Archive of SID

رویکردی جدید در برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکهٔ انتقال با در نظر گرفتن ارزش واقعی کفایت مبتنی بر کلونی مصنوعی زنبور عسل اصلاح‌شده

سید مهدی مظهری[۱]، امیر باقری[۲]، حسن منصف[۳] و حمید لسانی[۴]

۱- دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
mazhari@ut.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
a.bagheri@ut.ac.ir
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
hmonsef@ut.ac.ir
۴- استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
lesani@ut.ac.ir

چکیده: با توجه به گسترش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، طراحی مناسب شبکهٔ آینده و توسعهٔ شبکهٔ فعلی اهمیت زیادی برخوردار شده است. برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکهٔ انتقال، یکی از مهمترین بخش‌ها در طراحی توسعهٔ سیستم‌های قدرت است. در این مقاله، برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکهٔ انتقال با در نظر گرفتن ارزش واقعی کفایت خطوط بررسی شده است. برای این منظور، تعریف جدیدی مبتنی بر مباحث اقتصادی به کفایت خطوط اختصاص داده شده و شیوهٔ محاسبهٔ ارزش واقعی کفایت شبکهٔ انتقال، با استفاده از مطالعات آماری، تشریح و فرمول‌بندی شده است. سپس، مسالهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال در قالب یک مسألهٔ بهینه‌سازی با استفاده از کلونی مصنوعی زنبور عسل حل و مراحل تطابق آن با مسألهٔ حاضر تشریح شده است. علاوه بر این، به منظور تسریع در فرآیند بهینه‌سازی و جلوگیری از حبس‌شدن پاسخ‌ها در کمینه‌های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی پیشنهاد و به مسأله اعمال شده‌اند. در پایان، با حل مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال برای یک شبکهٔ نمونه و نیز شبکهٔ واقعی آذربایجان تا افق ۱۳۹۵، کارایی روش پیشنهادی بررسی و نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت؛ برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکهٔ انتقال؛ خوشه‌یابی فازی؛ کفایت شبکه؛ کلونی مصنوعی زنبور عسل.

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال انرژی الکتریکی از بخش‌های مهم برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت است که هدف از آن تعیین مکان، زمان و چگونگی احداث خطوط انتقال جدید به منظور برآوردن نیاز مشترکان شبکه با کمترین هزینه در ضمنِ رعایت مجموعه‌ای از قیود فنی، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان است [۲-۱].

با توجه به اینکه افق مورد مطالعه در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت بلندمدت است، لذا برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال به دو شکل دینامیکی و استاتیکی انجام می‌گیرد. در نوع اول، برنامه‌ریزی به صورت چندمرحله‌ای بوده، کلیهٔ پارامترهای مجهول به صورت همزمان تعیین می‌شوند. این

[۱] تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۰۸/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۵/۱۵
نام نویسنده مسؤول: سید مهدی مظهری
نشانی نویسنده مسؤول: ایران - تهران - پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران - دانشکده برق و کامپیوتر.

www.SID.ir

Archive of SID

در حالی است که در برنامه‌ریزی استاتیکی پارامتر زمان از میان مجهولات مسأله حذف شده، لذا برنامه‌ریزی توسعه برای یک افق از پیش تعیین شده، انجام می‌گیرد [۵-۳]. با توجه به محدود بودن منابع مالی و نیز عدم‌اطلاع دقیق از چگونگی تغییرات بار مصرفی درخواستی، معمولاً طرح توسعهٔ شبکهٔ انتقال به صورت استاتیکی انجام می‌گیرد. از آنجایی که هر گونه تلاشی در جهت کاهش هزینه‌های توسعه، صرفه‌جویی در هزینه‌های سیستم را به دنبال خواهد داشت، لذا تا کنون مطالعات متنوعی در زمینه برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال انجام شده است [۱۸-۶].

دسته‌ای از این پژوهش‌ها با ارائهٔ روش‌های جدید و یا اعمال الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی به مسأله، سعی در بهبود پاسخ‌ها داشته‌اند. استفاده از الگوریتم ژنتیک [۲-۱] و [۷]، الگوریتم جستجوی ممنوعه [۸]، الگوریتم آبکاری فولاد [۹]، برنامه‌ریزی خطی [۱۰] و الگوریتم مهاجرت پرندگان [۱۸-۱۷] دستهٔ کوچکی از مطالعات انجام شده در این زمینه هستند.

روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، روش‌های مبتنی بر جمعیت بوده که در آنها به نحو شایسته‌ای از عملگرهای انتخاب و تغییر تصادفی استفاده می‌شود. اگر چه این روش‌ها، در اغلب موارد، از کیفیت پاسخ‌های مناسبی برخوردارند، با این حال از دو اشکال عمده رنج می‌برند: یکی سرعتِ بسیار پایینِ همگرایی و دیگری عدمِ رسیدن به جوابِ واحد در چندین بار اجرای الگوریتم، یا به عبارت دیگر توقف در یکی از کمینه‌های محلی. در حقیقت، هنگامی که ارتباط متغیرهای بهینه‌سازی پیچیده شده و تعداد آنها زیاد می‌گردد، احتمال محبوس ماندن در کمینه‌های محلی افزایش می‌یابد.

با توجه به جاذبهٔ روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، تحقیقات متعددی برای حل این مشکلات انجام شده است. برای مثال، در [۱۱] با ترکیب تئوری گراف، تاپالوژی شبکه در بهینه‌سازی مسأله دخیل شده و کیفیت پاسخ‌ها بهبود یافته است. در [۷] با تعریف چندین عملگر جدید، ساختار الگوریتم ژنتیک اصلاح شده است. [۱۸] نیز با تلفیق دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی سعی در حل مشکل کرده است. طبق راهکار پیشنهاد شده، الگوریتم مهاجرت پرندگان با استفاده از عملگر جهشِ الگوریتم ژنتیک تقویت شده و کیفیت و سرعت همگرایی به پاسخ بهینه بهبود یافته است.

برخی دیگر از مطالعات انجام‌شده، برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکهٔ انتقال را با در نظر گرفتن پارامترهایی، نظیر عدم‌قطعیت در پیش‌بینی بار [۴]، معیارهای قابلیت اطمینان [۱۴] و [۱۹]، عوامل اقتصادی [۱۲] و [۱۶]، کفایت شبکه [۱۸-۱۷] و نیز تجدیدساختار [۲۱-۲۰] بررسی نموده‌اند.

کفایت شبکه پس از سال افق، موضوعی است که مطالعات اندکی بر روی آن انجام شده است. در [۱۸-۱۷] کفایت شبکه در برنامه‌ریزی توسعه شبکهٔ انتقال در نظر گرفته‌شده و تابع هدف مسأله به صورت افزایش تعداد سال‌های کفایت خطوط پس از سال افق، با رعایت قید حداکثر میزان سرمایه‌گذاری، تعریف شده است. مطابق نتایج ارائه شده، مقادیر بالای سرمایه‌گذاری، سال‌های کفایت بیشتری را نتیجه داده و هدف پیدا کردن تعادلی میان میزان کفایت و میزان سرمایه‌گذاری است. شاخصی که نمایانگر این تعادل است، تعریف شده و بر اساس آن بهترین میزان سرمایه‌گذاری و در نتیجه، بهترین آرایش برای توسعهٔ شبکه تعیین می‌گردد. در این پژوهش‌ها، هزینه به عنوان یک قید در نظر گرفته شده و تابع هدف مسأله فقط تابعی از زمانِ از دست رفتنِ کفایت سیستم است. با توجه به اینکه ارزش واقعی کفایت تعریف نشده و از آنجایی که مقادیر حداکثر سرمایه‌گذاری به صورت گسسته و پله‌ای فرض شده‌اند، الگوریتم قادر به بهینه‌سازی همزمان مقدار سال‌های کفایت و مقدار هزینه نیست. از طرفی، در [۲۲] مسألهٔ بهینه‌سازی مبتنی بر هزینه، با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی سالانهٔ کفایت خطوط بررسی شده است. در پژوهش ذکر شده، ارزش اقتصادی سالانهٔ کفایت خطوط متناسب با ارزش تولید از دست‌رفته فرض شده است.

در این مقاله، مسألهٔ توسعهٔ استاتیکی شبکهٔ انتقال با رویکردی جدید در کفایتِ شبکهٔ انتقال بررسی می‌شود. برای این منظور، ارزش واقعی کفایت شبکه تعریف شده، مطالعات آماری برای دست‌یابی به معیار ذکر شده انجام می‌گیرد. سپس توسعهٔ شبکهٔ انتقال در قالب یک مسألهٔ بهینه‌سازی دو هدفه، با هدف کاهش هزینه‌ها و حداکثرسازی سود ناشی از کفایت، با استفاده از الگوریتم

www.SID.ir

Archive of SID

کلونی مصنوعی زنبور عسل حل می‌گردد. از طرفی، با ارائهٔ چند راهکار ابتکاری الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی هدفمند شده و بر این اساس، مشکلات رایج در الگوریتم‌های موجود، تا اندازه‌ای بهبود می‌یابد. در پایان، با حل مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال برای یک شبکهٔ نمونه و نیز شبکهٔ واقعی آذربایجان، کارایی روش پیشنهادی در قالب چندین سناریو بررسی و با پاسخ سایر روش‌ها مقایسه می‌شود.

۲- فرمول بندی مسأله

۲-۱- تابع هزینه

همان طور که ذکر شد، هدف از برنامه‌ریزی توسعهٔ شبکهٔ انتقال تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری شامل مکان، زمان و چگونگی احداث خطوط انتقال جدید به گونه‌ای است که کمترین هزینه به سیستم تحمیل شده و قیود شبکه نیز رعایت شوند. هزینهٔ سیستم در یک توسعهٔ استاتیکی از مجموع هزینه‌های زیر تشکیل می‌شود:

- هزینهٔ خطوط جدید؛
- هزینهٔ تلفات خطوط جدید و احداث شده؛
- هزینه‌های بهره‌برداری خطوط شامل هزینه‌های تعمیر، نگهداری، استهلاک و ... .

