

برنامه‌ریزی توسعه تولید با استفاده از الگوریتم اصلاح شده SFL

مرتضی جدیدالاسلام زیدآبادی^۱، احسان بی‌جامی^۲، اکبر ابراهیمی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

m.jadidoleslam@ec.iut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان- ایران

e.bijami@ec.iut.ac.ir

۳- استادیار گروه قدرت، دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان- ایران

ebrahimi@cc.iut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، برنامه‌ریزی توسعه تولید به صورت یک مسأله بهینه‌سازی مدل شده است که در آن تابع هدف، کمینه کردن مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری، هزینه انرژی تأمین نشده و همچنین ارزش بازیافتی هزینه‌های سرمایه‌گذاری است. قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از شاخص‌های مقدار انتظاری انرژی تأمین نشده (EENS) و احتمال عدم تأمین بار (LOLP) برآورد و تأمین می‌شود. برای حل مسأله، اصلاح و به‌کارگیری الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته به نام MSFL پیشنهاد گردیده است. در این الگوریتم، به منظور بهبود الگوریتم SFL مرسوم، روش جدیدی برای توزیع راه‌حل‌ها در ممپلکس و قانون جدیدی برای پرش راه‌حل‌های بدتر به سمت راه‌حل‌های بهتر پیشنهاد شده است. جهت ارزیابی روش پیشنهادی، برنامه‌ریزی توسعه تولید در یک سیستم قدرت نمونه و برای افق‌های برنامه‌ریزی ۱۲ ساله و نیز ۲۴ ساله، که باعث افزایش ابعاد مسأله و نزدیک شدن به شرایط واقعی می‌گردد، انجام گرفته است. مسأله GEP، توسط الگوریتم‌های SFL مرسوم و ژنتیک نیز حل و جواب‌های به دست آمده با MSFL پیشنهادی مقایسه شده است. مقایسه انجام شده نشان می‌دهد که عملکرد و کیفیت جواب به دست آمده از الگوریتم MSFL پیشنهادی، در هر دو حالت بهتر از الگوریتم SFL مرسوم و GA است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SFL، بهینه‌سازی ترکیبی، برنامه‌ریزی توسعه تولید، شبیه‌سازی احتمالاتی تولید، قابلیت اطمینان سیستم قدرت

را نداشته باشد، لازم است واحدهای تولیدی جدید به آن اضافه گردند. برنامه‌ریزی توسعه تولید^۱ (GEP) در واقع پاسخ به این سؤال است که در یک افق زمانی بلندمدت، چه نوع نیروگاه‌هایی، با چه ظرفیت‌هایی، در کجا باید احداث گردند و در چه زمانی به شبکه وارد شوند تا ضمن اعاده کفایت شبکه در تأمین تقاضای بار پیش‌بینی شده با کمترین هزینه، معیارهای قابلیت اطمینان سیستم نیز برآورده گردند [1].

زمانی که در یک سیستم قدرت، سیستم تولید موجود کفایت لازم برای تأمین مطمئن تقاضای بار مصرف‌کنندگان

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۴/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۰/۸/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول : اکبر ابراهیمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - اصفهان - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید به علل مختلفی همواره

الگوریتم‌های برنامه‌ریزی تکاملی [15,14] اجتماع ذرات [16,13]، تکامل تفاضلی [17] و ترکیب روش‌های مذکور [20-18] و همچنین روش شبیه‌سازی مونت کارلو [21] اشاره کرد. با وجود این به‌علت، پیچیدگی بالای مسله GEP و عدم دستیابی روش‌های مذکور به پاسخ بهینه مطلق، هنوز هم روش‌های بهینه‌سازی جدید مورد توجه هستند.

در این مقاله، مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی، پویا، گسسته و مقید مدل‌سازی شده‌است. تابع هدف (تابع هزینه) در نظر گرفته‌شده شامل چهار مؤلفه اصلی هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری ثابت و متغیر، هزینه برون‌رفت^۴ واحدها (هزینه انرژی تأمین‌نشده) و ارزش بازیافتی هزینه‌های سرمایه‌گذاری است. قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از شاخص‌های مقدار انتظاری انرژی تأمین‌نشده^۵ (EENS) و احتمال عدم تأمین بار^۶ (LOLP) در نظر گرفته شده است. به‌منظور محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان و همچنین، مقدار انتظاری انرژی تولیدی واحدها در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، از شبیه‌سازی احتمالاتی تولید و روش تابع انرژی معادل^۷ بهره گرفته شده‌است.

تا کنون الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم متداول در حل مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید استفاده شده و توانایی آن در رسیدن به جواب‌های خوب و نزدیک به بهینه سراسری در مقالات متعددی نشان داده شده‌است [22,12,2]. از اینرو می‌توان از نتایج آن به‌عنوان مبنایی برای سنجش چگونگی عملکرد و میزان بهینگی جواب‌های به‌دست آمده از روش پیشنهادی بهره برد.

در این مقاله، به‌منظور ارزیابی بهتر طرح‌های توسعه و رسیدن به جواب‌های بهتر، با در نظر گرفتن طبیعت مسأله (ابعاد بزرگ، خاصیت غیر خطی شدید، گسسته و مقید بودن) اصلاحاتی در الگوریتم استاندارد SFL صورت گرفته و یک الگوریتم جدید اصلاح شده به‌نام MSFL^۸ پیشنهاد شده‌است.

روند ارائه مطالب در این مقاله به‌صورت زیر است: در بخش دوم، الگوریتم SFL و نحوه اجرای آن مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته و برخی از نقاط ضعف آن بیان

دچار چالش بوده‌است. مسأله اول وجود نامعینی در پارامترها و داده‌های ورودی به‌علت طبیعت بلندمدت مسأله است. در این میان، می‌توان به نامعینی در تقاضای بار پیش‌بینی شده، قیمت سوخت، مشخصه‌های فنی و اقتصادی تکنولوژی‌های جدید تولید انرژی الکتریکی، مدت زمان ساخت تأسیسات و قوانین و مقررات زیست‌محیطی اشاره کرد. مشکل دوم زمانی به‌وجود می‌آید که چندین هدف (اغلب ناسازگار) به‌طور هم‌زمان مورد توجه هستند. این اهداف می‌توانند شامل مینیم کردن هزینه نهایی، ماکزیم کردن قابلیت اطمینان سیستم و مینیم کردن تأثیرات سوء زیست‌محیطی باشند. معمولاً سایر پارامترها و هزینه‌ها به‌عنوان قیود مسأله در نظر گرفته می‌شوند [3]. تمامی این مسائل برنامه‌ریزی توسعه تولید را به مسأله پیچیده‌ای در حوزه مطالعات سیستم قدرت تبدیل کرده و سبب پیدایش و تعریف مجموعه گسترده‌ای از مدل‌ها، روش‌ها، ایده‌ها و قیود گردیده‌است.

از نظر ریاضی، برنامه‌ریزی توسعه تولید یک مسأله بهینه‌سازی با ابعاد بزرگ و طبیعت غیرخطی، گسسته، پویا و مقید است [4]. طبیعت غیرخطی مسأله بیش از هر چیز ناشی از شبیه‌سازی احتمالاتی تولید^۹ و مجموعه نسبتاً بزرگ قیود غیرخطی فیزیکی، مهندسی و اقتصادی آن است. یکی از فرضیاتی که به‌طور گسترده در اکثر مدل‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته می‌شود، این است که تمامی بارها و واحدهای تولیدی بر روی یک شین در نظر گرفته می‌شوند. مدلی که براین اساس استوار است، به مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید تک‌گروه‌ای^۳ موسوم است [5]. برنامه WASP از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) [6]، WIGPLAN از شرکت وستینگ‌هاوس و برنامه MNI از شرکت برق فرانسه، همگی از مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید تک‌گروه‌ای استفاده می‌کنند.

تا کنون روش‌های متنوعی برای حل مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید استفاده شده است. در این میان، می‌توان به روش‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی خطی [7]، برنامه‌ریزی پویا [9,8]، برنامه‌ریزی غیرخطی [10]، روش تجزیه [11] و روش‌های ابتکاری همچون الگوریتم ژنتیک [12,2,1]، جستجوی تابو [13]، شبیه‌سازی سرد کردن فلزات [13]،

۲-۱- روند اجرای الگوریتم SFL

ابتدا جمعیت اولیه‌ای شامل N جواب مسئله فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید در بخش چهارم آورده شده است. بخش پنجم به شبیه‌سازی‌ها و ارائه نتایج می‌پردازد و در نهایت، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش ششم ارائه گردیده است.

