۳ ناحیه مصالحه بین میزان کل سرمایه‌گذاری و سرمایه جذب‌شده از بخش خصوصی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود بین هزینه سرمایه‌گذاری و میزان سرمایه جذب‌شده ارتباطی وجود دارد. علت این ارتباط را می‌توان این گونه توجیه نمود که با افزایش سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، تعداد خطوط نیز بیشتر شده و در نتیجه هزینه پرشدگی کاهش می‌یابد. هرچه هزینه پرشدگی کمتر شود و یا ظرفیت حریم‌ها افزایش یابد اندازه فلوی عبوری از کل شبکه انتقال شبکه نیز بیشتر خواهد شد. چون میزان درآمد با فلوی خط انتقال رابطه مستقیم دارد بنابراین طبق رابطه میزان درآمد از خطوط یا هزینه تخصیص‌یافته به خط انتقال، درآمدهای شبکه افزایش یافته و می‌توان انتظار داشت خطوط جذاب‌تر و در نتیجه سرمایه جذب‌شده بیشتر شود. همچنین با توجه به این شکل مشاهده می‌شود از یک حدی به بعد با افزایش سرمایه‌گذاری و کم‌شدن هزینه پرشدگی، جذابیت خطوط و سرمایه جذب‌شده ثابت می‌ماند.

شکل ۴ جواب‌های پارتویی را که به ازای آنها هزینه پرشدگی و میزان سرمایه جذب‌شده بهینه خواهند شد نشان می‌دهد. همان طور که قبلاً نیز ذکر شد همگام با کم‌شدن هزینه پرشدگی، با افزایش سرمایه‌گذاری و افزایش خطوط انتقال، ظرفیت حریم‌ها نیز به دلیل نصب خطوط جدید، بیشتر شده و در نتیجه اندازه فلوی عبوری از شبکه انتقال افزایش خواهد یافت. از آنجا که درآمد به دست آمده از شبکه انتقال وابسته به فلوی عبوری از خطوط می‌باشد افزایش فلوی کلی شبکه می‌تواند منجر به افزایش درآمدهای شبکه انتقال گردد. افزایش این درآمدها نیز به نوبه خود می‌تواند انتظار جذب سرمایه خصوصی را افزایش دهد.

در شکل‌های ۵ تا ۷ نتایج برای حالتی که ضریب بازگشت سرمایه نامی  $\alpha$  برابر ۰٫۳۵ باشد آورده شده است. در این حالت نیز مانند حالت قبل، مکانیزم بازیابی هزینه‌های خطوط، روش ظرفیت استفاده‌نشده با در



شکل ۲: ناحیه مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و کل هزینه پرشدگی خطوط.



شکل ۳: ناحیه مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و میزان سرمایه‌گذاری خصوصی جذب‌شده.

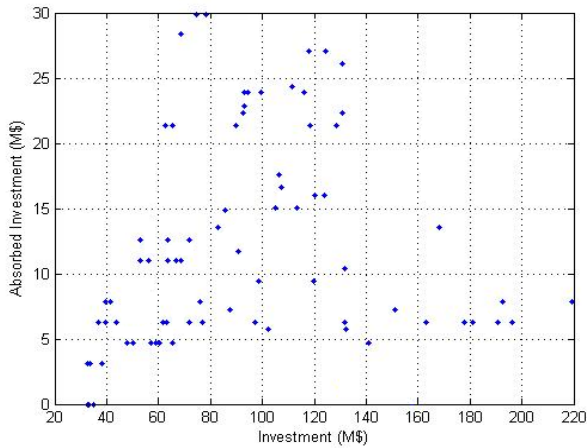
$$F = F_{\max} + (F_{\min} - F_{\max}) \frac{Iter}{Maxgen} \quad (19)$$