این هزینه‌ها را می‌توان به صورت زیر در قالب یک تابع هزینه فرمول‌بندی نمود:

$$\begin{aligned} Min \quad C_{total} &= \sum_{i\in\Omega_{sel}^{cor}} C_{line}\times n_{new,i}^{cor}\times d_i \\ &+ \sum_{i\in\Omega_{sel}^{cor}}\sum_{j=1}^{ny} CF^{h}\times C_{cor,i}^{maint}\times d_i \\ &- \sum_{i\in\Omega_{exi}^{cor}}\sum_{j=1}^{ny} k_{dep,ij}\times w_i\times n_{exi,i}^{cor}\times(1-\delta_i) \\ &+ \sum_{h=1}^{ny} CF^{h}\sum_{i\in\Omega_{sel}^{cor}} 8760\times LSF\times C_{loss}\times r_i\times d_i\times I_i^2 \\ &- benefit_{n_{adq}}^{ny} \end{aligned} \qquad (۱)$$

$$k_{dep,ij} = \frac{n_{ul,i}+1-j}{n_{ul,i}\times(n_{ul,i}+1)/2}\ , \quad \forall i\in\Omega_{exi}^{cor} \qquad (۲)$$

$$CF = \frac{1+Infr}{1+Intr} \qquad (۳)$$

در رابطه (۱)، جملهٔ اول هزینهٔ احداث کریدورهای جدید و یا مدارهای جدیدِ کریدورهای احداث‌شده را نشان می‌دهد. در حالی که جملهٔ دوم هزینهٔ تعمیر و نگهداری کریدورها را محاسبه می‌نماید، اثر استهلاک کریدورهای موجود در جملهٔ سوم نشان داده شده است. در این جمله، اثر استهلاک و ارزش اسقاطی مطابق قانون مجموع رقمی سنوات و مطابق رابطهٔ (۲) محاسبه شده است [۲۳]. جملهٔ چهارم هزینه ناشی از تلفات خطوط و جملهٔ پنجم سود ریالی ناشی از کفایت شبکه است. این در حالی است که ضریب تبدیل هزینهٔ جاری به ارزش کنونی مطابق رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود.

۲-۲- قیود شبکه

محدودیت‌های حاکم بر مسأله به سه قسمت کلی تقسیم می‌شوند:

الف- محدودیت‌های ناشی از توزیع توان الکتریکی:

با مشخص‌شدن آرایش شبکه، آنالیز پخش‌بار به منظور بررسی قیود فنی شبکه انجام می‌گیرد. با توجه به زمان بر بودن پخش‌بار ac، معمولاً توسعهٔ شبکهٔ انتقال با استفاده از پخش‌بار dc انجام می‌گیرد [۲-۱]. بر این اساس، باید توزیع توان در ساختار ایجاد شده متوازن بوده، قید حداکثر توان گذرکرده از هر کریدور رعایت گردد. برای این منظور، لازم است شبکهٔ پیشنهادی از روابط زیر پیروی نماید:

$$\mathbf{M}_I\mathbf{M}_P + \mathbf{V}_g - \mathbf{V}_d = 0 \qquad (۴)$$

$$0 \le \mathbf{V}_g \le \mathbf{V}_{g,max} \qquad (۵)$$

$$P_i - g_i\times\Delta\theta_i\times(n_{new,i}^{cor}+n_{exi,i}^{cor}) = 0, \quad \forall i\in\Omega_{sel}^{cor} \qquad (۶)$$

$$\left|P_i\right| \le P_{max,i}\times(n_{new,i}^{cor}+n_{exi,i}^{cor}), \quad \forall i\in\Omega_{sel}^{cor} \qquad (۷)$$

ب- محدودیت‌های ناشی از شرایط فنی و اقتصادی در احداث خطوط:

با توجه به محدود بودن منابع مالی و کمبود نیروهای متخصص برای تعمیرات سالیانه، میزان هزینهٔ سرمایه‌گذاری‌شده در احداث خطوط و نیز میزان کل هزینهٔ سالیانهٔ تعمیرات خطوط دارای حد مشخصی است که در طراحی توسعهٔ خطوط انتقال لحاظ می‌گردد. از طرفی، با توجه به موقعیت جغرافیایی کریدور، تعداد کل مدارهای قابل نصب در هر کریدور دارای قید است. بر این اساس قیود زیر به مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال افزوده می‌گردند:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\sum_{i\in\Omega_{sel}^{cor}} C_{line} \times n_{new,i}^{cor} \times d_i \le C_{max}^{const} \quad (۸)$$

$$\sum_{i\in\Omega_{sel}^{cor}} \sum_{j=1}^{ny} CF^{h} \times C_{cor,i}^{maint} \times d_i \le C_{max}^{maint} \quad (۹)$$

$$n_{new,i}^{cor} + n_{exi,i}^{cor} \le n_{max,i}^{cor}, \quad \forall i \in \Omega_{sel}^{cor} \quad (۱۰)$$

پ- محدودیت‌های ناشی قید قابلیت اطمینانِ $N-1$:

با توجه به اهمیت استراتژیک خطوط انتقال، شبکه‌های انتقال باید از سطح قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار باشند. اگر چه طراحی ریسک‌محور شبکهٔ انتقال با توجه به پارامترهای قابلیت اطمینان، از جمله ارزش خاموشی و انرژی فروخته‌نشده انجام می‌گیرد [۱۴]، با این حال، در مطالعات مرسوم، قید قابلیت اطمینان $N-1$ به عنوان یکی از محدودیت‌های شبکه فرض می‌گردد. مطابق این قید، آرایش پیشنهادی باید در صورت از دست رفتن هر یک از خطوط، محدودیت‌های ناشی از توزیع توان الکتریکی در شبکه را ارضا نماید.

۳- کفایت شبکه انتقال

کفایت شبکهٔ انتقال به معنای کافی بودن تعداد خطوط شبکه به منظور پاسخ‌گویی به رشد بار در سال‌های پس از افقِ برنامه‌ریزی است. در [۱۸-۱۷] کفایت شبکه یک ویژگی اساسی و همواره مفید فرض‌شده و لذا مسألهٔ توسعهٔ انتقال به منظور افزایش تعداد سال‌های کفایت، با فرض مقدار مشخصی از هزینهٔ سرمایه‌گذاری، بهینه‌سازی شده است. در [۲۲] نیز ارزش کفایت برای تمام سال‌ها ثابت و متناسب با ارزش تولید از دست‌رفته محاسبه شده است.

در این مقاله، ارزش واقعی کفایت شبکه برای هر یک از سال‌های پس از افقِ برنامه‌ریزی، متفاوت فرض می‌شود. از طرفی، این فرض که کفایت شبکه، در ضمن رعایتِ قیدِ هزینهٔ سرمایه‌گذاری، ویژگی مفیدی است، نقض‌شده و اصلاح می‌گردد.

باید توجه کرد که: کفایت n_{adq} شبکه انتقال بدین معنا است که شبکهٔ انتقالِ طراحی‌شده برای سال افق (ny) قادر است قیود فنی شبکه را تا سال $ny + n_{adq}$، بدون اینکه شبکه توسعه پیدا کند، ارضا نماید؛ ولی این بدان معنا نیست که شبکه نیازی به توسعه نداشته و انتقال بهینهٔ توان تا آخرین سال کفایت انجام شود. بر این اساس، ممکن است تلفات شبکهٔ طراحی‌شده برای سال افق، در سال‌های کفایت به حدی زیاد باشد که صرفهٔ اقتصادی در توسعهٔ شبکهٔ انتقال، علی‌رغم پرداخت هزینهٔ توسعه و نیز تلفات شبکهٔ توسعه‌یافته در سال‌های مورد نظر، باشد. با توجه به این مطالب، ارزش واقعی کفایت شبکه انتقال طراحی‌شده برای سال ny در iامین سال کفایت به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$W_{ny,i}^{adq} = C_{ny+i-1}^{ny+i} + \xi_{oper,(ny+i)}^{ny+i} - \xi_{oper,(ny+i)}^{ny} - C_{dep,(ny+i)}^{adq}, \quad i = 1,\ldots,n_{adq} \quad (۱۱)$$

$$C_{dep,i}^{adq} = \frac{(ny+n_{adq})+1-j}{(ny+n_{adq})\times((ny+n_{adq})+1)/2} \times C_{total}, \quad i = 1,\ldots,ny+n_{adq} \quad (۱۲)$$

مطابق این رابطه، ارزش واقعی کفایت شبکه در iامین سال کفایت، برابر است با اختلاف هزینهٔ توسعه و تلفات شبکهٔ طراحی شده برای سال $ny+i$ام در مدت یک سال بهره‌برداری و هزینهٔ تلفات شبکهٔ طراحی‌شده برای سال افق در iامین سال بهره‌برداری. در این رابطه، $C_{dep,(ny+i)}^{adq}$ معرف هزینهٔ مستهلک‌شدهٔ طرح پیشنهادی در iامین سال کفایت بوده، بر اساس قانون مجموع رقومی سنوات و مطابق رابطهٔ (۱۲) محاسبه می‌گردد. مطابق این روابط، ارزش واقعی کفایت یک شبکهٔ انتقال مطابق رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$benefit_{n_{adq}}^{ny} = \sum_{i=1}^{n_{adq}} W_{ny,i}^{adq} \quad (۱۳)$$

با توجه به بازگشتی بودن رابطهٔ (۱۱)، به منظور محاسبهٔ ارزش واقعی کفایت باید مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقالِ مورد مطالعه به صورت پی‌درپی و برای افق‌های یکساله انجام گیرد. روش پی‌درپی از جمله روش‌های برنامه‌ریزی بلندمدت چندمرحله‌ای است که در آن سال هدف به چندین زیربازه تقسیم می‌شود. سپس مسأله برای هر یک از بازه‌ها به صورت استاتیکی و با توجه به نتایج دورهٔ قبل انجام می‌گیرد [۲۴].