الگوریتم جستجوی جهش قورباغه‌های به هم آمیخته (SFL) یا به طور خلاصه الگوریتم جهش قورباغه‌ها، یک الگوریتم فوق-ابتکاری در خانواده الگوریتم‌های ممتیک و مبتنی بر جمعیت اولیه است که از تکامل طبیعی گروهی از قورباغه‌ها زمانی که به دنبال محل با بیشترین ذخیره غذایی در دسترس می‌گردند، الهام گرفته است [23]. این الگوریتم ترکیبی از ویژگی‌های الگوریتم‌های ممتیک مبتنی بر ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات را داراست و از دو شیوه جستجوی محلی و به هم آمیختن اطلاعات در سیر تکاملی الگوریتم بهره می‌گیرد. این دو شیوه جستجو به یافتن بهینه مطلق و همچنین جلوگیری از افتادن در بهینه‌های محلی کمک می‌کنند [24].

در مرحله بعد، راه‌حل‌ها، با توجه به مقادیر شایستگی‌شان، به صورت نزولی مرتب می‌گردند. سپس کل جمعیت به m بخش مساوی تقسیم می‌شود که به هر کدام از این زیربخش‌ها، یک ممپلکس^{۱۱} گفته می‌شود. در هر ممپلکس n راه‌حل مسئله قرار می‌گیرد ($n = N/m$)، به گونه‌ای که اولین راه‌حل (راه‌حل با بالاترین مقدار شایستگی) در ممپلکس اول قرار می‌گیرد، دومین راه‌حل در ممپلکس دوم، m^{th} راه‌حل در ممپلکس m^{th} و $(m+1)^{\text{th}}$ راه‌حل مجدداً در ممپلکس اول قرار می‌گیرد و این روند تا توزیع تمامی راه‌حل‌ها ادامه می‌یابد. در شکل (۱) روند شکل‌گیری ممپلکس‌ها نشان داده شده است.

فرض کنید M_k دسته‌ای از راه‌حل‌های مسئله در ممپلکس k ام باشند، آن گاه این نحوه تقسیم‌بندی را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) نشان داد:

$$M_k = \{X_{k+m(l-1)} \in P \mid 1 \leq l \leq n\}, (1 \leq k \leq m) \quad (1)$$

سپس، در هر کدام از ممپلکس‌ها راه‌حل‌های با بدترین و بهترین میزان شایستگی مشخص و به ترتیب با X_w و X_b نشان داده می‌شوند. همچنین، راه‌حل با بهترین مقدار شایستگی در میان کل جمعیت نیز با X_g مشخص می‌گردد. در طی فرایند تکامل ممپلکس‌ها بدترین راه‌حل (X_w) به سمت بهترین راه‌حل (X_b) حرکت می‌کند.

موقعیت جدید راه‌حل بدتر با استفاده از قانون پرش قورباغه‌ها در الگوریتم SFL، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Position Change}(D) = r \times (X_b - X_w) \quad (2)$$

$$X_w(\text{new}) = X_w + D, (\|D\| < D_{\max}) \quad (3)$$

گردیده است. بخش سوم به اصلاح الگوریتم SFL، و ارائه الگوریتم MSFL اختصاص دارد. نحوه مدل‌سازی و فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید در بخش چهارم آورده شده است. بخش پنجم به شبیه‌سازی‌ها و ارائه نتایج می‌پردازد و در نهایت، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش ششم ارائه گردیده است.

۲- الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته

الگوریتم جستجوی جهش قورباغه‌های به هم آمیخته (SFL) یا به طور خلاصه الگوریتم جهش قورباغه‌ها، یک الگوریتم فوق-ابتکاری در خانواده الگوریتم‌های ممتیک و مبتنی بر جمعیت اولیه است که از تکامل طبیعی گروهی از قورباغه‌ها زمانی که به دنبال محل با بیشترین ذخیره غذایی در دسترس می‌گردند، الهام گرفته است [23]. این الگوریتم ترکیبی از ویژگی‌های الگوریتم‌های ممتیک مبتنی بر ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات را داراست و از دو شیوه جستجوی محلی و به هم آمیختن اطلاعات در سیر تکاملی الگوریتم بهره می‌گیرد. این دو شیوه جستجو به یافتن بهینه مطلق و همچنین جلوگیری از افتادن در بهینه‌های محلی کمک می‌کنند [24].

الگوریتم SFL نخستین بار توسط یوسف و لنزی، در سال ۲۰۰۳ برای تعیین اندازه بهینه لوله‌های جدید در توسعه شبکه لوله‌کشی آب استفاده شد [25]. از آن پس، SFL به عنوان یک روش بهینه‌سازی کارآمد مورد توجه محققان در زمینه‌های مختلف قرار گرفت. برای نمونه در [24] از الگوریتم SFL به منظور دسته‌بندی داده‌ها استفاده شده است. در [26] از SFL برای طراحی کنترلرهای PID چندمتغیره به منظور کمینه‌سازی معیار مجموع اندازه خطا استفاده گردیده است. اخیراً استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر SFL کاربردهای موفقیت‌آمیزی در زمینه تحلیل سیستم‌های قدرت، از جمله مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید [27]، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها [28] و پخش توان بهینه [29] داشته است. از ویژگی‌های این الگوریتم، توانایی حل مسائل غیرخطی، مسائل پیچیده و چندبعدی با ابعاد بالاست [30].

محاسبات در فرایند جستجوی محلی نشان داده شده‌اند.

۲-۲- نواقص الگوریتم SFL

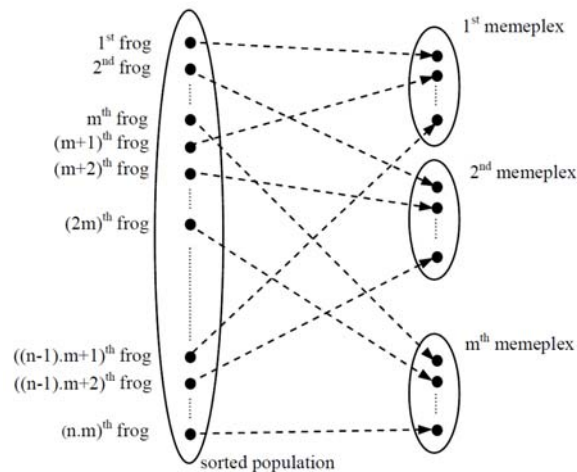
در الگوریتم‌های تکاملی که بر پایه جمعیت هستند عمدتاً دو جنبه مهم کاوش^{۱۲} و بهره‌وری^{۱۳} باید مورد توجه قرار گیرد. کاوش جستجو در فضای جواب و بهره‌وری پیدا کردن بهینه حول بهترین جواب است. نکته مهم برای داشتن عملکرد مناسب در مسائل مختلف بهینه‌سازی، مصالحه میان کاوش و بهره‌وری است. الگوریتم SFL ممکن است در برخی از مسائل بهینه‌سازی قادر به یافتن بهینه مطلق نباشد و دچار رکود و افتادن در بهینه محلی شود. رکود الگوریتم SFL ممکن است به دلایل زیر باشد:

۱- در الگوریتم SFL، جواب‌ها متناسب با شایستگی آن‌ها به صورت نزولی مرتب می‌شوند و سپس همه جمعیت به m زیرمجموعه (ممپلکس) تقسیم می‌شود. این نوع دسته‌بندی نامتعادل است. به عبارت دیگر عملکرد زیرمجموعه اول نسبت به زیرمجموعه‌های دیگر بهتر می‌باشد.

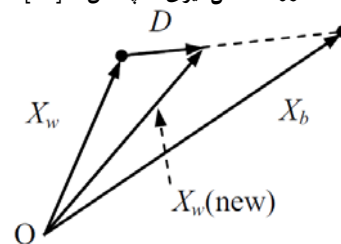


شکل (۳): فلوچارت الگوریتم SFL [24]

در رابطه (۲)، r یک عدد تصادفی در بازه [۰ و ۱] است و D_{max} حداکثر مقدار تغییرات مجاز در موقعیت راه‌حل‌ها در یک پرش است. در شکل (۲) چگونگی تغییر موقعیت راه‌حل بدتر، با استفاده از قانون پرش گفته‌شده نشان داده شده‌است.