$$CR = CR_{\max} + (CR_{\min} - CR_{\max}) \frac{Iter}{Maxgen} \quad (20)$$

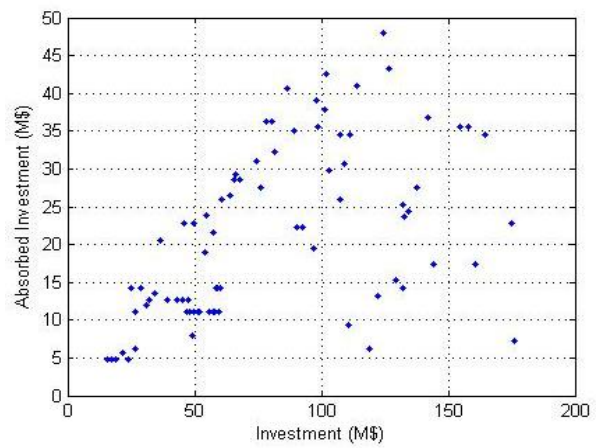
که  $N_p$  تعداد اعضای جمعیت،  $Iter$  تعداد تکرار و  $MaxGen$  حداکثر تعداد تکرار یا همان شرط خاتمه الگوریتم است. ظرفیت لیست آرشیو نیز برابر تعداد اعضای جمعیت در نظر گرفته شده است. طبق (۱۸) تا (۲۰) مشاهده می‌شود جهت ایجاد تعادل بین دو مفهوم اکتشاف و استخراج در الگوریتم، مقادیر پارامترهای  $F$  و  $CR$  به صورت خطی از یک مقدار بیشینه به یک مقدار کمینه کاهش می‌یابند در حالی که در همان زمان و طی فرایند اجرای الگوریتم، پارامتر  $\lambda$  از یک مقدار کمینه به یک مقدار بیشینه می‌رسد به طوری که در تکرارهای پایانی الگوریتم، یک جستجوی محلی در همسایگی بهترین جواب انجام شده و تقریباً تمامی جواب‌های مسأله به جواب بهینه سراسری همگرا می‌شوند.

مکانیزم بازیابی هزینه‌های خطوط انتقال نیز روش ظرفیت استفاده‌نشده با در نظر گرفتن هزینه منفی یا اعتبار برای مبادلاتی که جهششان خلاف جهت شارش اصلی توان خط انتقال باشد، انتخاب شده است. حداقل نرخ بازگشت سرمایه مورد نظر برای تمامی سناریوها برابر ۱۶ درصد انتخاب شده است [۲۰]. با توجه به وجود عدم قطعیت در بار هر شین و قیمت پیشنهادی واحدهای تولیدی، برای حل پخش بار بهینه احتمالی از روش تخمین دونقطه‌ای استفاده شده است [۲۷]. در سناریوی اول فرض شده است ضریب بازگشت سرمایه ( $\alpha$ ) برابر ۰٫۴ باشد. الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴‌شینه IEEE و با سه تابع هدف سرمایه‌گذاری (بر حسب

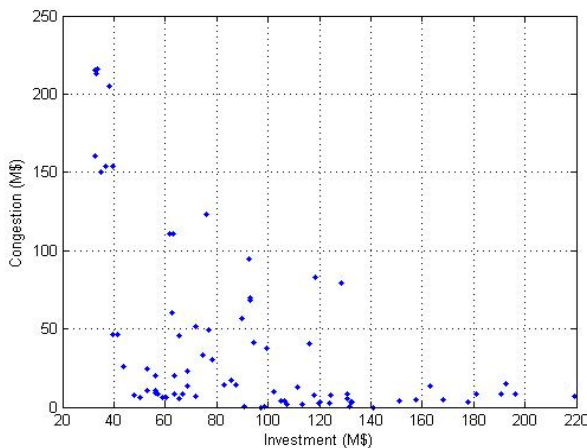




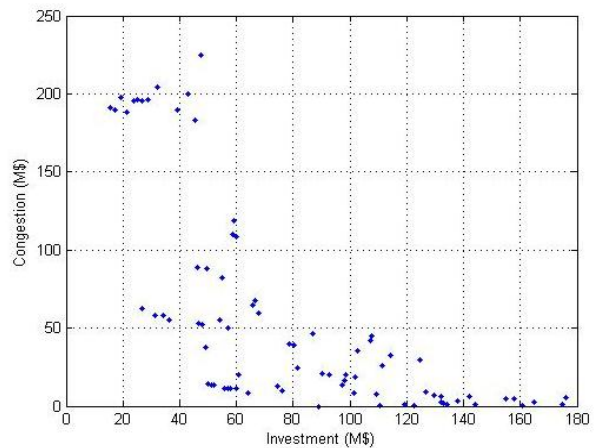
شکل ۸: نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و میزان سرمایه جذب‌شده.