با توجه به اینکه محاسبهٔ ارزش واقعی کفایت برای تمامی سال‌ها و نیز افق‌های برنامه‌ریزی متفاوت، زمان‌بر

www.SID.ir

Archive of SID

است، لذا با استفاده از مجموعهٔ محدودی از پاسخ‌ها و استفاده از برازش نرمال داده‌ها، می‌توان با کمترین میزان خطا، رابطهٔ مناسبی را برای ارزش واقعی تلفات یک شبکه به دست آورد [۲۶-۲۵].

۴- روش حل مسأله

۴-۱- الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل

الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل یک الگوریتم جستجوست که نخستین بار در سال ۲۰۰۵ با استفاده از شبیه‌سازی رفتار جستجوی غذای گروه‌های زنبور عسل ایجاد شده است [۲۷]. در الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل، جستجوی منابع غذایی با استفاده از سه دسته زنبور عسل با نام‌های زنبور کارگر، زنبور ناظر و زنبور دیده‌بان انجام می‌گیرد. این زنبورها از نظر ساختاری مشابه بوده، ولی هر یک اعمال متفاوتی را انجام می‌دهند.

در این الگوریتم، متغیرهای مسأله به عنوان موقعیت منبع غذایی در نظر گرفته می‌شود. مقدار شهد (نکتار) منبع غذایی، نشان‌دهنده تابع احتمال و یا برازندگی راه‌حل‌هاست. هر منبع غذایی تنها توسط یک زنبور کارگر استخراج شده و به عبارتی، تعداد زنبورهای کارگر برابر تعداد منابع غذایی اطراف کندوست.

در نخستین قدم، جمعیت اولیه‌ای به صورت تصادفی ایجاد شده و میزان برازندگی جمعیت تولید شده بر اساس تابع ارزیابی محاسبه و ذخیره می‌شود. سپس، جمعیت منابع غذایی (راه حل‌ها) به فاز اصلی الگوریتم که جستجو توسط زنبوران کارگر، ناظر و دیده‌بان است، فرستاده می‌شود. پس از آن، هر یک از زنبورهای کارگر به سوی موقعیت غذایی (راه‌حل) مربوط به خود فرستاده می‌شود. در این هنگام، هر زنبور کارگر اصلاحاتی را بر روی موقعیت منبع غذایی خود انجام می‌دهد. این اصلاحات بر اساس اطلاعات قبلی موجود در حافظه، اطلاعات محلی (اطلاعات بصری) و یافتن یک منبع غذایی در همسایگی منبع غذایی مربوط به خود، صورت می‌پذیرد. سپس با توجه به موارد ذکر شده، موقعیت جدید منبع غذایی ارزیابی می‌گردد. در الگوریتم زنبورعسل، یافتن منبع غذایی جدید در همسایگی منبع قبلی با استفاده از یک معیار تصادفی (φ_{ij}) و مطابق رابطهٔ زیر انجام می‌گیرد:

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij} \times (x_{ij} - x_{kj}) \qquad (۱۴)$$

در این رابطه، x_{ij} موقعیت غذایی قبلی و v_{ij} موقعیت منبع غذایی جدیدست. از طرفی، j یک عدد طبیعی است که حداکثر برابر تعداد متغیرهای مسأله فرض شده (D) و k نیز به صورت تصادفی از بازهٔ $k \in \{1,2,...,SN\}$ انتخاب می‌گردد. SN برابر تعداد زنبورهای ناظر و کارگر در کلونی مصنوعی زنبور عسل است [۲۸-۲۷].

در این مرحله، زنبور کارگر، با توجه به مقدار شهد موجود در منابع غذایی، انتخابی را بین x_{ij} و v_{ij} انجام می‌دهد. اگر میزان برازندگی v_{ij} نسبت به x_{ij} بالاتر باشد، زنبور کارگر، موقعیت جدید را در حافظه خود ذخیره کرده، موقعیت قبلی را فراموش می‌کند.

پس از آن، زنبورهای کارگر به کندو بازگشته، در فرآیند "تصمیم‌گیری" شرکت می‌کنند. فرض می‌شود که هر زنبور قابلیت درک و دریافت اطلاعات سایر زنبورها را داشته و این قابلیت را دارد که با استفاده از اطلاعات دیگران، راه‌حل‌های بهتری را برای مسأله پیدا کند. بر این اساس، زنبور کارگر می‌تواند یکی از اعمال زیر را انجام دهد:

الف) منبع غذایی خود را رها کرده، در سالن اجتماعات به دنبال زنبوری که منبعی با کیفیت بیشتر در اختیار دارد، بگردد (خطوط با شماره ۳ در شکل ۱)،

ب) بدون اینکه کسی را جذب کند، مجدداً به سراغ منبع (راه‌حل) خود برود (خطوط با شماره ۲ در شکل ۱)،

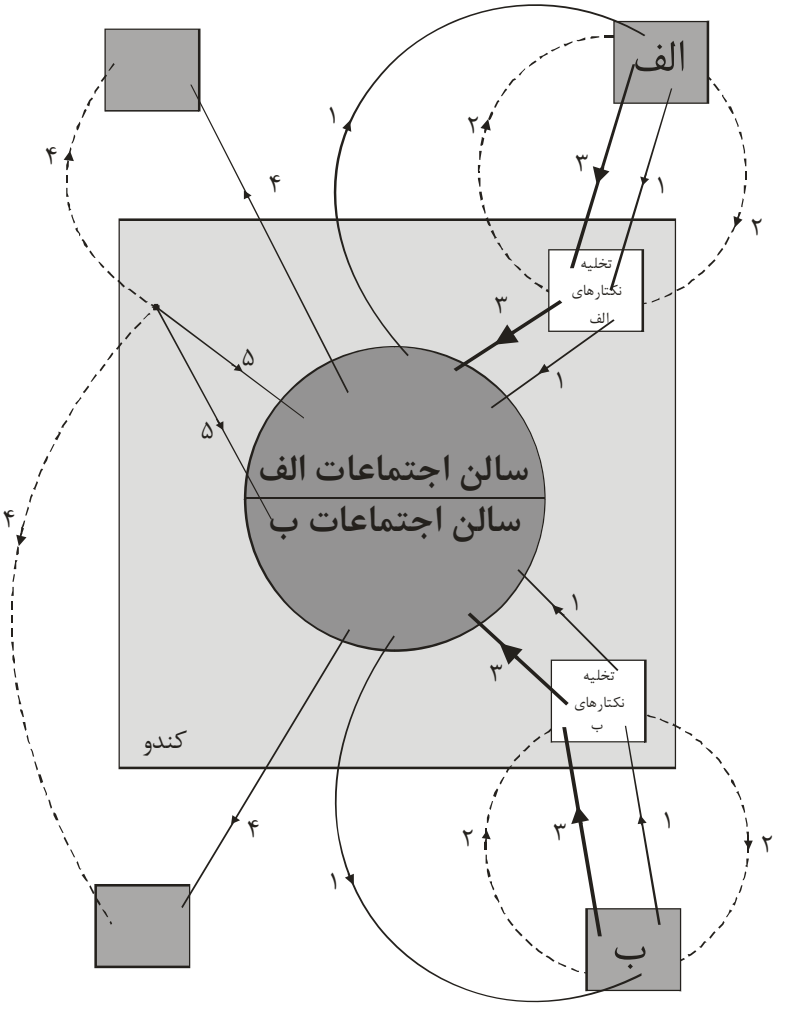
ج) در سالن اجتماعات با انجام حرکاتی موزون سعی در جمع کردن زنبورهای دیگر به دور خود داشته باشد (خطوط با شماره ۱ در شکل ۱).

کسب اطلاعات جدید و تصمیم‌گیری در مورد منبع غذایی، توسط زنبوران ناظر انجام می‌شود. زنبوران ناظر اطلاعات مربوط به شهد منابع غذایی را، که در سالن اجتماعات عرضه می‌گردد، ارزیابی کرده و با توجه به میزان احتمال آنها، مناسبترین موقعیت منبع غذایی را انتخاب می‌کنند. سپس، مقدار برازندگی منابعِ غذایی انتخاب‌شده توسط زنبوران ناظر، محاسبه می‌شود. در

www.SID.ir

Archive of SID

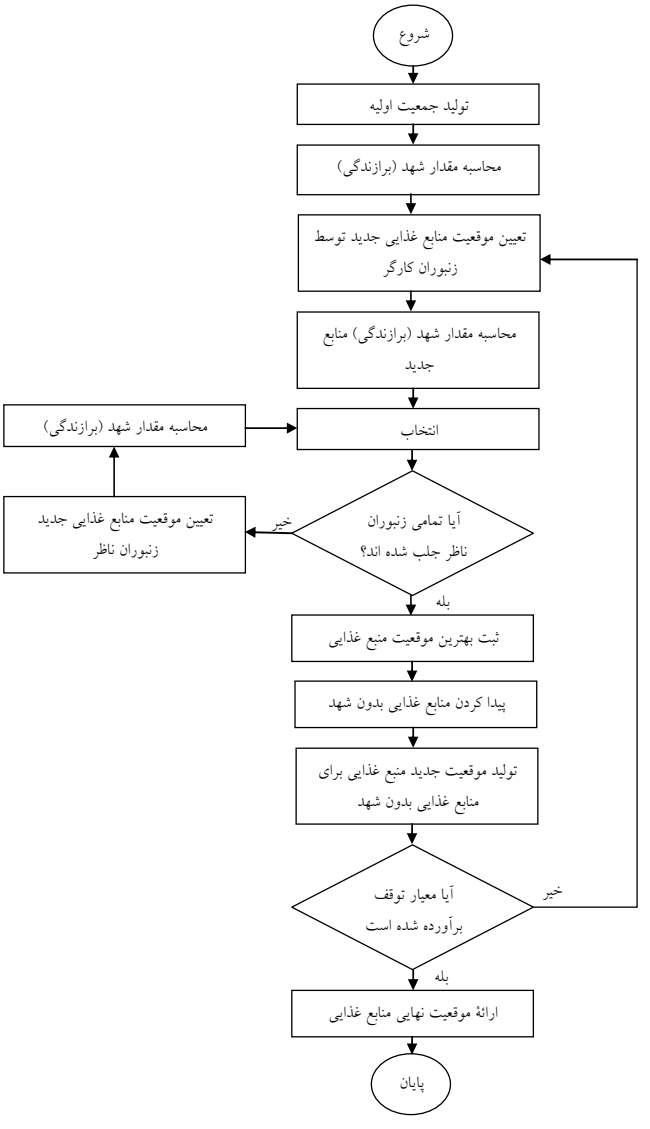
ادامه، زنبوران ناظر، مشابه قبل، یک منبع غذایی جدید در همسایگی منبع غذایی قبلی تولید و مقدار شهد آن را با منبع قبلی مقایسه می‌کنند. پس از اصلاح موقعیت منابع غذایی انتخاب شده توسط زنبوران ناظر، زنبوران کارگر به موقعیت منابع غذایی جدید فرستاده می‌شوند. این روند تا رسیدن به معیار توقف برنامه ادامه پیدا می‌کند. در الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل، منابع غذایی که شهد آنها به وسیله زنبوران کارگر مصرف شده و یا خالی از نکتار باشد، با یک منبع غذایی جدید که به صورت تصادفی تعیین می‌گردد، جایگزین می‌شود (خطوط با شماره ۴ و ۵ در شکل ۱). این مرحله توسط زنبورهای دیده‌بان انجام می‌گیرد و فرض بر این است که اگر یک منبع غذایی نامناسب در تعداد تکرارهای مشخص شده اصلاح نشود، فاقد شهد است [۲۸-۲۷]. شکل (۲) مراحل کلی الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمایش رفتار زنبورهای کارگر [۲۷]