شکل (۱): روند شکل‌گیری ممپلکس‌ها [23]



شکل (۲): قانون پرش قورباغه‌ها در الگوریتم SFL

در صورتی که با تغییر موقعیت راه‌حل بدتر، جواب بهتری به وجود آید، این جواب جایگزین X_w می‌گردد. در غیر این صورت، محاسبات انجام‌شده با استفاده از روابط (۲) و (۳) نسبت به X_g تکرار می‌شود؛ یعنی جایگزین X_b می‌گردد. در صورتی که بازهم بهبودی در جواب حاصل نگردد، X_w حذف شده، یک راه‌حل جدید به صورت تصادفی جایگزین آن می‌گردد. روند محاسباتی که گفته‌شد، برای تعداد گام‌های تکاملی ممتیک (تعداد تکرارهای جستجوی محلی)، که از قبل مشخص شده‌است، در هر ممپلکس تکرار می‌شود. در مرحله بعد که پروسه ترکیب نامیده می‌شود، تمامی جمعیت ممپلکس‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

تکامل جمعیت در ممپلکس‌ها (فرایند جستجوی محلی) و ترکیب دوباره کل جمعیت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که معیار همگرایی برآورده گردد. در شکل (۳) و (۴)، به ترتیب فلوچارت الگوریتم SFL و نحوه انجام

شدن فضای جستجو در جستجوی محلی می‌شود و نه تنها باعث کنشدن روند همگرایی الگوریتم می‌گردد، بلکه می‌تواند باعث گیرافتادن الگوریتم در بهینه محلی گردد.

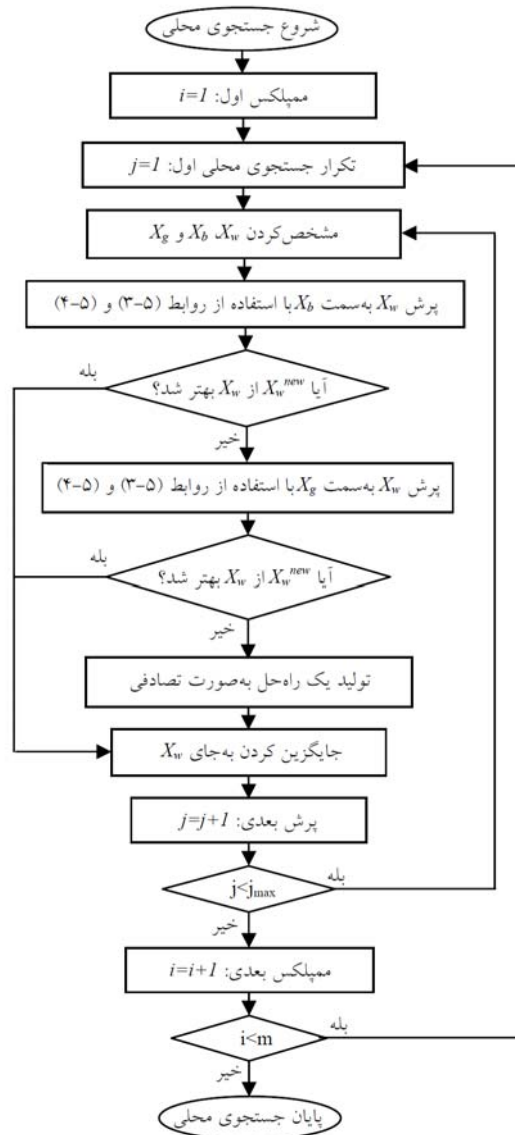
در این مقاله، به منظور برطرف نمودن هر کدام از مشکلات بیان شده، با در نظر گرفتن طبیعت مسأله بهینه‌سازی مورد نظر یعنی برنامه‌ریزی توسعه تولید، که یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی، با ابعاد بالا، پویا و مقید است، راه‌حلی پیشنهاد گردیده که در ادامه به آنها پرداخته شده است.

۳- الگوریتم اصلاح شده SFL

۳-۱- روش جدید توزیع جواب‌ها در مپلکس

در این مقاله، به منظور غلبه بر مشکل اول، روش جدیدی برای توزیع جواب‌ها در مپلکس‌ها پیشنهاد شده است. این روش در واقع ترکیبی از فرایند شکل‌گیری مپلکس‌ها در الگوریتم SFL مرسوم و روش تقسیم‌بندی هندسی که در [31] ارائه شده، می‌باشد. در این مرجع، روش‌های مختلف تقسیم‌بندی جواب‌ها، از جمله روش مبتنی بر شایستگی، روش تقسیم‌بندی تصادفی و روش تقسیم‌بندی هندسی، آزمایش شده و بر اساس نتایج به دست آمده، بهترین عملکرد مربوط به روش تقسیم‌بندی با توجه به فاصله هندسی جواب‌ها از یکدیگر بوده است. در این روش که مشابه الگوریتم‌های دسته بندی مبتنی بر مرکز^{۱۴} است، ایده اصلی، گروه بندی جواب‌های موجود در نواحی مجاور یکدیگر در یک مپلکس است. در این روش، جواب‌ها بر اساس فاصله هندسی که با مرکز هر مپلکس دارند تقسیم‌بندی می‌گردند و مرکز هر مپلکس به صورت تصادفی از میان جواب‌های جمعیت انتخاب می‌گردد. این فاصله، با استفاده از روش فاصله اقلیدسی^{۱۵} محاسبه می‌گردد.

علی رغم مزیت‌های نشان داده شده برای این نوع روش تقسیم‌بندی، با انتخاب تصادفی جواب‌های مرکزی، هنوز هم مشکل اول بیان شده در الگوریتم SFL، یعنی عدم حضور جواب‌های با مقدار شایستگی بالا در برخی از مپلکس‌ها وجود دارد. راه‌حل پیشنهادی برای رفع این مشکل، انتخاب



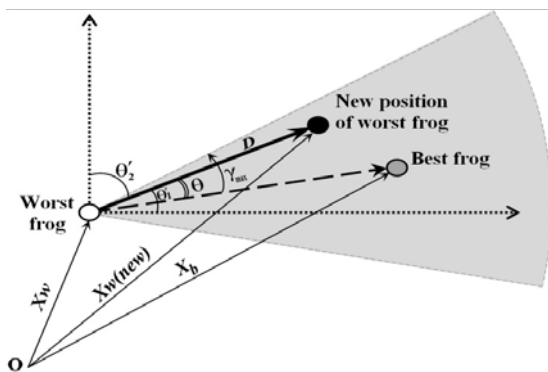
شکل (۴): فلوچارت جستجوی محلی در الگوریتم SFL [24]

این عدم تعادل در زیرمجموعه‌های آخر، باعث دشواری در پروسه یادگیری می‌گردد. زیرا دیگر جواب‌های خوب و با مقادیر شایستگی بالا در زیرمجموعه‌های آخر کمتر وجود دارند.

۲- در الگوریتم SFL، موقعیت بدترین راه‌حل با توجه به قانون پرش رابطه (۲) و (۳)، مشخص می‌گردد. این نحوه پرش باعث تغییر موقعیت راه‌حل بدتر تنها در راستای یک خط مستقیم در فضای دو بعدی نسبت به راه‌حل بهتر می‌گردد و باعث می‌شود فضاهای اطراف راه‌حل بهتر که در آن‌ها شانس بیشتری برای رسیدن به جواب‌های با شایستگی بیشتر وجود دارد، کاوش نشوند. این مسأله باعث محدود

۳-۲- قانون پرش اصلاح شده

همان‌طور که گفته شد، به علت محدودیت حرکت راه‌حل بدتر در مسیر مستقیم نسبت به راه‌حل بهتر در قانون پرش الگوریتم SFL مرسوم، مشکلاتی از جمله محدود شدن فضای جستجو، کند شدن سرعت همگرایی و گیرافتادن در بهینه محلی به وجود می‌آید. راه‌حل بدتر در حرکت به سمت راه‌حل بهتر می‌تواند به فضاهای موجود در اطراف راه‌حل بهتر نیز پرش کند و یا حتی از روی آن نیز عبور نماید. این ایده ساده به قانون جدیدی برای پرش قورباغه‌ها منجر می‌شود که باعث گسترده‌تر شدن فضای جستجوی محلی می‌گردد و مشکلات بیان شده را تا حد زیادی برطرف می‌نماید. شکل (۶) چگونگی حرکت راه‌حل بدتر نسبت به راه‌حل بهتر را در یک فضای دو بعدی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌گردد، به حرکت راه‌حل بدتر نسبت به راه‌حل بهتر، یک مؤلفه زاویه θ نیز علاوه بر حرکت مستقیم اضافه شده است.