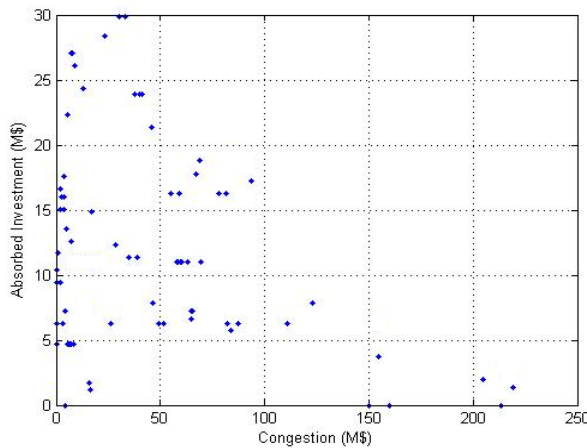
شکل ۵: نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و میزان سرمایه جذب‌شده.



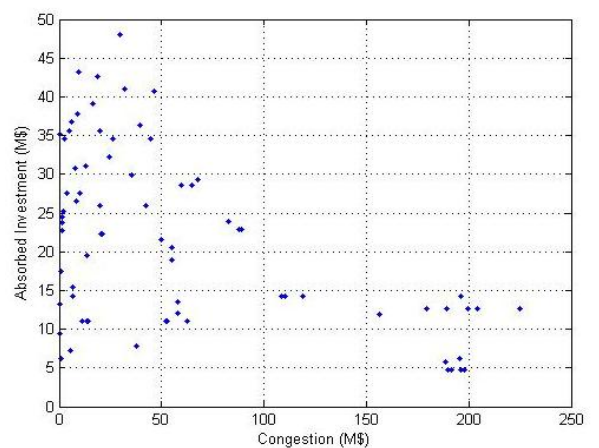
شکل ۹: نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه پرشدگی.



شکل ۶: نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه پرشدگی.



شکل ۱۰: نمودار مصالحه بین هزینه پرشدگی و میزان سرمایه جذب‌شده.



شکل ۷: نمودار مصالحه بین هزینه سرمایه جذب‌شده و میزان هزینه گرفتگی.

لذا دلایل ذکرشده در بخش قبل نیز در اینجا صادق خواهد بود. شکل ۷ تأییدی بر این مطلب است که وقتی مکانیزم قیمت‌گذاری، ظرفیت استفاده‌نشده با در نظر گرفتن هزینه منفی یا اعتبار برای مبادلات خلاف جهت شارش توان اصلی می‌شود مشاهده می‌شود میزان سرمایه جذب‌شده نسبت به حالت قبل کمتر شده است چرا که در این حالت ضریب بازگشت سرمایه نامی کمتر شده که این خود باعث جذابیت کمتر خطوط خواهد شد. با اضافه‌شدن هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه پرشدگی خطوط نیز کاهش می‌یابد.

در حالت سوم فرض کرده‌ایم ضریب بازگشت سرمایه  $\alpha$  برابر ۰/۳۵ باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های این سناریو در شکل ۸ تا ۱۰ آورده شده است. همان طور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود میزان سرمایه جذب‌شده کمتر شده و علت آن طبق استدلال سناریوهای قبل، همان کمترشدن ضریب

نظر گرفتن هزینه منفی یا اعتبار برای مبادلاتی که جهتشان خلاف جهت شارش اصلی توان خط انتقال در نظر گرفته شده، می‌باشد. در این حالت درصد بیشترین سرمایه جذب‌شده برابر ۰/۵۷ و کمترین آن نیز ۰/۰۴ است. همان طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود میزان سرمایه جذب‌شده نسبت به حالت قبل کمتر شده است چرا که در این حالت ضریب بازگشت سرمایه نامی کمتر شده که این خود باعث جذابیت کمتر خطوط خواهد شد. با اضافه‌شدن هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه پرشدگی خطوط نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۶ بیانگر افزایش سرمایه جذب‌شده همگام با کاهش هزینه پرشدگی است. روند نمودارهای به دست آمده مشابه حالات قبل است و



جدول ۳: طرح نهایی برای سناریوی اول ( $\alpha$  برابر ۰/۴).