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۲): مراحل کلی الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل

۴-۲- نحوهٔ حل مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال با استفاده از کلونی مصنوعی زنبور عسل

به منظور برنامه‌ریزی توسعهٔ خطوط انتقال در شبکه‌ای با کریدورهای کاندیدا و موجود که هر یک قادرند تعداد متفاوتی مدار داشته باشند، تعداد مجموع زنبورهای کارگر و ناظر برابر تعداد کل کریدورها فرض می‌گردد. بر این اساس، هر یک از این زنبورها باید با جستجو در فضای کریدور خود، بهترین تعداد مدارهای قابل نصب را پیدا کند. با تعریف قیود شبکهٔ انتقال در یک محیط خارجی و ارائهٔ تابع هزینهٔ رابطهٔ (۱) به عنوان تابع برازندگی میزانِ نکتارها، مسألهٔ بهینه‌سازی مبتنی بر شکل (۲) حل می‌گردد. شرط توقف الگوریتم، تعداد تکرار معینی فرض‌شده، کل برنامه، به شکل مستقل برای چند مرتبه اجرا می‌گردد. در نهایت، بهترین پاسخ حاصل از این تکرارها، به عنوان پاسخ بهینهٔ مسأله در نظر گرفته می‌شود. مراحل کلی الگوریتم پیشنهادی و چگونگی اجرای قیود مسأله در شکل (۳) نشان داده شده است.

۴-۳- اصلاح کلونی مصنوعی زنبور عسل به منظور حل مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال

با توجه به اینکه در الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل، مکان اولیهٔ منابع غذایی به صورت تصادفی تعیین

www.SID.ir

Archive of SID

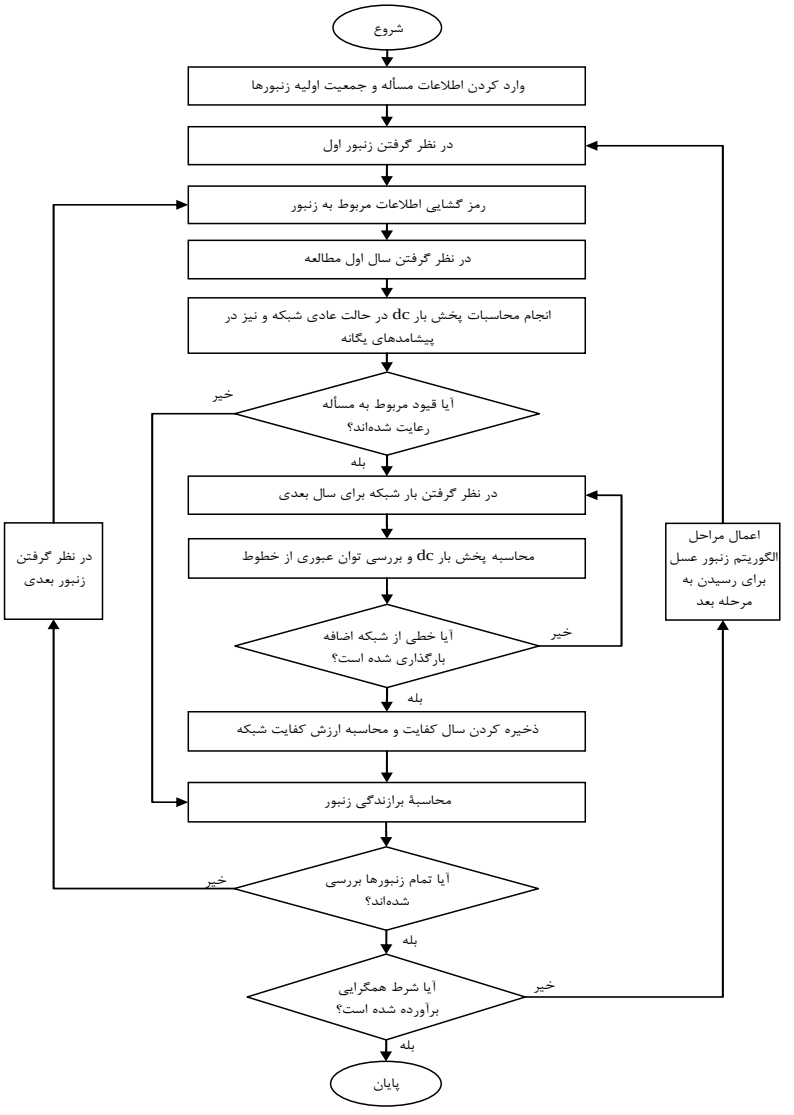
شده و از طرفی، تعیین مکان‌های غذایی همسایه، که توسط زنبورهای ناظر انتخاب می‌شوند، قالب احتمالاتی (و تا حدی تصادفی) دارند، لذا الگوریتم تغییرات نسبتاً آرامی داشته، پاسخ‌های مناسبی را نتیجه می‌دهد. با این همه، از آنجایی که الگوریتم ذکر شده از دستهٔ الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی است، لذا دو ضعف کلی این روش‌ها یعنی سرعتِ بسیار پایینِ همگرایی و نیز حبس شدن در کمینه‌های محلی، در این الگوریتم نیز به چشم می‌خورد. در این قسمت، با استفاده از ماتریس تعلقات فازی، تابع احتمال جدیدی برای انتخاب منابع غذایی در مسالهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال پیشنهاد می‌گردد. تابع مذکور در بردارندهٔ تعدادی از شرایط جغرافیایی و الکتریکی شبکهٔ مورد مطالعه بوده، احتمال انتخاب تعداد مدارهای هر کریدور را هدفمند می‌نماید.

الف- ماتریس تعلقات فازی

در مجموعه‌های فازی میزان تعلق یک عضو به هر یک از خوشه‌های موجود با استفاده از تعلق نمایش داده می‌شود. بر این مبنا، هر عضوِ مجموعه می‌تواند به تمامی خوشه‌ها وابسته بوده، ولی مجموع تعلقات آن به تمامی خوشه‌ها برابر یک است. برای این منظور باید تابع معیار زیر کمینه گردد [۲۹]:

$$J = \sum_{i=1}^{C}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}^{m} \times d_{ik}^{2} = \sum_{i=1}^{C}\sum_{k=1}^{n} u_{ik}^{m} \left\| \left| x_k - x_i \right| \right\| \qquad (۱۵)$$

که در آن:



شکل (۳): مراحل کلی الگوریتم پیشنهادی برای توسعهٔ شبکهٔ انتقال

www.SID.ir

Archive of SID

m یک عدد حقیقی بزرگتر از یک است و در اکثر موارد برای آن عدد دو انتخاب می‌شود. اگر $m = ۲$ خوشه‌یابی غیرفازی (کلاسیک) حاصل می‌شود؛

x_k مختصات نمونه kام؛

x_i نماینده یا مرکز خوشه iام؛

n تعداد نمونه‌ها.

در این رابطه $\|.\|$ میزان تشابه (فاصله) نمونه با (از) مرکز خوشه بوده، می‌توان از هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد، استفاده کرد. با استفاده از u_{ik} ماتریس تعلقات U که دارای C سطر (C تعداد خوشه‌ها است) و n ستون است، تعریف می‌گردد. همان طور که ذکر شد، مجموع مؤلفه‌های هر یک از ستون‌ها باید برابر یک باشد، لذا:

$$\sum_{i=1}^{C} u_{ik} = 1, \quad \forall k = 1,..., n \qquad (۱۶)$$

برای محاسبهٔ u_{ik} کافی است تابع معیار رابطهٔ (۱۵) با توجه به قید مطرح‌شده در رابطهٔ (۱۶) کمینه شود. برای این منظور، از رابطهٔ (۱۵) مشتق گرفته، حاصل برابر صفر فرض می‌شود. بر این اساس [۲۹]:

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{C} \left[\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right]^{2/(m-1)}} \qquad (۱۷)$$

ب- ماتریس تعلقات اصلاح‌شده

با توجه به اینکه معیار فاصله معیار شایسته‌ای برای بارهای الکتریکی نیست، لذا ماتریس تعلقات اصلاح‌شده به گونه‌ای تعریف می‌گردد که مولفه‌های آن، مطابق رابطهٔ زیر، با به توجه میزان توان وزن‌دهی گردند:

$$u'_{ik} = u_{ik} \times P_k \Big/ \sum_{k=1}^{n} P_k \qquad (۱۸)$$

در این رابطه، P_k میزان توان مصرفی شین kام بوده، n نشان‌دهندهٔ تعداد کل شین‌هاست.