شکل (۶): قانون جدید پرش قورباغه‌ها

با توجه به توضیحات فوق، قانون جدید پیشنهادی برای پرش قورباغه‌ها به صورت زیر خواهد بود:

$$X_w(new) = X_w + D \quad (4)$$

که در آن برداری است که با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D = r \cdot \|X_b - X_w\| \cdot V \quad (5)$$

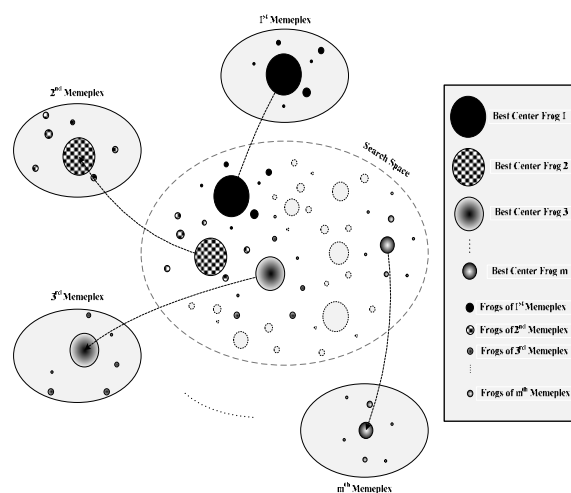
$$V = [\cos \theta'_1, \cos \theta'_2, \dots, \cos \theta'_S]^T \quad (6)$$

که در آن r یک عدد تصادفی در بازه $[0, C_{max}]$ است. C_{max} ثابتی است که مقدار آن بیشترین مقدار مجاز برای

مراکز ممپلکس‌ها بر اساس شایستگی است. به این صورت که پس از مرتب شدن نزولی جواب‌های جمعیت، بر اساس میزان شایستگی، m راه‌حل اول به عنوان مراکز m ممپلکس انتخاب می‌شوند.

در مرحله بعد و پس از مشخص شدن مراکز ممپلکس‌ها، برای انتخاب اعضای باقیمانده هر ممپلکس به صورت زیر عمل می‌شود: ابتدا راه‌حل با کمترین فاصله هندسی با مرکز ممپلکس اول به عنوان عضو بعدی این ممپلکس انتخاب می‌گردد. سپس راه‌حل با کمترین فاصله هندسی نسبت به مرکز ممپلکس دوم به عنوان عضو بعدی ممپلکس دوم انتخاب می‌گردد. این روند ادامه می‌یابد تا همه راه‌حل‌ها تقسیم گردند. در شکل (۵) این شیوه تقسیم‌بندی در یک فضای دوبعدی نوعی نشان داده شده است.

با تقسیم‌بندی جواب‌های جمعیت توسط روش بیان شده، در هر تکرار الگوریتم ممپلکس‌هایی خواهیم داشت که در هر کدام از آن‌ها جواب‌های نزدیک به هم (از نظر هندسی) وجود دارند و حداقل در هر ممپلکس یک راه‌حل با مقدار شایستگی بالا وجود دارد. به این ترتیب به طور همزمان از مزیت‌های روش تقسیم‌بندی هندسی بهره برده شده و مشکل بیان شده در الگوریتم SFL نیز مرتفع گردیده است.



شکل (۵): روش جدید برای توزیع جواب‌ها در ممپلکس‌ها

۴- مدل‌سازی مسأله برنامه‌ریزی توسعه تولید

۴-۱- تابع هدف

تابع هزینه‌ای که برای ارزیابی طرح‌های مختلف توسعه در نظر گرفته شده به صورت رابطه (۱۰) است. این تابع هزینه از چهار مؤلفه اصلی هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری ثابت و متغیر، هزینه خروج واحدها (هزینه انرژی تأمین نشده) و ارزش بازیافتی هزینه‌های سرمایه‌گذاری تشکیل شده است.

$$\min C = \sum_{t=1}^T [\bar{I}(U_t) + \bar{M}(X_t) + \bar{O}(X_t) - \bar{S}(U_t)] \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، X_t بردار حالت ظرفیت سیستم است و می‌توان آنرا به صورت رابطه زیر نشان داد:

$$X_t = X_{t-1} + U_t \quad (11)$$

سایر پارامترهای رابطه (۱۰)، به ترتیب زیر هستند:

I هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (تجهیزات، هزینه‌های نصب سایت و غیره)؛

M هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری ثابت و هزینه‌های بهره‌برداری متغیر (هزینه سوخت مصرفی)؛

O هزینه برون‌رفت واحدها (هزینه انرژی تأمین نشده)؛

S ارزش بازیافتی هزینه‌های سرمایه‌گذاری؛

U_t بردار افزایش ظرفیت سیستم در مرحله t ام، شامل همه انواع واحدهای کاندیدا برای اضافه شدن به سیستم موجود، برحسب (MW)؛

X_t بردار تجمعی ظرفیت سیستم در مرحله t ام شامل همه انواع واحدهای موجود و کاندیدا، برحسب (MW)؛

t مرحله برنامه‌ریزی $t=1,2,\dots,T$ (هر مرحله برنامه‌ریزی می‌تواند شامل یک یا چند سال باشد)؛

T طول دوره مورد مطالعه بر حسب تعداد مراحل.

علامت خط فوقانی متغیرها در رابطه (۱۰) به معنی مقادیر هزینه‌ها با در نظر گرفتن نرخ بهره i نسبت به تاریخ مرجع محاسبات است.

پرش را مشخص می‌کند. $C_{max} \gg I$ رفته رفته باعث دور شدن راه‌حل بدتر از اطراف راه‌حل بهتر می‌گردد و مقدار نزدیک به یک برای C_{max} قابلیت جستجوی فضاها را بیشتر را کاهش می‌دهد. θ'_i زاویه انحراف از مسیر حرکت مستقیم به سمت راه‌حل بهتر در بعد t ام فضای جستجو است و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\theta'_i = \cos^{-1} \left(\frac{X_b(i) - X_w(i)}{\|X_b - X_w\|} \right) + \Delta\theta, \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (7)$$

$$\Delta\theta \sim U(-\gamma_{\max}, \gamma_{\max}) \quad (8)$$

در رابطه (۷)، $\Delta\theta$ پارامتری است که توسط آن میزان انحراف از مسیر مستقیم تعیین می‌شود و γ_{\max} پارامتر کنترلی است که با استفاده از آن می‌توان محدوده فضایی را که توسط راه‌حل بدتر در اطراف راه‌حل بهتر جستجو می‌گردد، محدود و تعیین نمود. مقدار این پارامتر به شماره تکرار الگوریتم بستگی دارد و طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_{\max} = \frac{\gamma_{\max}^0}{iter.} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، γ_{\max}^0 بیشترین زاویه انحراف است که می‌تواند بین 0 تا $\pi/2$ انتخاب گردد. بنابراین، این پارامتر در هنگام شروع الگوریتم، بیشترین مقدار خود را دارد و با بالا رفتن تعداد تکرارها ($iter.$) و نزدیکتر شدن الگوریتم به جواب‌های بهتر، به صورت نزولی کاهش می‌یابد.

سایر مراحل الگوریتم MSFL پیشنهادی، مشابه الگوریتم SFL مرسوم است. در صورتی که فرایند تغییر موقعیت راه‌حل بدتر با استفاده از روابط (۴)–(۸)، به راه‌حل با شایستگی بیشتر منجر شود، راه‌حل بهتر جایگزین راه‌حل بدتر می‌گردد؛ در غیر این صورت فرایند تغییر موقعیت نسبت به X_g تکرار می‌گردد. در صورتی که راه‌حل بهتری حاصل شود، جایگزین راه‌حل بدتر می‌شود و در حالتی که بهبودی در جواب حاصل نگردد، راه‌حل جدیدی به صورت تصادفی تولید و جایگزین راه‌حل بدتر می‌گردد.