| $\mu_{d1}$ | $\mu_{d2}$ | $\mu_{d3}$ | Investment Cost (M\$) | Total Congestion Cost (M\$) | Absorbed Investment (M\$) |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| ۰/۸        | ۱          | ۰/۹        | ۶۷,۳۷                 | ۷,۳                         | ۴۲,۰۱                     |
| ۰/۷        | ۰/۸        | ۰/۹        | ۷۲,۹۴                 | ۲۸,۰۴                       | ۴۶,۸۸                     |

جدول ۴: طرح نهایی برای سناریوی دوم ( $\alpha$  برابر ۰/۳۵).

| $\mu_{d1}$ | $\mu_{d2}$ | $\mu_{d3}$ | Investment Cost (M\$) | Total Congestion Cost (M\$) | Absorbed Investment (M\$) |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| ۰/۸        | ۱          | ۰/۹        | ۶۱,۸۹                 | ۶,۸                         | ۲۰,۶۶                     |
| ۰/۷        | ۰/۸        | ۰/۹        | ۸۹,۷۷                 | ۲۸,۵۲                       | ۵۷,۵۶                     |

جدول ۵: طرح نهایی برای سناریوی سوم ( $\alpha$  برابر ۰/۳).

| $\mu_{d1}$ | $\mu_{d2}$ | $\mu_{d3}$ | Investment Cost (M\$) | Total Congestion Cost (M\$) | Absorbed Investment (M\$) |
|------------|------------|------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| ۰/۸        | ۱          | ۰/۹        | ۸۶,۷                  | ۱۶,۳۱                       | ۴۰,۶۶                     |
| ۰/۷        | ۰/۸        | ۰/۹        | ۸۶,۷                  | ۱۶,۳۱                       | ۴۰,۶۶                     |

می‌یابد. دلیل این امر وجود رابطه مستقیم بین میزان سرمایه‌گذاری‌ها با مقدار سرمایه‌های جذب شده است.

در جدول ۶ خطوط اضافه شده به شبکه انتقال و میانگین نرخ بازگشت سرمایه آنها به ازای سطوح ارضای مشخص و به ازای  $\alpha$  های مختلف نشان داده شده است. به کمک این جداول می‌توان خطوطی که به عنوان نتیجه برنامه‌ریزی جهت تأمین محدودیت‌های فیزیکی شبکه و یا صرفاً جهت جذب سرمایه به شبکه انتقال اضافه شده‌اند را مشخص نمود.

برای مثال طبق نتایج جدول ۶ مشاهده می‌شود خط ۱۰-۶ در دو حالت  $\alpha$  برابر ۰/۴ و ۰/۳۵ جذاب بوده و به شبکه اضافه شده در حالی که به ازای  $\alpha$  برابر ۰/۳ جذاب نبوده و در نتیجه به شبکه اضافه نشده است. دلیل این امر نیز عدم تأثیر قابل ملاحظه آن بر هزینه پرشدگی است. تنها دلیل اضافه شدن آن به شبکه به ازای  $\alpha$  مساوی ۰/۴ و ۰/۳۵ صرفاً جذاب بودن آن از نظر نرخ بازگشت سرمایه است. همچنین طبق نتایج این جدول مشاهده می‌شود خط ۳-۱ در هر سه حالت به طرح بهینه اضافه شده در حالی که این خط برای هیچ کدام از حالت‌ها جذاب نبوده و صرفاً به دلیل کاهش پرشدگی خط به عنوان یکی از طرح‌های نهایی به شبکه اضافه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول فوق مشاهده می‌شود برای برآورده شدن اهداف مسأله، خطوط حریم‌های ۱-۳، ۱-۵، ۳-۲۴، ۱۰-۶، ۷-۸، ۱۰-۱۲، ۱۲-۱۳، ۱۲-۲۳، ۱۴-۱۶، ۱۵-۲۱، ۱۵-۲۴، ۱۶-۱۷، ۱۷-۱۸، ۲۰-۲۳ و ۲-۷ می‌بایست به شبکه اضافه شوند که از بین آنها فقط خطوط ۳-۲۴، ۱۰-۱۲، ۱۴-۱۶، ۱۵-۲۱، ۱۶-۱۷ و ۱۶-۱۷ و ۲-۷ برای بخش خصوصی جذاب می‌باشند و مابقی خطوط برای تأمین شرایط فیزیکی شبکه اضافه شده‌اند.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش نسبتاً جامعی برای برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال در محیط تجدید ساختار یافته ارائه گردید. ملاحظات فنی و اقتصادی مختلفی مانند کم کردن تعرفه نصب خطوط جدید، رقابتی ماندن بازار و دسترسی آسان مصرف‌کنندگان به انرژی ارزان و جلوگیری از قدرت بازار، انتقال انرژی قابل اطمینان به مصرف‌کننده و جذب سرمایه‌های بخش خصوصی مورد بررسی قرار داده شد. برای برآورده شدن این ملاحظات به ترتیب توابع هدفی همچون کمینه کردن هزینه سرمایه‌گذاری مورد نیاز جهت احداث خطوط جدید، کمینه کردن هزینه پرشدگی خطوط انتقال و