پ- تابع احتمال انتخاب تعداد مدارهای هر کریدور

در یک شبکهٔ انتقال، شین‌های مصرف‌کننده، بارِ مورد نیاز خود را یا مستقیماً از شین‌های ژنراتوری دریافت می‌کنند و یا آن را با واسطه (در قالب شبکه) اخذ می‌نمایند. در این میان، احتمال دریافت مستقیم توان از یک شین ژنراتوری، علاوه بر شرط وجود کریدورِ کاندیدا (یا احداث‌شده)، به شرایطی همچون طول و وضعیت کریدور و نیز وضعیت مصرف سایر شین‌ها و فاصلهٔ آن‌ها تا شین‌های ژنراتوری بستگی دارد. از طرف دیگر، احتمال دریافت غیرمستقیم توان از یک شین خاص، به وضعیت خطوط موجودِ متصل به شین اولیه، میزان فاصلهٔ شین اولیه از شین مورد نظر نسبت به سایر شین‌ها و نیز به وضعیت بار مصرفی سایر شین‌های شبکه بستگی دارد. در این بخش، این موارد به شکلی ساده و مفهومی فرمول‌بندی و در یک قالب احتمالاتی قرار داده می‌شوند.

برای این منظور ابتدا شبکهٔ انتقال به همراه مجموعهٔ کریدورهای موجود و کاندیدا به صورت یک گراف مدل شده و کوتاهترین فاصلهٔ میان تمامی شین‌ها با استفاده از الگوریتم دایجکسترا محاسبه می‌شود [۳۰]. سپس میزان تعلق هر شینِ مصرف‌کننده به شین‌هایی که در مجاورت این شین قرار دارند، وقتی که کلیهٔ شین‌های مجاور به عنوان مرکز خوشه فرض گردند، با استفاده از تعلقات اصلاح‌شده و مطابق روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$u'_{ik} = u_{ik} \times P_{ik} \Big/ \sum_{j=1}^{n_{\Omega_i}} P_{worth,ij}, \ \forall i \in \Omega_{S,D}, \ \forall i \in \Omega_i \qquad (۱۹)$$

$$P_k = \begin{cases} 1/P_{D,k} - P_{G,k} & , \quad \forall i \in \Omega_{S,D} \\ P_{D,k} - P_{G,k} & , \quad \forall i \in \Omega_{S,G} \end{cases} \qquad (۲۰)$$

$$P_k = \begin{cases} \forall i \in \Omega_{bus}, i \in \Omega_{S,D} \,|\, P_{D,i} - P_{G,i} > 0 \\ \forall i \in \Omega_{bus}, i \in \Omega_{S,G} \,|\, P_{D,i} - P_{G,i} < 0 \end{cases} \qquad (۲۱)$$

در رابطهٔ (۲۰)، P_k نمایانگر ارزش تولیدی شین k بوده، این ارزش برای شین‌های ژنراتوری بیشتر از شین‌های مصرفی است. از طرف دیگر، مطابق این رابطه ارزش شین‌های با بار مصرفی کمتر، بیشتر است.

با توجه به این موارد و توضیحات قبلی، احتمال اتصال شین i به شین k، به میزان تعلق شین i به شین k و نیز مجموع تعلقات شین k به شین‌های ژنراتوریِ متصل به آن، وابسته است. بر این اساس:

www.SID.ir

Archive of SID

$$p_{1,ij} = \frac{u_{ij} \times U_{G,j}}{\sum_{k=1}^{n_{\Omega_i}} u_{ik} \times U_{G,k}} \;,\; \forall i \in \Omega_{bus} \;,\; j \in \Omega_i \qquad (۲۲)$$

$$U_{G,j} = \sum_{k \in \Omega_{k,G}} u'_{ik} \qquad (۲۳)$$

شایان ذکر است که با توجه به اهمیت بالاتر جملات مرتبهٔ پایین‌تر در یک توزیع دوجمله‌ای از سایر احتمال‌های تغذیهٔ بار مصرفی (مثلاً تغذیه با دو واسطه) صرفنظر شده است.

به منظور تعیین تابع احتمالِ انتخابِ تعدادِ مدارهای هر کریدور، وضعیت خطوط متصل به هر شین به یک قالب احتمالاتی تبدیل و در رابطهٔ (۲۲) ضرب می‌شود. برای این منظور، ارزش احتمالاتی هر یک از خطوط مطابق رابطهٔ زیر تعیین می‌گردد:

$$p_{2,ij} = P_{worth,ij} \Big/ \sum_{j=1}^{n_{\Omega_i}} P_{worth,ij} \;,\; \forall i \in \Omega_{bus} \;, j \in \Omega_i \qquad (۲۴)$$

$$P_{worth,ij} = \beta_{ij} \times (w_{ij} \times k_{dep}) - (1-\beta_{ij}) \times C_{ij}^{adj} + \max(\Omega_{C^{adj}}) + \varepsilon \qquad (۲۵)$$

در رابطهٔ (۲۵)، جملهٔ اول، ارزش کریدور موجود، با احتساب نرخ استهلاک و جملهٔ دوم، هزینهٔ احداث یک مدار کامل در کریدور مورد بررسی را نشان می‌دهد. مطابق این دو جمله، اگر کریدوری از قبل احداث شده باشد، مجموع این دو جمله مثبت و در غیر این صورت، منفی می‌گردد. با توجه به اینکه طبق قوانین احتمال، احتمال یک پیشامد همواره مثبت است، لذا با اضافه‌کردن بیشترین هزینه احداث یک مدار در بین کریدورها، به تمام جملات، از منفی‌شدن احتمال‌ها جلوگیری می‌شود. از طرف دیگر، از آن‌جایی که صفر شدن رابطهٔ (۲۵)، سبب حذف کریدود کاندیدا می‌گردد، لذا به منظور جلوگیری از حبس شدن پاسخ در کمینه‌های محلی عددِ کوچکِ ε به مجموع جملات اضافه شده است.

با توجه به روابط (۲۲) و (۲۴) و با استفاده از قانون اجتماعِ چند فرآیند اتفاقی، احتمال انتخاب هر تعداد از مدار در یک کریدور مطابق رابطهٔ زیر تعریف می‌گردد:

$$p_{ij}^{n} = (p'_{ij})^{n} \Big/ \bigcup_{k \in \Omega_i} p'_{ik} \;,\; \forall i \in \Omega_{bus}, j \in \Omega_i \qquad (۲۶)$$

$$p'_{ij} = p_{1,ij} \times p_{2,ij} \Big/ \sum_{k \in \Omega_i} p_{1,ik} \times p_{2,ik} \qquad (۲۷)$$

که در رابطهٔ فوق، p_{ij}^{n} احتمال انتخاب n مدار در کریدور مابین شین‌های i و j است.

ت) مراحل کلی الگوریتم پیشنهادی

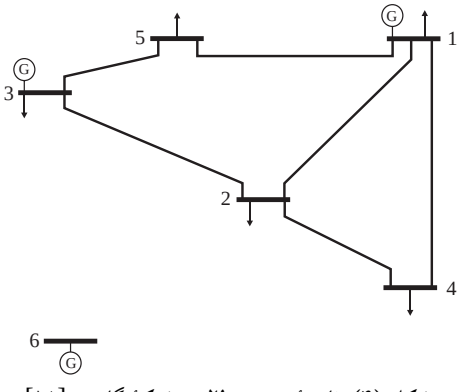
محدودسازی فضای حل مسأله و هدفمندسازی نحوهٔ انتخاب منابع غذایی در کلونی مصنوعی زنبور عسل به منظور حل مسألهٔ توسعهٔ شبکه انتقال با استفاده از ماتریس احتمالی با درایه‌های متناظر با رابطهٔ (۲۶) و مطابق گام‌های زیر انجام می‌گیرد:

گام ۱ گراف شبکهٔ انتقال با فرض تمامی کریدورهای موجود و کاندیدا تعیین می‌گردد؛

گام ۲ رابطهٔ (۲۶) برای هر یک از کریدورها محاسبه می‌گردد؛

گام ۳ ساختاری مشابه بخش (۴-۲) برای مسأله فرض گشته، پارامترهای الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل مطابق توضیحات ذکر شده، تعیین می‌گردند؛

گام ۴ کلیهٔ فرآیندهای کلونی مصنوعی زنبور عسل مطابق قبل انجام گرفته و زنبورهای کارگر، ناظر و دیده‌بان فعالیت‌های سابق خود را انجام می‌دهند؛ با این تفاوت که در کلیهٔ مراحل، احتمال انتخاب منابع غذایی جدید مطابق ماتریس پیشنهادی در رابطهٔ (۲۶) است.



شکل (۴): ناحیهٔ مورد مطالعه: شبکهٔ گارور [۱۸]

www.SID.ir

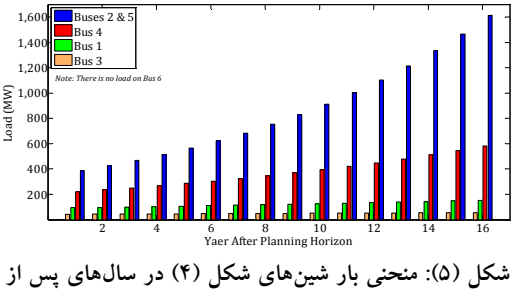
Archive of SID

۵- مطالعات عددی و نتایج

۵-۱- معرفی

به منظور استفاده از روش پیشنهادی برنامه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار *Matlab* نوشته شد. کاربر با ارائهٔ وضعیت شبکهٔ فعلی، کریدورهای کاندیدا (و یا ارئهٔ فایل *GIS* شبکه) و نیز وارد نمودن سایر اطلاعات فنی و اقتصادی، پاسخ مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال را در سال هدف مشاهده می‌نماید.