۲-۴- محاسبه مولفه‌های مختلف تابع هزینه

به منظور مقایسه طرح‌های توسعه مختلف، از روش ارزش کنونی استفاده شده است [6]. از این‌رو، برای محاسبه مولفه‌های هزینه در رابطه (۱۰)، فرض شده که کل سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای احداث نیروگاه‌ها در ابتدای هر مرحله برنامه‌ریزی انجام شده باشد و وارد مدار گردند. هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری شامل هزینه‌های ثابت و متغیر، در وسط هر سال از افق برنامه‌ریزی فرض شده است. ارزش بازیافتی هزینه‌های سرمایه‌گذاری به صورت بستانکاری است و در انتهای دوره برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است.

با توجه به توضیحات فوق، مؤلفه‌های مختلف تابع هزینه رابطه (۱۰) به صورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$\bar{I}(U_t) = (1+i)^{-t'} \times \sum_{k=1}^N [CI_k \times U_{t,k}] \quad (12)$$

$$\bar{M}(X_t) = \sum_{y=0}^{s-1} [(1+i)^{-(t'+0.5+y)} \times \sum_{k=1}^N [FOM_k \times X_{t,k} + VOM_k \times G_{t,k}]] \quad (13)$$

$$\bar{O}(X_t) = \sum_{y=0}^{s-1} [(1+i)^{-(t'+0.5+y)} \times EENS_t \times CEENS] \quad (14)$$

$$\bar{S}(U_t) = (1+i)^{-T'} \times \sum_{k=1}^N [\delta_{k,t} \times CI_k \times U_{t,k}] \quad (15)$$

که در آن:

$$t' = t_0 + s \times (t-1) \quad (16)$$

$$T' = t_0 + s \times T \quad (17)$$

می‌باشند و

s تعداد سال‌های هر مرحله برنامه‌ریزی؛

t_0 تعداد مراحل بین سال مبنای محاسبات و مرحله اول برنامه‌ریزی؛

CI_k هزینه سرمایه‌گذاری واحد نوع k ام، $(\$/MW)$ ؛

$U_{t,k}$ ظرفیت واحدهای کاندیدا از نوع k در مرحله t ام، (MW) ؛

N تعداد واحدهای کاندیدا از انواع مختلف؛

y متغیر مورد استفاده برای نشان دادن اینکه هزینه‌های

بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری واحدها در وسط هر

کدام از سال‌های برنامه‌ریزی محاسبه می‌گردد؛

FOM_k هزینه ثابت بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری

واحد نوع k ، $(\$/MW)$ ؛

$X_{t,k}$ ظرفیت تجمعی واحدهای نوع k در مرحله t ام، (MW) ؛

VOM_k هزینه متغیر بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری

واحد نوع k ، $(\$/MWh)$ ؛

$G_{t,k}$ مقدار انتظاری انرژی تولیدی واحدهای نوع k در مرحله

t ام (MWh) ؛

$EENS_t$ مقدار انتظاری انرژی تأمین‌نشده در مرحله t ام،

(MWh) ؛

$CEENS$ هزینه انرژی تأمین‌نشده، $(\$/MWh)$ ؛

$\delta_{k,t}$ ضریب ارزش بازیافتی واحد نوع k که در سال t ام به سیستم موجود اضافه شده است.

برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان LOLP و

EENS و همچنین محاسبه مقدار انتظاری انرژی تولیدی

واحدها در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، از شبیه‌سازی

احتمالاتی تولید و روش تابع انرژی معادل [5] استفاده شده

است. در شبیه‌سازی سیستم تولید، نرخ برون‌رفت واحدها

در منحنی تداوم بار تأثیر داده می‌شود و واحدها بر اساس

اولویت اقتصادی به ترتیب تأمین بار را به عهده می‌گیرند.

بنابراین تخمین مقدار انرژی تولیدی این واحدها و محاسبه

هزینه سوخت مصرفی، بر اساس شرایط واقعی صورت

می‌گیرد.

۳-۴- قیود مسأله

الف) حداکثر ظرفیت قابل ساخت واحدها: ممکن

است برخی دلایل فنی، اقتصادی و یا اجرایی در هر مرحله

برنامه‌ریزی، اجازه ساخت بیشتر از یک ظرفیت مشخص از

یک نوع واحد را ندهد. در این میان تصمیم‌گیرندگان باید

چنین محدودیت‌هایی را در حل مسأله برنامه‌ریزی توسعه

تولید در نظر بگیرند. محدودیت مذکور، با استفاده از رابطه

زیر در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است:

$$0 \leq U_t \leq U_{\max,t} \quad (18)$$

U_t نشان دهنده واحدهای جدیدی است که در مرحله

لام طرح توسعه به سیستم اضافه می‌گردند و حداکثر ظرفیت ساخت واحدها در مرحله لام برنامه‌ریزی است.

(ب) **حاشیه رزرو سیستم:** به علت وجود نامعینی در پیش‌بینی تقاضای بار مصرفی و به منظور کارکرد مطمئن سیستم قدرت، باید یک مقدار حاشیه رزرو برای ظرفیت نصب شده در سیستم در نظر گرفته شود، تا مشکلی از نظر تأمین تقاضای بار به وجود نیاید. از طرف دیگر، نصب بیش از حد واحدهای اضافی در سیستم باعث افزایش هزینه‌های سیستم قدرت می‌گردد. در برنامه‌ریزی توسعه تولید این مسئله، با در نظر گرفتن محدودیت‌های بالا و پایین در قید حاشیه رزرو سیستم، در نظر گرفته می‌شود.

اگر $\sum_{k=1}^N X_{t,k}$ کل ظرفیت نصب شده سیستم در مرحله t شامل واحدهای موجود و جدید باشد، آنگاه هر طرح توسعه قابل قبولی باید شرط زیر را برآورده سازد:

$$(1 + R_{\min}) \times D_t \leq \sum_{k=1}^N X_{t,k} \leq (1 + R_{\max}) \times D_t \quad (19)$$

به عبارت ساده، ظرفیت نصب شده در هر دوره برنامه‌ریزی باید بیشتر از پیک تقاضای بار (D_t) و بین حداکثر و حداقل حاشیه رزرو داده شده یعنی به ترتیب R_{\max} و R_{\min} قرار داشته باشد.

(پ) **نرخ ترکیب سوخت:** در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، انواع گوناگون واحدهای تولیدی که از سوخت‌های مختلفی مانند نفت کوره، گاز طبیعی، زغال سنگ و سوخت هسته‌ای استفاده می‌کنند، وجود دارند. با استفاده از قید نرخ ترکیب سوخت، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با در نظر گرفتن منابع سوخت در دسترس، ترکیب تولید سیستم را به گونه‌ای انتخاب کنند که ریسک وابستگی به یک نوع سوخت کاهش یابد.

با توجه به توضیحات فوق، قید نرخ ترکیب سوخت به صورت قیود زیر در مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته شده است که واحدهای کاندیدا به همراه واحدهای موجود باید آنرا برآورده کنند:

$$M_{\min}^j \leq \frac{X_{t,j}}{\sum_{k=1}^N X_{t,k}} \leq M_{\max}^j \quad (20)$$

که در آن:

M_{\min}^j نرخ ترکیب سوخت مینیمم مربوط به واحد نوع j ام؛
 M_{\max}^j نرخ ترکیب سوخت ماکزیمم مربوط به واحد نوع j ام؛

J نوع واحدها بر حسب نوع سوخت (نفت کوره، گاز طبیعی، زغال سنگ، هسته‌ای) و $N=1,2,\dots,N$ می‌باشد.
(ت) معیار قابلیت اطمینان: معیار قابلیت اطمینان احتمال عدم تأمین بار (LOLP) یکی از شاخص‌های مهم و متداول در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تولید است که با توجه به قوانین مربوطه در هر کشور، باید رعایت گردد. بنابراین، با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان در مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید، استانداردهای در نظر گرفته شده، در طرح توسعه آتی سیستم تولید، رعایت می‌گردد. برای این منظور، واحدهای انتخاب شده به همراه واحدهای موجود باید معیار LOLP زیر را برآورده کنند:

$$LOLP(X_t) \leq \varepsilon \quad (21)$$

که در آن ε استاندارد قابلیت اطمینان برای حداکثر مقدار مجاز LOLP است.

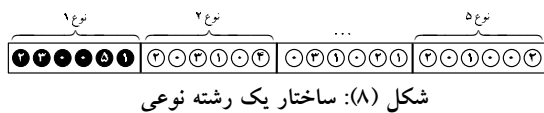
به منظور انجام شبیه‌سازی احتمالاتی تولید و محاسبه شاخص‌های LOLP و EENS، به منحنی تداوم بار (یا معکوس آن) نیاز است. در اینجا از تقریب تکه‌ای-خطی برای معکوس منحنی تداوم بار استفاده شده است. شکل کلی این منحنی در شکل (۷) نشان داده شده است.