بازگشت سرمایه نامی است. در این حالت بیشترین درصد سرمایه جذب شده ۰/۴۱ و کمترین آن ۰ می‌باشد. روند نمودارها نیز مطابق سناریوهای قبل است.

با توجه به شبیه‌سازی‌های ارائه شده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که انتخاب ضریب بازگشت سرمایه نامی کاملاً وابسته به مکانیزم قیمت‌گذاری و حداقل نرخ بازگشت مطلوب (MARR) است. لذا در یک شبکه قدرت با تعیین مقدار مناسب این دو پارامتر، با مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و توجه به توپولوژی شبکه می‌توان اقدام به طراحی نرخ بازگشت سرمایه مطلوب برای شبکه انتقال نمود.

## ۷-۴ انتخاب طرح نهایی

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه، منجر به تولید چندین جواب بهینه خواهد شد که هیچ یک از آنها ارجحیتی نسبت به هم ندارند. بنابراین برای انتخاب یک جواب از بین چندین جواب به دست آمده می‌بایست از دانش یک فرد خبره استفاده کرد. مسأله مورد بررسی در این مقاله نیز منجر به چندین طرح بهینه برای احداث خطوط جدید شده است. در این بخش برای انتخاب یکی از چندین طرح بهینه موجود از روش تصمیم‌گیری فازی استفاده شده است. در این روش ابتدا با توجه به نظر فرد خبره، سطوح ارضای هر یک از توابع هدف انتخاب می‌گردد ( $\mu_{di}$ ). در ادامه تابع عضویت متناظر با جواب‌های پارتو به صورت نزولی مرتب می‌شوند و سپس سیستم تصمیم‌گیر فازی با استفاده از (۱۷) طرح نهایی را انتخاب می‌کند. لازم به ذکر است مقدار سطوح ارضا برای هر تابع هدف به عوامل متعددی مانند سقف بودجه به منظور سرمایه‌گذاری، محدودیت‌ها و نیازهای فنی شبکه و بازار وابسته است. در جداول ۳ تا ۵ طرح بهینه نهایی برای سه سناریوی مورد بررسی و به ازای سطوح ارضای مختلف آورده شده است.  $\mu_{d1}$ ،  $\mu_{d2}$  و  $\mu_{d3}$  به ترتیب سطوح ارضا برای توابع هدف هزینه سرمایه‌گذاری، کل هزینه پرشدگی و میزان سرمایه جذب شده است. توابع عضویت متناظر با هر یک از توابع هدف مطابق (۱۶) است.

همان‌طور که از این جداول مشاهده می‌شود با کم شدن  $\mu_{d1}$  از ۰/۸ به ۰/۷ و  $\mu_{d2}$  از ۱ به ۰/۸، هزینه سرمایه‌گذاری و کل هزینه پرشدگی افزایش یافته است. دلیل این امر حمایتی بودن رابطه بین این شاخص با هزینه پرشدگی خط است. همچنین با توجه به نتایج این جداول مشاهده می‌شود با افزایش سرمایه‌گذاری، میزان سرمایه جذب شده نیز افزایش