در این قسمت، مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال به منظور بررسی قابلیت مدل پیشنهادی برای شبکهٔ گارور و مطابق پارامترهای فرض شده در [۱۸-۱۷]بررسی شده است. شبکهٔ گارور در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق این شکل، شبکه مورد بررسی متشکل از شش شین بوده و در مطالعهٔ حاضر شین شمارهٔ ۶ به عنوان شین مرجع انتخاب شده است. بر اساس توضیحات ارائه‌شده در [۱۸-۱۷]، بزرگترین بار شبکه در شین شمارهٔ دو قرار داشته، با نرخ رشد سالیانه ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نرخ رشد بار در سال‌های پس از افق مورد مطالعه در سایر شین‌ها برابر با ۱۰ درصدِ نسبت بار آنها به بار شین دو است. در کنار این موارد، فرض‌شده است که تولید در باس‌های دارای ژنراتور متناسب با نرخ رشد بار سالیانه همان شین افزایش یابد. بر این اساس، برای یک افق طراحی پنجساله، منحنی بار درخواستی شین‌ها در سال‌های کفایت مطابق شکل (۵) است. رایانه استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها دارای اطلاعات فنی شامل، سی‌پی‌یو $\text{Centrino } 1.8^{\text{GHz}}$ و 1^{GB} رم است. نتایج حاصل از این مطالعات در قالب چندین سناریو، به همراه جزئیات، ارائه شده است.



شکل (۵): منحنی بار شین‌های شکل (۴) در سال‌های پس از افق طراحی

۵-۲- نتایج

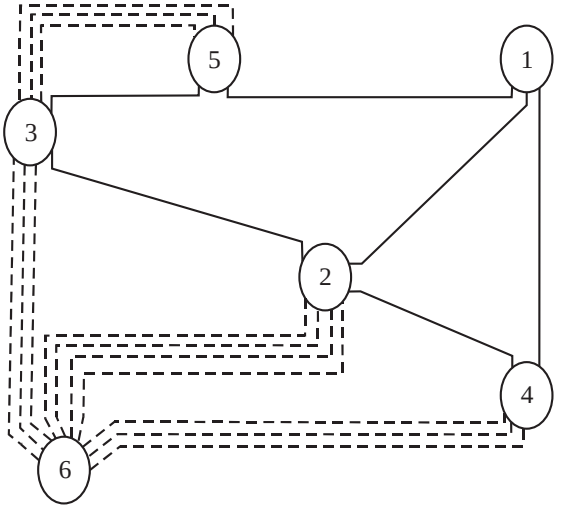
سناریوی اول: بررسی کیفیت الگوریتم پیشنهادی

در این سناریو، مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ گارور با در نظر گرفتن کفایت خطوط و مطابق تابع هدف ارائه‌شده در [۱۸-۱۷] بررسی می‌گردد. هدف یافتن طرح متناظر با بیشترین سال کفایت، در شرایطی است که حداکثر هزینهٔ صرف‌شده برای توسعهٔ شبکه برابر ۶۰ میلیون دلار باشد. مسأله با استفاده از کلونی مصنوعی زنبور عسل حل‌شده و اثر تابع احتمال ذکر شده در رابطهٔ (۲۶) نیز بررسی شده است. شایان ذکر است که مرجع [۱۷] از الگوریتم *DPSO* و مرجع [۱۸] از الگوریتم *IDPSO* استفاده کرده‌اند. الگوریتم *IDPSO* همان الگوریتم مهاجرت پرندگان است؛ با این تفاوت که به عملگر جهش الگوریتم ژنتیک مسلح‌شده است. کلیهٔ پارامترها مطابق مرجع [۱۸] انتخاب‌شده و نتایج حاصل از اجرای این برنامه‌ها مطابق جدول (۱) و شکل‌های (۶) تا (۷) است.

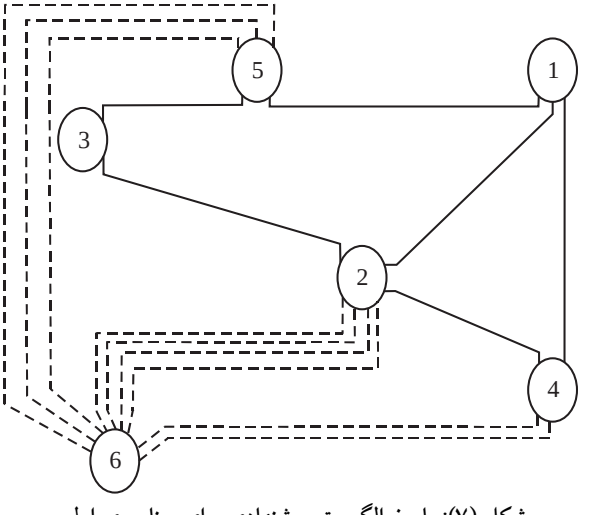
همان طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، در حالی که مرجع [۱۷] طرحی متناظر با ۱۲ سال کفایت را نتیجه گرفته است، الگوریتم *IDPSO* طرحی با هزینهٔ کمتر و با ۱۴ سال کفایت را پیشنهاد داده است. همان طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل قادر است بهترین پاسخ موجود تا کنون را کشف نماید. شکل (۶) پاسخ الگوریتم *IDPSO* را برای شبکهٔ مورد مطالعه نشان می‌دهد. از طرف دیگر، با اعمال تابع احتمال موجود در رابطهٔ (۲۶)، الگوریتم کلونی زنبورِ عسلِ مصنوعیِ اصلاح‌شده پاسخی به مراتب بهتر را نتیجه گرفته است. بر این اساس، طرح پیشنهادی با کاهش تقریباً ۱۰ درصدی هزینه، تعداد مشابهی از سال‌های کفایت را محاسبه نموده است. شکل (۷) پاسخ نهایی الگوریتم پیشنهادی و شکل (۸) میزان تولید ژنراتورها برای آرایش پیشنهادی را نشان می‌دهند. توجه به این نکته حائز اهمیت است که شین شمارهٔ ۶، شین مرجع بوده، مابقی توان مورد نیاز شبکه را تولید می‌نماید.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۶): پاسخ پیشنهادی مرجع [۱۸] برای سناریوی اول



شکل (۷): پاسخ الگوریتم پیشنهادی برای سناریوی اول

جدول (۱): پاسخ روش‌های مختلف برای سناریوی اول

روش مورد استفاده	هزینهٔ توسعه (میلیون دلار)	تعداد سال‌های کفایت
مرجع [۱۷] (*DPSO*)	۵۶/۸۲	۱۲
مرجع [۱۸] (*IDPSO*)	۵۵/۹۹	۱۴
کلونی مصنوعی زنبور عسل	۵۵/۹۹	۱۴
کلونی مصنوعی زنبور عسل اصلاح‌شده	۵۱/۸۳	۱۴

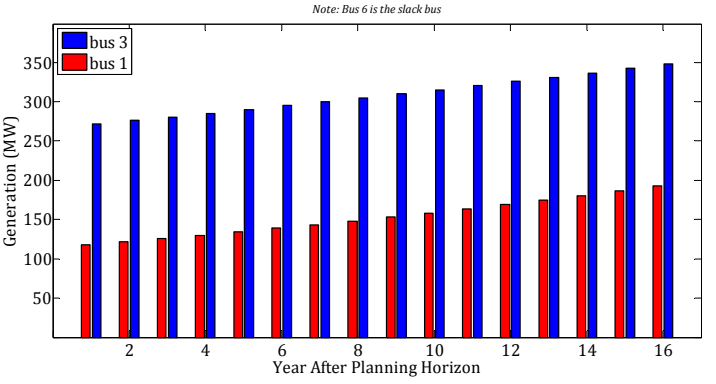
در کنار این موارد، نتایج پخش‌بار شبکهٔ پیشنهادی در آخرین سال کفایت و یک سال پس از آن در جدول (۲) گزارش شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در سال پانزدهم پس از افق طراحی، کریدور ۶-۲ قید حداکثر توان عبوری از کریدور را نقض کرده است؛ لذا، آرایش ارائه‌شده در شکل (۷) دارای ۱۴ سال کفایت است.

به منظور بررسی کیفیت پاسخ‌های راهکار پیشنهادی، برنامه‌های مربوط به روش‌های *DPSO* و *IDPSO* نیز نوشته‌شده و نتایج حاصل از ده بار اجرای مستقل آنها در جدول (۲) فهرست شده‌اند. علاوه بر این، روند همگرایی به پاسخ بهینه برای این الگوریتم‌ها در شکل (۹) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، کلونی مصنوعی

www.SID.ir

Archive of SID

زنبور عسل، نسبت به الگوریتم *IDPSO*، پاسخ‌های قابل قبولی را به دست آورده است. از طرفی، هدفمندسازی مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال به وسیلهٔ رابطهٔ (۲۶) پاسخ‌های با کیفیت و با ثبات بالاتری را نتیجه داده است.