۵- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی

۵-۱- کدبندی پارامترها و استفاده از نگاشت

استفاده از مقادیر صحیح برای کدبندی متغیرهای تصمیم‌گیری در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید مرسوم است. اگر چه بردار حالت X_t و بردار تصمیم‌گیری U_t در مدل مسئله (رابطه ۱)، از جنس مگاوات هستند، اما می‌توان براحتی آن‌ها را به بردارهایی تبدیل کرد که در بردارنده اطلاعاتی در مورد تعداد واحدها در هر نوع نیروگاه باشند. استفاده از این روش نگاشت ساده در کاربرد الگوریتم‌های بر پایه جمعیت، از جمله SFL و GA در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید به منظور کدبندی رشته‌ها (جواب‌های مسئله) و

برای مثال، اعداد ۲، ۳، ۰، ۵ و ۱ که در شکل (۸) با رنگ تیره نشان داده شده‌اند، تعداد واحدهای از نوع ۱ را که باید به ترتیب در مراحل اول تا ششم برنامه‌ریزی به سیستم اضافه شوند، نشان می‌دهند.



شکل (۸): ساختار یک رشته نوعی

۵-۲- ایجاد جمعیت اولیه

در این مرحله، جمعیت اولیه‌ای از جواب‌ها به صورت کاملاً تصادفی تولید می‌شود؛ به گونه‌ای که قید حداکثر ظرفیت ساخت برای هر نوع از واحدهای کاندیدا؛ یعنی قید (۱۸) نیز برآورده شود. به عبارت دیگر، برای هر قسمت از رشته کدبندی شده، تعداد واحدهای از نوع مربوطه در هر سال برنامه‌ریزی به صورت یک عدد تصادفی با احتمال یکنواخت در بازه $[0, U_{max}]$ انتخاب می‌گردند؛ که U_{max} بردار حداکثر تعداد واحدهای کاندیدا از انواع مختلف است.

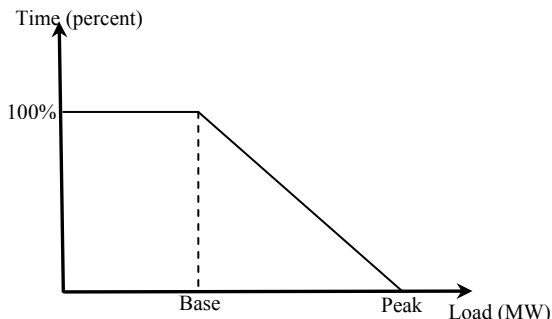
۵-۳- ارزیابی شایستگی جواب‌ها و نحوه اعمال

قیود

تابع برازندگی که برای ارزیابی میزان شایستگی هر یک از اعضای جمعیت (جواب‌های مسأله) استفاده شده، از مجموع هزینه کل طرح توسعه که از تابع هزینه رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد و هزینه‌ای که به صورت جریمه برای انحراف از قیود مسأله در نظر گرفته شده، تشکیل شده‌است. قبل از ارزیابی شایستگی جواب‌ها، برای همه راه‌حل‌های مسأله قیود حاشیه رزرو و نرخ ترکیب سوخت؛ یعنی روابط (۱۹) و (۲۰)، بررسی می‌شوند. در صورتی که رشته‌ای از قیود مذکور انحراف پیدا کرده باشد، تنها آن بخش از رشته مورد نظر که این قیود را در سال t ام نقض کرده باشد، به صورت تصادفی تغییر می‌یابد تا اینکه قیود مذکور برآورده گردند. از روش تابع جریمه نیز برای اعمال قید قابلیت اطمینان (رابطه ۲۱) استفاده شده‌است. بنابراین تابع جریمه برای n امین رشته به صورت زیر خواهد بود:

$$Penalty(n) = \begin{cases} p \times O(X_t) & LOLP > \varepsilon \\ 0 & oth. \end{cases} \quad (25)$$

اعمال قید (۱۸) بسیار مفید است. نگاشت مذکور را می‌توان توسط روابط زیر نشان داد:



شکل (۷): منحنی تداوم بار معکوس (تقریب تکه‌ای-خطی)

$$X_t = (x_t^1, \dots, x_t^N)^T \rightarrow X'_t = (x_t'^1, \dots, x_t'^N)^T \quad (22)$$

$$U_t = (u_t^1, \dots, u_t^N)^T \rightarrow U'_t = (u_t'^1, \dots, u_t'^N)^T \quad (23)$$

که در آن

N تعداد انواع واحدها شامل نیروگاه‌های موجود و کاندیدا؛
 X'_t تعداد تجمعی واحدها از همه انواع شامل واحدهای موجود و کاندیدا در مرحله t ؛

U'_t تعداد واحدهای کاندیدا از همه انواع در مرحله t ؛

$X_t'^k$ تعداد تجمعی همه واحدهای از نوع k شامل واحدهای موجود و کاندیدا در مرحله t ؛

$U_t'^k$ تعداد واحدهای کاندیدا از نوع k در مرحله t ؛

ساختار رشته‌ها: با استفاده از رابطه (۲۳) برای کدبندی رشته‌ها، ساختار هر رشته به صورت رابطه زیر در خواهد آمد:

$$\begin{aligned} \hat{U}' &= (u_1'^1, u_2'^1, \dots, u_T'^1, \dots, u_1'^n, u_2'^n, \dots, u_T'^n, \\ &\dots, u_1'^N, u_2'^N, \dots, u_T'^N)^T \\ &= (\hat{U}'^1, \dots, \hat{U}'^n, \dots, \hat{U}'^N)^T \end{aligned} \quad (24)$$

در اینجا هر المان رشته، در رابطه (۲۴)؛ یعنی

$$\hat{U}'^n = (u_1'^n, u_2'^n, \dots, u_T'^n)^T, n=1, \dots, N$$

زیررشته است که تعداد واحدهای از نوع n در سال‌های برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. شکل (۸) ساختار یک رشته نوعی را برای یک سیستم با پنج نوع واحد کاندیدا و دوره برنامه‌ریزی شش مرحله‌ای نشان می‌دهد.

برنامه‌ریزی توسعه تولید، از یک سیستم نمونه استفاده شده است. مشخصات این سیستم، که از [12] گرفته شده و مراجع دیگری همچون [32,1] نیز از آن برای آزمایش روش پیشنهادی خود بهره گرفته‌اند، به صورت زیر است: این سیستم شامل پنج نوع واحد کاندیدا برای اضافه شدن به سیستم، از جمله واحدهای ۲۰۰ مگاواتی با سوخت نفت کوره، واحدهای ۴۵۰ مگاواتی گاز سوز، واحدهای ۵۰۰ مگاواتی با سوخت زغال سنگ و دو نوع واحد هسته‌ای با ظرفیت‌های ۷۰۰ و ۱۰۰۰ مگاوات است. همچنین سیستم مذکور دارای ۱۵ واحد موجود از انواع گفته شده با ظرفیت‌های مختلف است. مشخصات سیستم فوق، شامل بار پیش‌بینی شده و مقدار بار پایه و همچنین داده‌های فنی و اقتصادی مربوط به واحدهای موجود و کاندیدا برای اضافه شدن به سیستم، در بخش ضمیمه آورده شده است.

۶-۲- پارامترهای برنامه‌ریزی توسعه تولید

در انجام مطالعات برنامه‌ریزی توسعه تولید برای سیستم نمونه، پارامترهای مدل (۱۰) - (۲۱)، به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند. این مقادیر با توجه به مطالعات انجام گرفته در مراجع مختلف [33,12,1] انتخاب شده‌اند. نرخ بهره (d)، برابر ۸/۵ درصد در نظر گرفته شده است. حدود بالا و پایین حاشیه رزرو رابطه (۱۹)، به ترتیب ۲۰ درصد و ۵۰ درصد در نظر گرفته شده‌اند. حدود بالا و پایین نرخ ترکیب ظرفیت (نرخ ترکیب سوخت) رابطه (۲۰)، برای نیروگاه‌های نفت سوز صفر تا ۳۰ درصد، نیروگاه‌های با سوخت LNG صفر تا ۴۰ درصد، نیروگاه‌های با سوخت زغال سنگ درصد تا ۶۰ درصد و برای نیروگاه‌های هسته‌ای ۳۰ تا ۶۰ درصد انتخاب گردیده‌اند. مقدار هزینه انرژی تأمین نشده ۰/۰۵ دلار بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.