بیشینه کردن میزان جذب سرمایه از طرف بخش خصوصی تعریف گردید. برای تعیین میزان جذب سرمایه خصوصی، خطوط انتقال جذاب از نظر سرمایه‌گذار خصوصی، معیاری برای داشتن حداقل میانگین نرخ بازگشت سرمایه مشخص شد. جهت داشتن حداقل هزینه بهره‌برداری و قیود ایمنی شبکه، مسئله پخش بار بهینه ۲۲ به صورت زیر برنامه به کار گرفته شد. برای برآورده شدن تمامی توابع هدف مورد نظر و ایجاد مصالحه بین آنها، روش بهینه‌سازی الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه ارائه شد. اعمال روش بهینه‌سازی پیشنهادی منجر به تولید چندین طرح بهینه گردید که در نهایت با توجه به معیار تصمیم‌گیری فازی max-min و تعیین سطح مطلوب، طرح نهایی انتخاب شد. نتایج این برنامه‌ریزی، مجموعه‌ای از طرح‌های مختلف جهت احداث خطوط انتقال بود که هر یک تا حدی توابع هدف مورد نظر را ارضا می‌کردند. تعدادی از این خطوط از دیدگاه بخش خصوصی جذاب بودند چرا که ملاک تأمین سطح معینی از نرخ بازگشت سرمایه که مورد توجه بخش خصوصی است را برآورده می‌ساختند. اما بخش دیگری از خطوط جهت کم کردن هزینه پخش‌دهی شبکه و تأمین محدودیت‌های فیزیکی می‌بایست احداث شوند. با توجه به جذاب نبودن این خطوط از نقطه نظر بازگشت سرمایه، بخش دولتی می‌تواند احداث آنها را بر عهده گیرد. البته برای بازگشت هزینه‌های این خطوط می‌بایست مکانیزم قیمت‌گذاری مناسبی پیشنهاد شود تا این هزینه که منجر به کاهش میزان پخش‌دهی خطوط شده است در یک محدوده زمانی مشخص بازگشت داده شود.

## مراجع

- [1] H. Zhang, V. Vittal, G. T. Heydt, and J. Quintero, "A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1125-1133, May 2012.
- [2] H. Shayeghi and A. Bagheri, "Dynamic sub-transmission system expansion planning incorporating distributed generation using hybrid DCGA and LP technique," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 48, pp. 111-122, Jun. 2013.
- [3] S. Asadamongkol and B. Eua-arporn, "Transmission expansion planning with AC model based on generalized benders decomposition," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 47, pp. 402-407, May 2013.
- [4] R. Hemmati, R. A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "State-of-the-art of transmission expansion planning: comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 312-319, Jul. 2013.
- [5] A. Rastgou and J. Moshtagh, "Improved harmony search algorithm for transmission expansion planning with adequacy-security considerations in the deregulated power system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 153-164, Sept. 2014.
- [6] A. B. Babic, A. T. Saric, and A. Rankovic, "Transmission expansion planning based on locational marginal prices and ellipsoidal approximation of uncertainties," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 175-183, Dec. 2013.
- [7] A. A. Foroud, A. A. Abdoos, R. Keypour, and M. Amirahmadi, "A multi-objective framework for dynamic transmission expansion planning in competitive electricity market," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 8, pp. 861-872, Oct. 2015.
- [8] A. Mahmoudabadi and M. Rashidinejad, "An application of hybrid heuristic method to solve concurrent transmission network expansion and reactive power planning," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 45, pp. 71-77, Feb. 2013.
- [9] G. R. Kamyab, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Rashidinejad, "A PSO based approach for multi-stage transmission expansion planning in electricity markets," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 91-100, Jan. 2014.
- [10] M. Shivaie and M. T. Ameli, "An implementation of improved harmony search algorithm for scenario-based transmission expansion planning," *Soft Computing*, vol. 18, no. 8, pp. 1615-1630, Aug. 2014.
- [11] P. Murugan, "Modified particle swarm optimization with a novel initialization for finding optimal solution to the transmission expansion planning problem," *IET Generat. Transm. Distribut.*, vol. 6, no. 11, pp. 1132-1142, Nov. 2013.