شکل (۸): منحنی تولید شین‌های شکل (۷) در سال‌های کفایت

جدول (۲): نتایج پخش‌بار شبکهٔ شکل (۷) در آخرین سال کفایت و یک سال پس از آن

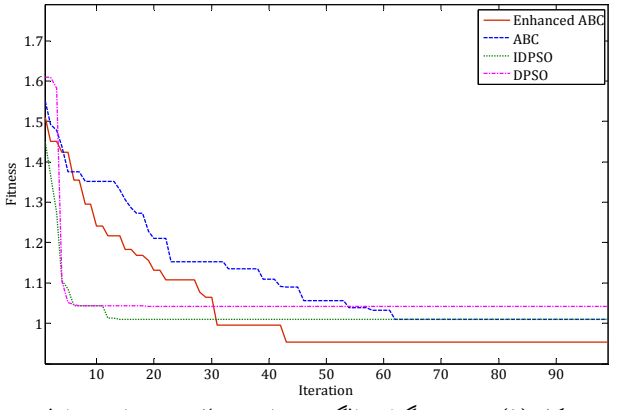
کریدور	ظرفیت کریدور	توان عبور از کریدور در سال ۱۴ پس از افق طراحی (MW)	توان عبور از کریدور در سال ۱۵ پس از افق طراحی (MW)
۱-۲	۴۰۰	-۱۱۱/۷	-۱۲۴/۱
۱-۴	۴۰۰	-۸۸/۹	-۱۰۲/۲
۱-۵	۸۰۰	۲۳۷/۹	۲۶۴/۹
۲-۳	۴۰۰	۳۷/۵	۵۴/۷
۲-۴	۴۰۰	-۱۹/۶	-۲۶/۶
۲-۶	۱۶۰۰	-۱۵۹۷/۴	**-۱۷۶۶/۸**
۳-۵	۴۰۰	۳۲۵	۳۴۷
۴-۶	۸۰۰	-۶۵۳/۹	۷۱۰/۶
۵-۶	۱۲۰۰	-۹۰۴/۹	-۱۰۰۲/۸

جدول (۳): بررسی کیفیت پاسخ‌ها در چندین بار تکرار الگوریتم

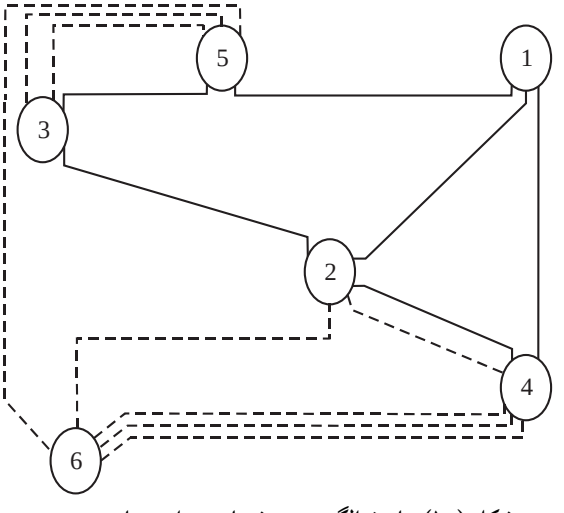
روش مورد استفاده	بهترین پاسخ		میانگین پاسخ‌ها		انحراف معیار	
	هزینه (میلیون دلار)	کفایت (سال)	هزینه (میلیون دلار)	کفایت (سال)	هزینه (میلیون دلار)	کفایت (سال)
DPSO	۵۶/۸۲	۱۲	۶۲/۵۷	۱۰/۹	۱/۴۰۱	۰/۳۸
IDPSO	۵۵/۹۹	۱۴	۵۷/۵۹	۱۳/۸	۱/۵۷۷	۰/۴۲
کلونی مصنوعی زنبور عسل	۵۵/۹۹	۱۴	۵۶/۶۸	۱۳/۹	۱/۴۸۶	۰/۳۶
کلونی مصنوعی زنبور عسل اصلاح‌شده	۵۱/۸۳	۱۴	۵۱/۸۳	۱۴	۰	۰

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۹): روند همگرایی الگوریتم‌های مختلف در سناریوی اول



شکل (۱۰): پاسخ الگوریتم پیشنهادی برای سناریوی دوم

جدول (۴): پاسخ روش‌های مختلف برای سناریوی دوم

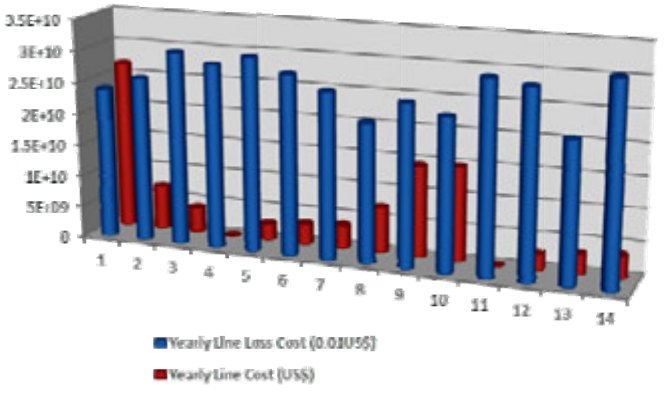
روش مورد استفاده	هزینهٔ توسعه (میلیون دلار)	تعداد سال‌های کفایت
مرجع [۱۷] (*DPSO*)	۴۳/۶۷	۴
مرجع [۱۸] (*IDPSO*)	۳۹/۹۲	۴
کلونی مصنوعی زنبور عسل اصلاح‌شده	۳۸/۱۳	۳

سناریوی دوم: توسعهٔ شبکهٔ انتقال با استفاده از رابطهٔ مرسوم

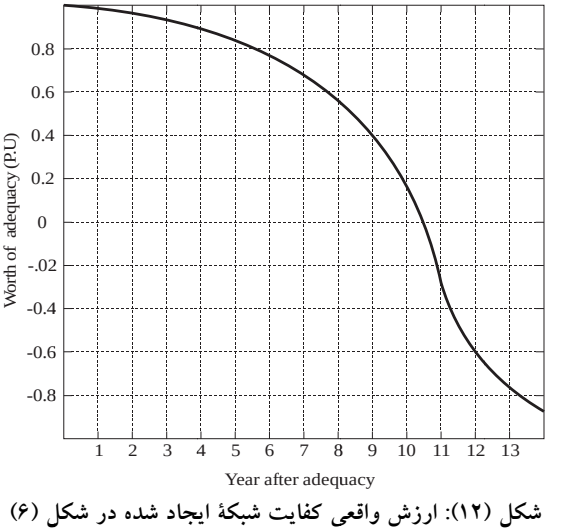
در این سناریو توسعهٔ شبکهٔ گارور با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها بررسی می‌گردد. بر این اساس، تابع هدف مسأله مطابق رابطهٔ (۱) تعریف و مقدار $benefit_{n_{adq}}^{ny}$ برای تمام حالات برابر صفر فرض شده است. هر یک از برنامه‌ها به صورت جداگانه ده مرتبه اجرا شده و بهترین نتیجهٔ حاصل‌شده برای این آزمون، در جدول (۴) و شکل (۱۰) قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می‌شود، طرحی کاملاً متفاوت ایجاد شده و تعداد سال‌های کفایت نیز اندک هستند. از طرف دیگر، اگر چه تعداد سال‌های کفایت در روش‌های مبتنی بر الگوریتم مهاجرت پرندگان بیشتر است، ولی الگوریتم پیشنهادی بهتر از سایر روش‌ها تابع هدف مسأله را کمینه کرده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۱۱): پاسخ توسعهٔ شبکهٔ انتقال پس از سال افق با روش پی‌درپی



شکل (۱۲): ارزش واقعی کفایت شبکهٔ ایجاد شده در شکل (۶)

سناریوی سوم: بررسی رویکرد پیشنهادی برای کفایت

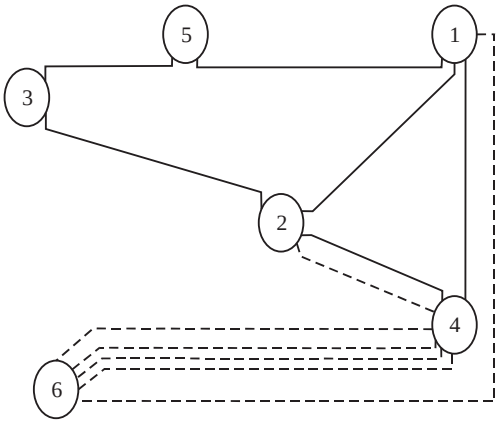
در این سناریو، اثر رویکرد پیشنهاد شده برای کفایت شبکهٔ انتقال بررسی شده است. بر این اساس، مسألهٔ بهینه‌سازی دوهدفهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال، شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی کفایت بررسی می‌شود. برای این منظور، ابتدا توسعهٔ شبکهٔ انتقال برای شبکهٔ مورد مطالعه مطابق سناریوی دوم انجام می‌گیرد. سپس با استفاده از روش پی‌درپی، شبکهٔ ایجاد شده در سال افق (شکل ۱۰) برای بازه‌های یک ساله توسعه یافته و اطلاعات کامل آنها، شامل هزینهٔ توسعه و هزینهٔ تلفات در سال بهره‌برداری، ذخیره می‌گردد. نتایج حاصل از این فرآیند مطابق شکل (۱۱) است. سپس، مسالهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال مورد مطالعه، با هدف بهینه‌سازی رابطهٔ (۱) انجام می‌گیرد. با تولید هر جمعیت، ارزش واقعی کفایت شبکهٔ پیشنهادی، مطابق رابطهٔ (۱۳) محاسبه می‌گردد. به منظور بررسی ارزش کفایت شبکه، طرح پیشنهاد شده توسط مرجع [۱۸] مطابق توضیحات ذکر شده، بررسی و ارزش سالیانهٔ کفایت آن نرمال‌سازی شده است. به منظور نرمال‌سازی تابع ذکر شده، اثر هزینهٔ اضافه‌شده بر شبکه تحت آزمون *logit* قرار گرفته است [۳۱]. شکل (۱۲) خروجی حاصل از این آزمون در نرم‌افزار *SPSS16* را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، اگر چه شبکهٔ مورد مطالعه برای ۱۴ سال دارای کفایت است، ولی انتقال انرژی الکتریکی از سال یازدهم به بعد بهینه نبوده و لذا ارزش کفایت در این سال‌ها منفی شده است. مطابق این شکل، ارزش کفایت ارائه شده در [۱۸-۱۷] دقیق نبوده، افزایش نامعقول تعداد سال‌های

www.SID.ir

Archive of SID

کفایت، تابع هدف مناسبی برای بهینه‌سازی مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال نیست.