هم اکنون، استاندارد کشورهای مختلف برای شاخص LOLP مقداری بین ۰/۱ تا ۶ روز در سال است [34]. به طور معمول در مطالعاتی که مقدار استاندارد مربوطه وجود ندارد، مقدار یک روز در سال مقدار مناسبی است [34,33]. بنابراین، معیار قابلیت اطمینان LOLP در رابطه (۲۱)، برابر یک روز در سال یعنی ۰/۲۷ درصد در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه ضریب ارزش بازیافتی هزینه سرمایه گذاری واحدها در رابطه (۱۵)، از روش وجوه استهلاکی [6] استفاده شده است.

در رابطه فوق $O(x_i)$ هزینه انرژی تأمین نشده طبق رابطه (۱۴) است. ضریب جریمه p یک عدد بزرگ انتخاب می‌گردد تا میزان شایستگی جواب‌هایی که قید LOLP را نقض کرده‌اند، کاهش چشمگیری یابد و بنابراین، به صورت خودکار از جمعیت جدید حذف گردند.

با توجه به توضیحات فوق، مقدار شایستگی رشته n ام با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$fit(n) = \begin{cases} \frac{\alpha}{C(n)+1} & \text{if } n \text{ is feasible} \\ \frac{\alpha}{C(n) + Penalty(n)} & \text{oth.} \end{cases} \quad (26)$$

در رابطه فوق α یک عدد ثابت و $C(n)$ تابع هدف طبق رابطه (۱۰) است. بهترین رشته در میان جمعیت، رشته‌ای است که بیشترین مقدار شایستگی را داشته باشد.

استفاده از نگاشت ساده‌ای که در بخش (۵-۱) توضیح داده شد، گاهی سبب همگرایی زودرس و تکثیر رشته‌ها در یک جمعیت می‌گردد. علت این امر، غالب شدن رشته‌های با مقادیر شایستگی زیاد در جمعیت است. به منظور بهبود این مشکل، از تابع برازندگی اصلاح شده زیر که مقدار شایستگی رشته‌ها را به صورت یک عدد حقیقی بین [۰,۱] نرمالیزه می‌کند، استفاده شده است:

$$fit'(n) = \frac{fit(n) - fit_{min}}{fit_{max} - fit_{min}} \quad (27)$$

که در آن

$fit(n)$ مقدار شایستگی رشته n ام با استفاده از رابطه (۲۶)؛ fit_{min} و fit_{max} به ترتیب ماکزیمم و مینیمم مقدار شایستگی در یک نسل؛ $fit'(n)$ مقدار شایستگی اصلاح شده رشته n است.

۶- نتایج شبیه سازی

کلیه شبیه سازی‌ها در محیط برنامه‌نویسی نرم افزار MATLAB و با استفاده از یک کامپیوتر با پردازشگر Core2Duo 2.53MHz و حافظه 4GB انجام شده است.

۶-۱- سیستم مورد مطالعه

به منظور مقایسه الگوریتم ژنتیک، الگوریتم SFL و الگوریتم SFL اصلاح شده (MSFL) در حل مسأله

۶-۴- حالت دوم (افزایش تعداد سال‌های برنامه‌ریزی)

حال، هنوز هم تعداد ترکیبات شدنی، مخصوصاً در مسائل برنامه‌ریزی با افق زمانی بلندمدت و تعداد واحدهای کاندیدای زیاد؛ یعنی در یک سیستم قدرت واقعی بسیار زیاد است. از این‌رو استفاده از روشی که در یک مدت زمان معقول بتواند به جواب قابل قبول و مطلوبی دست یابد، ضروری است.

در اینجا، به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم MSFL پیشنهادی در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید با ابعاد بزرگ، مسئله برای یک افق برنامه‌ریزی ۲۴ ساله (۱۲ مرحله) حل شده است. سایر پارامترهای مدل (۱۰) - (۲۱)، همانند حالت اول در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای MSFL و SFL همان پارامترهای جدول (۱) هستند و تنها تعداد تکرارهای جستجوی محلی از ۵ تکرار به ۱۰ تکرار افزایش پیدا کرده است. به منظور ایجاد شرایط مقایسه یکسان، تعداد تکرارهای الگوریتم GA نیز به ۱۰۰۰ تکرار افزایش پیدا کرده است؛ سایر پارامترهای GA مانند جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند.

در این حالت نیز هر کدام از الگوریتم‌ها ده مرتبه اجرا شده‌اند و بهترین جواب از میان جواب‌های به دست آمده انتخاب گردیده است. هزینه کل بهترین طرح‌های توسعه به دست آمده از الگوریتم‌های MSFL، SFL و GA به همراه مدت زمان هر بار اجرای این الگوریتم‌ها در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

جدول (۳): هزینه بهترین طرح به دست آمده از الگوریتم‌های

GA و SFL، MSFL

()	()	
	/	MSFL
	/	SFL
	/	GA

مقایسه جواب‌های به دست آمده در این حالت نشان می‌دهد که نسبت به حالت با افق برنامه‌ریزی ۱۲ ساله، عملکرد و دقت الگوریتم MSFL بسیار بهتر از SFL و GA بوده است. در واقع، به دلیل اینکه فضای جستجو توسط الگوریتم SFL مرسوم به خوبی کاوش نمی‌شود، با زیاد شدن ابعاد مسئله، عملکرد ضعیف‌تر این الگوریتم نسبت به

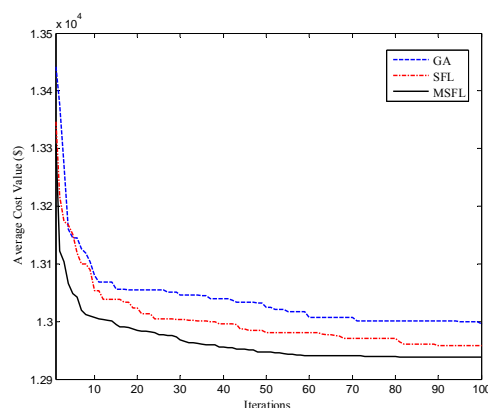
در این قسمت، به منظور بررسی تأثیر افزایش ابعاد مسئله (تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری) بر عملکرد و روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی، تعداد سال‌های برنامه‌ریزی از ۱۲ سال به ۲۴ سال افزایش یافته است.

زمانی که مسئله با N نوع واحد کاندیدا و T مرحله برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود و محدودیت حداکثر تعداد ساخت واحدهای جدید

جدول (۲): هزینه کل بهترین طرح توسعه به دست آمده از

الگوریتم‌های MSFL، SFL و GA در حالت اول

()	()	
	/	MSFL
	/	SFL
	/	GA



شکل (۹): مشخصه همگرایی الگوریتم‌های MSFL، SFL و

GA، حالت اول

به صورت بردار $U = [u_1, u_2, \dots, u_k]$ باشد، آنگاه تعداد ترکیبات ممکن از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\text{No. of Combinations} = (u_1 + 1)^T \times (u_2 + 1)^T \times \dots \times (u_k + 1)^T \quad (28)$$

اگر بردار حداکثر تعداد ساخت واحدها، $[3, 3, 3, 4]$ ،

$U = [5]$ باشد، در حالت اول با ۶ مرحله برنامه‌ریزی (۱۲ سال) تعداد حالات برابر خواهد بود با $5 \times 10^{19} / 5$ ، و در حالت دوم با ۱۲ مرحله برنامه‌ریزی (۲۴ سال) برابر $5 \times 10^{39} / 5$ می‌شود. در واقع در حالت دوم تعداد ترکیبات به توان ۲ رسیده است. البته، تعداد زیادی از این ترکیبات، محدودیت‌های مسئله را برآورده نمی‌کنند. با این

داده‌های فنی و اقتصادی واحدهای موجود [12]

(\$/kW-mon)	(\$/kWh)	()	(MW)			
/	/	/			Heavy Oil	Oil #1
/	/	/			Heavy Oil	Oil #2
/	/	/			Heavy Oil	Oil #3
/	/	/			LNG	LNG G/T #1
/	/	/			LNG	LNG G/T #2
/	/	/			LNG	LNG G/T #3
/	/	/			LNG	LNG G/T #4
/	/	/			Anthracite	Coal #1
/	/	/			Bituminous	Coal #2
/	/	/			Bituminous	Coal #3
/	/	/			PWR	Nuclear #1
/	/	/			PWR	Nuclear #2