جدول ۶: خطوط اضافه‌شده برای حالت‌های مختلف،  $\mu_{d1} = 0.8$ ،  $\mu_{d2} = 1$  و  $\mu_{d3} = 0.9$ .

| Location |    | $\alpha = 0.4$<br>(case 1) |                   | $\alpha = 0.35$<br>(case 2) |                   | $\alpha = 0.3$<br>(case 3) |                   |
|----------|----|----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| From     | To | $I^1$                      | RoR $_i^T$<br>(%) | $I^1$                       | RoR $_i^T$<br>(%) | $I^1$                      | RoR $_i^T$<br>(%) |
| ۱        | ۲  | -                          | -                 | ۱                           | ۰.۰۳۶             | ۱                          | ۶.۰۲              |
| ۱        | ۳  | ۱                          | ۰.۹۵              | ۱                           | ۶.۴۱              | ۱                          | ۰.۲۰۷             |
| ۱        | ۵  | ۱                          | ۸.۵۲              | ۱                           | ۳.۳۱              | -                          | -                 |
| ۲        | ۴  | -                          | -                 | -                           | -                 | ۱                          | ۱.۸۳              |
| ۲        | ۶  | -                          | -                 | -                           | -                 | ۱                          | ۴.۵۵              |
| ۳        | ۹  | -                          | -                 | -                           | -                 | ۱                          | ۵.۲۲              |
| ۳        | ۲۴ | ۱                          | ۲۲.۱۳             | ۱                           | ۱۳.۱۵             | ۱                          | ۱۷.۳۴             |
| ۴        | ۹  | -                          | -                 | ۱                           | ۱.۴۱              | -                          | -                 |
| ۵        | ۱۰ | -                          | -                 | ۱                           | ۵.۴۸              | -                          | -                 |
| ۶        | ۱۰ | ۱                          | ۲۲.۳۸             | ۱                           | ۱۷.۱۴             | -                          | -                 |
| ۷        | ۸  | ۱                          | ۵.۷۷              | ۱                           | ۳.۸۹              | ۱                          | ۴.۲۲              |
| ۸        | ۹  | -                          | -                 | -                           | -                 | ۱                          | ۸.۶۷              |
| ۸        | ۱۰ | -                          | -                 | -                           | -                 | ۱                          | ۰.۹۹              |
| ۹        | ۱۱ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۹        | ۱۲ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۰       | ۱۱ | -                          | -                 | ۱                           | ۱۶.۱۲             | -                          | -                 |
| ۱۰       | ۱۲ | ۱                          | ۱۹.۷۴             | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۱       | ۱۳ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۱       | ۱۴ | -                          | -                 | ۱                           | ۱۶.۳۲             | -                          | -                 |
| ۱۲       | ۱۳ | ۱                          | ۳.۷۶              | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۲       | ۲۳ | ۱                          | ۱۸.۷۳             | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۳       | ۲۳ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۴       | ۱۶ | ۱                          | ۲۵.۰۳             | ۱                           | ۱۸.۰              | -                          | -                 |
| ۱۵       | ۱۶ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۵       | ۲۱ | ۱                          | ۱۷.۳۵             | -                           | -                 | ۱                          | ۷.۲۴              |
| ۱۵       | ۲۴ | ۱                          | ۱۵.۷۹             | -                           | -                 | ۱                          | ۱۱.۹۳             |
| ۱۶       | ۱۷ | ۱                          | ۲۳.۵۸             | -                           | -                 | ۱                          | ۴.۹۷              |
| ۱۶       | ۱۹ | -                          | -                 | ۱                           | ۵.۵۴              | -                          | -                 |
| ۱۷       | ۱۸ | ۱                          | ۱۰.۴۷             | ۱                           | ۵.۲               | ۱                          | ۱.۵               |
| ۱۷       | ۲۲ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۸       | ۲۱ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۹       | ۲۰ | -                          | -                 | -                           | -                 | ۱                          | ۱۱.۵۹             |
| ۲۰       | ۲۳ | ۱                          | ۴.۱۴              | ۱                           | ۵.۵۶              | -                          | -                 |
| ۲۱       | ۲۲ | -                          | -                 | ۱                           | ۶.۲۹              | -                          | -                 |
| ۶        | ۸  | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۷        | ۲  | ۱                          | ۳۳.۴۸             | ۱                           | ۲۷.۹۸             | ۱                          | ۱۵.۹              |
| ۱        | ۸  | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۲۰       | ۲۲ | -                          | -                 | ۱                           | ۲۷.۶۱             | ۱                          | ۲۰.۵۷             |
| ۲        | ۸  | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۶        | ۷  | ۱                          | ۵.۲۵              | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۳       | ۱۴ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۴       | ۲۳ | -                          | -                 | ۱                           | ۱۹.۵۶             | ۱                          | ۱۶.۵۱             |
| ۱۶       | ۲۳ | -                          | -                 | -                           | -                 | -                          | -                 |
| ۱۹       | ۲۳ | -                          | -                 | ۱                           | ۰.۹۶              | -                          | -                 |

۱: وضعیت نصب خطوط انتقال

۲: نرخ بازگشت سرمایه ناشی از احداث خط انتقال در محل  $l$ .

- frequency control considering nonlinear factors and uncertainties," *Tabriz J. of Electrical Eng.*, vol. 46, no. 3, pp. 246-253, Oct. 2016.
- [22] J. Brest, S. Greiner, B. Boskovic, M. Mernik, and V. Zumer, "Self-adapting control parameters in differential evolution: a comparative study on numerical benchmark problems," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 10, no. 6, pp. 646-657, Dec. 2006.
- [23] H. A. Abbass and R. Sarker, "The Pareto differential evolution algorithm," *Int. J. Artif. Intell. Tools*, vol. 11, no. 4, pp. 531-552, Dec. 2002.
- [24] C. H. Chen, C. J. Lin, and C. T. Lin, "Nonlinear system control using adaptive neural fuzzy networks based on a modified differential evolution," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C*, vol. 39, no. 4, pp. 459-473, Jul. 2009.
- [25] P. M. Subcommittee, "Reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee, IEEE reliability test system," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 98, no. 6, pp. 2047-2054, Nov./Dec. 1979.
- [26] A. Arabali, M. Ghofrani, M. Etezadi-Amoli, M. Sami Fadali, and M. Moeini-Aghtaie, "A multi-objective transmission expansion planning framework in deregulated power systems with wind generation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 3003-3011, Nov. 2014.
- [27] G. Verbic and C. A. Canizares, "Probabilistic optimal power flow in electricity markets based on a two-point estimate method," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1883-1893, Nov. 2006.
- [12] R. A. Hooshmand, R. Hemmati, and M. Parastegari, "Combination of AC transmission expansion planning and reactive power planning in the restructured power system," *Energy Convers. Manage.*, vol. 55, pp. 26-35, Mar. 2015.
- [13] R. C. Leou, "A multi-year transmission planning under a deregulated market," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 708-714, Mar. 2014.
- [14] J. Valinejad and T. Barforooshi, "Evaluating the impacts of incentives on generation capacity investment under uncertainties in electricity markets," *Tabriz J. of Electrical Eng.*, vol. 46, no. 1, pp. 357-368, Jan. 2016.
- [15] M. Moeini-Aghtaie, A. Abbaspour, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning-part ii: case studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1594-1601, Aug. 2012.
- [16] P. Maghouli, S. H. Hosseini, M. O. Buygi, and M. Shahidehpour, "A scenario-based multi-objective model for multi-stage transmission expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 470-478, Feb. 2012.
- [17] P. Maghouli, S. H. Hosseini, M. Oloomi, and M. Shahidehpour, "A multi-objective framework for transmission expansion planning in deregulated environments," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 1051-1061, May 2009.
- [18] G. B. Shrestha and P. A. J. Fonseca, "Congestion-driven transmission expansion in competitive power markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1658-1665, Aug. 2004.
- [19] A. Rastgou and J. Moshtagh, "Application of firefly algorithm for multi-stage transmission expansion planning with adequacy-security considerations in deregulated environments," *Applied Soft Computing*, vol. 41, pp. 373-389, Apr. 2016.
- [20] M. Alinia, N. Poorghorban, and R. Banimahd, "Three modified versions of differential evolution algorithm for continuous optimization," *Soft Computing*, vol. 15, no. 4, pp. 803-830, Apr. 2011.
- [21] H. Shayeghi and H. Aryanpour, "Robust online fuzzy PID design based on improved differential evolution for islanded microgrid

**فرزان رشدی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد و دکتری برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۱ و ۱۳۹۴ از دانشگاه شیراز، دانشگاه تهران و دانشگاه صنعتی شیراز به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه هرمزگان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: انرژی‌های نو، بازار برق، ریزشبکه‌ها، کیفیت توان و کاربرد سیستم‌های خیره و بهینه‌سازی هوشمند در سیستم‌های قدرت.