داده‌های فنی و اقتصادی واحدهای کانیدیا [12]

()	(\$/kW)	(\$/kW-mon)	(\$/kWh)	()	(MW)	
	/	/	/	/		Oil
	/	/	/	/		LNG C/C
	/	/	/	/		Coal (Bit.)
	/	/	/	/		Nuc. (PWR)
	/	/	/	/		Nuc.(PHWR)

مراجع

- [7] Masse, P., and Gibrat, R., "Application of Linear Programming to Investments in the Electric Power Industry", *Mgmt. Sci.*, Vol. 3, No. 1, pp. 149-66, 1957.
- [8] Wang, C. H., and Min, K. J., "Electric Power Generation Planning for Interrelated Projects: A Real Options Approach", *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 53, No. 2, pp. 312-322, 2006.
- [9] Neelakanta, P. S., and Arsali, M. H., "Integrated Resource Planning Using Segmentation Method Based Dynamic Programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 14, No. 1, pp. 375-385, 1999.
- [10] Ramos, A., Perez-Arriaga, I. J., and Bogas, J., "A Nonlinear Programming Approach to Optimal Static Generation Expansion Planning", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 1140-1146, 1989.
- [11] Sirikum, J., Techanitisawad, A., Kachitvichyanukul, V. A., "new efficient GAbenders' decomposition method: for power generation expansion planning with emission controls" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 1092-1100, 2007.
- [1] Kannan, S., Baskar, S., McCalley, J. D., and Murugan, P., "Application of NSGA-II Algorithm to Generation Expansion Planning", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 24, No. 1, pp. 454-461, 2009.
- [2] Pereira, J.C. A, Saraiva, J. T., "Generation expansion planning (GEP) - A long-term approach using system dynamics and genetic algorithms (GAs), *Energy*, Vol. 36, pp. 5180-5199, 2011.
- [3] Meza, J. L. C., *Multicriteria Analysis of Power Generation Expansion Planning*, PhD. Thesis, Wichita State University, 2006.
- [4] Nakamura, S., "A Review of Electric Production Simulation and Capacity Expansion Planning Programs," *Energy Research*, vol. 8, pp. 231-240, 1984.
- [5] Wang, X., and McDonald, J. R., *Modern Power System Planning*, MCGRAW-HILL Publication, 1994.
- [6] International Atomic Energy Agency: *Wien Automatic System Planning (WASP) package: A Computer Code for Power Generating System Expansion Planning*, version WASP-IV user's manual, IAEA, Vienna, 2006.

- Engineering Optimization, Vol. 38, No. 2, pp.129–154, 2006.
- [24] Amiri B., Fathian M., and Maroosi A., “Application of shuffled frog-leaping algorithm on clustering”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol 45, pp. 199–209, 2009.
- [25] Eusuff, M. M., and Lansey, K. E. “Optimization of Water Distribution Network Design Using the Frog Leaping Algorithm”, *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, Vol. 129, No. 3, pp. 210–225, 2003.
- [26] Huynh, T. H., “A Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm for Optimal Tuning of Multivariable PID Controllers”, *IEEE Int. Conf. Industrial Technology*, 2008.
- [27] M. Jadidoleslam, E. Bijami, N. Amiri, A. Ebrahimi, J. Askari, “Application of Shuffled Frog Leaping Algorithm to Long Term Generation Expansion Planning”, *Proceeding of International Conference on Electrical Energy and Networks (ICEEN)*, 2011.
- [28] Ebrahimi, J., Hosseinian, S. H., and Gharehpetian, G. B., “Unit Commitment Problem Solution Using Shuffled Frog Leaping Algorithm”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 26, No. 2, pp. 573–581, 2011.
- [29] Chen, G., Chen, J., and Duan, X., “Power Flow and Dynamic Optimal Power Flow Including Wind Farms,” *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009.
- [30] Elbeltagi, E., Hegazy, T., and Grierson, D., “Comparison Among Five Evolutionary-Based Optimization Algorithms,” *Adv. Eng. Informat.*, Vol. 19, No. 1, pp. 43–53, 2005.
- [31] Mashhadi-Kashtiban, A., and Alinia-Ahandani, M., “Various Strategies for Partitioning of Memplexes in Shuffled Frog Leaping Algorithm”, *Proceeding of the 14th International CSI Computer Conference*, 2009.
- [32] Murugan, P., Kannan, S., and Baskar, S., “Application of NSGA-II Algorithm to Single-Objective Transmission Constrained Generation Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 24, No. 4, pp. 1790–1797, 2009.
- [33] The European Union’s CARDS programme for the Balkan region, Volume 3: Generation and transmission main report, December 2004.
- [34] Liu, Y., and Yan, W., “The Study and Application of Power Plant Planning based on Evolutionary Programming”, *Power and Energy Engineering Conference, (APPEEC)*, 2009.
- [12] Park, J. B., Park, Y. M., Won, J. R., and Lee, K. Y., “An Improved Genetic Algorithm for Generation Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 916–922, 2000.
- [13] Kannan, S., Slochanal, S. M. R., and Padhy, N. P., “Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning Problem”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 20, No. 1, pp. 466–475, 2005.
- [14] Park, Y. M., Won, J. R., Park, J. B., and Kim, D. G., “Generation Expansion Planning Based on an Advanced Evolutionary Programming”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 299–305, 1999.
- [15] Meza, J. L. C., Yildirim, M. B., and Masud, A. S. M., “A Multiobjective Evolutionary Programming Algorithm and Its Applications to Power Generation Expansion Planning”, *IEEE Trans. on Power Systems, MAN, AND CYBERNETICS—PART A: SYSTEMS AND HUMANS*, Vol. 39, No. 5, pp. 1086–1096, 2009.
- [16] Kannan, S., Mary Raja Slochanal, S., Subbaraj, P., and Padhy, N.P., “Application of Particle Swarm Optimization Technique and Its Variants to Generation Expansion Planning Problem”, *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 70, No. 3, pp. 201–208, 2004.
- [17] Kannan, S., and Murugan, P., “Solutions to Transmission Constrained Generation Expansion Planning Using Differential Evolution”, *Euro. Trans. Electr. Power*, Vol. 19, pp. 1033–1039, 2009.
- [18] Jirutitjaroen, P., and Singh, C., “Reliability and Cost Tradeoff in Multiarea Power System Generation Expansion Using Dynamic Programming and Global Decomposition,” *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 21, No. 3, pp.1432–1441, 2006.
- [19] Park, Y. M., Park, J. B., and Won., J. R., “A Hybrid Genetic Algorithm/Dynamic Programming Approach to Optimal Long-Term Generation Expansion Planning”, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 20, No. 4, pp. 295–303, 1998.
- [20] Yildirim, M., Erkan, K., and Ozturk, S., “Power Generation Expansion Planning with Adaptive Simulated Annealing genetic algorithm”, *Int. J. Energy Res.*, Vol. 30, pp.1188–1199, 2006.
- [21] Tekinera, H., Coitb, D. W., and Felderc, F. A., “Multi-Period Multi-Objective Electricity Generation Expansion Planning Problem with Monte-Carlo Simulation”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, pp. 1394–1405, 2010.
- [22] Sirikum, J., and Techanitisawad, A., “Power generation expansion planning with emission control: A nonlinear model and a GA-based heuristic approach,” *Int. J. Energy Res.*, Vol. 30, No. 2, pp. 81–99, 2006.
- [23] Eusuff, M. M., Lansey, and K., Pasha, F., “Shuffled Frog Leaping Algorithm: a Memetic Meta-heuristic for Discrete Optimization”,

 زیر نویس ها

¹ Generation Expansion Planning

² Probabilistic Production Simulation

³ Single Nodal

⁴ Outage Cost

⁵ Expected Energy Not Served

- ⁶ Loss of Load Probability
- ⁷ Equivalent Energy Function Method
- ⁸ Shuffled Frog Leaping Algorithm
- ⁹ Modified SFL
- ¹⁰ Meta-heuristic
- ¹¹ Memplex
- ¹² Shuffling Process
- ¹³ Exploration
- ¹⁴ Exploitation
- ¹⁵ Center Based Clustering Algorithms
- ¹⁶ Euclidian Metric