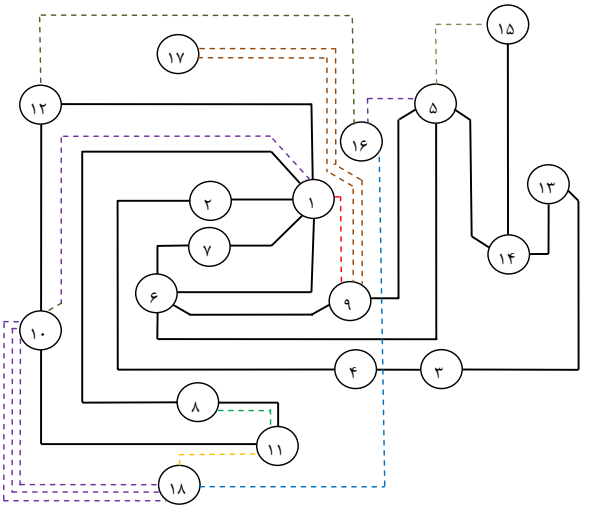
نتیجهٔ حاصل از اعمال راهکار پیشنهادی در دوهدفه‌سازی مسأله مطابق جدول (۵) و شکل (۱۳) است. همان طور که مشاهده می‌شود، رویکرد پیشنهادی ضمن بهینه‌سازی هزینه‌ها، تعداد سال‌های کفایت را به سطح متعادلی رسانده است. بر این اساس، طراحان مطمئن خواهند بود که در صورت مشابه‌بودن رشد بار مصرفی (با آنچه در مطالعه فرض‌شده) توسعهٔ بعدی شبکهٔ انتقال، نه یک سال پس از سال افق، بلکه یک سال پس از آخرین سال کفایت است. مطابق این تعریف، الگوی پیشنهادی در ضمنِ توسعهٔ شبکهٔ انتقال، بهترین زمان برای توسعهٔ مجدد شبکه را نیز محاسبه می‌نماید.



شکل (۱۳): توسعهٔ شبکهٔ گارور با استفاده از تابع هدف پیشنهادی

جدول (۵): اثر توابع هدف مختلف بر توسعهٔ شبکهٔ گارور

روش مورد استفاده	هزینهٔ توسعه (میلیون دلار)	تعداد سال‌های کفایت
کفایت ارائه‌شده در [۱۸-۱۷]	۵۱/۸۳	۱۴
کاهش هزینه	۳۸/۱۳	۳
رویکرد پیشنهادی	۴۴/۷۶	۸



شکل (۱۴): توسعهٔ شبکهٔ آذربایجان با استفاده از رویکرد پیشنهادی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۶): میزان تولید و مصرف شبکهٔ آذربایجان در سال ۱۳۹۵

شمارهٔ شین	نام پست	بار مصرفی (MW)	تولید (MW)	شمارهٔ شین	نام پست	بار مصرفی (MW)	تولید (MW)
۱	تبریز	۳۷۸	۷۱۵	۱۰	ارومیه	۱۳۴	۰
۲	سردرود	۲۰۲	۰	۱۱	میاندوآب	۱۲۵	۰
۳	میانه	۴۲	۰	۱۲	خوی	۲۵۶	۲۸۸
۴	تیکمه‌داش	۵۳	۰	۱۳	اردبیل	۷۸	۱۰۱
۵	اهر	۴۵	۰	۱۴	تقی‌دیزج	۴۶	۶۰
۶	شفا	۶۴	۰	۱۵	مغان	۴۵	۱۰۱
۷	آذر	۸۸	۰	۱۶	سونگون	۱۱	۰
۸	سهند	۴۹	۵۱۴	۱۷	جلفا	۱۴	۰
۹	نعمت‌آباد	۷۰	۰	۱۸	مهاباد	۷۹	۰

سناریوی چهارم: توسعهٔ شبکهٔ ۲۳۰^{kv} آذربایجان تا افق ۱۳۹۵

در این سناریو شبکهٔ ۲۳۰^{kv} واقعی آذربایجان تا افق ۱۳۹۵ طراحی شده است. در حالی که میزان تولید ژنراتورها و مصرف مشترکان در سال افق در جدول (۶) گزارش شده، آرایش شبکه در سال مبنا و سایر اطلاعات فنی و اقتصادی مطابق مرجع [۱۸] در نظر گرفته شده‌اند.

مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال با استفاده از الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل و مبتنی بر رویکرد کفایت پیشنهادی حل شده است. شکل (۱۴) آرایش بهینهٔ شبکه در سال افق را نشان می‌دهد. مدت‌زمان حل مسأله ۴/۳۱ ساعت و هزینهٔ متناظر با آرایش پیشنهادی ۸۹/۶۱۸ میلیون دلار است. شبکهٔ پیشنهادی محدودیت‌های پخش توان را تا سال ۱۴۰۴ رعایت نموده، لذا دارای ۹ سال کفایت است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسألهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال با رویکردی جدید بر کفایت خطوط بررسی شد. بدین منظور، تعریف جدیدی برای کفایت شبکه ارائه و ارزش واقعی کفایت برای هر یک از سال‌های مورد مطالعه، فرمول‌بندی شد. سپس توسعهٔ شبکهٔ انتقال با یک معیار دوهدفه، به منظور کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی تعداد سال‌های کفایت، در قالب یک مسألهٔ بهینه‌سازی شد. الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل تشریح و به نحو شایسته‌ای به مسأله تلفیق شد. از طرف دیگر، با ارائهٔ یک تابع احتمال، مبتنی بر شرایط توأم جغرافیایی و الکتریکی شبکهٔ مورد مطالعه، الگوریتم بهینه‌سازی، اصلاح و هدفمند گردید. در پایان، نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی در قالب چندین سناریو بررسی و کیفیت الگوریتم و نیز صحت رویکرد پیشنهادی نشان داده شد. همان طور که مشاهده شد، راهکار پیشنهادی علاوه بر توسعهٔ شبکهٔ انتقال، بهترین زمان برای توسعهٔ آتی شبکه را نیز اعلام می‌نماید. با توجه به تلفیق راهکار پیشنهادی با سیستم اطلاعات جغرافیایی و نتایج عملی حاصل شده، راهکار پیشنهادی قیود فنی مسأله و اقتضائات مهندسی را رعایت نموده، قابل استفاده در توسعهٔ شبکه‌های انتقال واقعی و با مقیاس بزرگ است.

مراجع

[1] S. Jalilzadeh, A. Kazemi, H. Shayeghi, M. Madavi, "Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA," *Energy Convers Manage*., vol. 19, pp. 1119-1125, 2008.

[2] M. Mahdavi, H. Shayeghi, A. Kazemi, "DCGA based evaluating role of bundle lines in TNEP considering expansion of substations from voltage level point of view," *Energy Convers Manage*., vol. 50, pp. 2067-2073, 2009.

[3] J. HyungRoh, M. Shahidehpour, L. Wu, "Market-Based generation and transmission planning with uncertainties," *IEEE Trans. on Power Syst.* vol. 24, pp. 1587-1598, 2009.

[4] H. Yu, C.Y. Chung, K.P. Wong, J.H. Zhang, "A chance constrained transmission network expansion planning method with

www.SID.ir

Archive of SID

consideration of load and wind farm uncertainties, *IEEE Trans. on Power Syst*., vol. 24, pp. 1567-1576, 2009.

[5] S. Binato, M.V.F. Periera, S. A. Granville, "New benders decomposition approach to solve power transmission network design problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 235-240, 2001.

[6] T. Al-Saba, I. El-Amin, "The application of artificial intelligent tools to the transmission expansion problem," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 62, no. 2, pp. 117-126, 2002.

[7] E.L. Silva, H.A. Gil, J.M. Areiza, "Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm," *IEEE Trans. On power systems*, vol. 15, no. 3, pp. 560-565, August 2001.

[8] R.A. Gallego, R. Romero, A. J. Monticelli, "Tabu search algorithm for network synthesis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 490-495, 2000.

[9] R. Romero, R.A. Gallego, A. Monticelli, "Transmission system expansion planning by simulated annealing," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 364-369, 1996.

[10] H. Samarakoon, R. M. Shrestha, O. A. Fujiwara, "Mixed integer linear programming model for transmission expansion planning with generation location selection," *Elect. Power Energy Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 285-293, 2001.

[11] G. Liu, H. Sasaki, N. Yorino, "Application of network topology to long range composite expansion planning of generation and transmission lines," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 57, no. 3, pp. 157-162, 2001.

[12] N. Alguacil, A.L. Motto, A.J. Conejo, "Transmission expansion planning: a mixed integer LP approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3)\, pp. 1070-1077, 2003.

[13] S. Jalilzadeh, H. Shayeghi, H. Hadadian, "Integrating generation and transmission networks reliability for unit commitment solution", *Energy Convers Manage.,* vol. 50, pp. 777-785, 2009.

[14] J. Yen, Y. Yan, J.M. Contrera, F. F. Wu, "Multi-agent approach to the planning of power transmission expansion," *Decis. Supp. Syst*., vol. 28, no. 3, pp. 279-290, 2000.

[15] H. Shayeghi, M. Mahdavi, "Optimization of transmission lines loading in TNEP decimal codification based GA," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 234-239, 2008.

[16] N. H. HSohtaoglu, "The effect of economic parameters on power transmission planning,"

IEEE Trans. Power Syst., vol. 13, pp. 941-945, 1998.

[17] H. Shayeghi, M. Mahdavi, A. Bagheri, "Discrete PSO algorithm based optimization of transmission lines loading in TNEP problem," *Energy Convers Manage*., vol. 51, no. 48, pp. 112–21, 2010.

[18] H. Shayeghi, M. Mahdavi, A. Bagheri, "An improved DPSO with mutation based on similarity algorithm for optimization of transmission lines loading," *Energy Convers Manage.*, vol. 51, no. 12, pp. 2715–2723, 2010.

[19] S. Jalilzadeh, H. Shayeghi, H. Hadadian, "Integrating generation and transmission networks reliability for unit commitment solution", *Energy Convers Manage*., vol. 50, pp. 777-785, 2009.

[20] M.O. Buygi, G. Balzer, H.M. Shanechi, M. Shahidehpour, "Market-based transmission expansion planning," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 19, no.4, pp. 2060-2067, Nov. 2004.

[21] R. Fang and D. J. Hill, "A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 374-380, 2003.

[۲۲] سعید جلیل‌زاده، حسین حدادیان، میثم مهدوی، هادی حسینیان و سجاد گلوانی، "برنامه‌ریزی شبکهٔ انتقال در جهت بهینه نمودن کفایت خطوط با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۶.

[23] D.E. Kieso, J.J. Weygandt, T.D. Warfield, *Intermediate Accounting*, John Wiley & Sons, 2009, ch. 11.

[24] T. Gonen, I.J. Ramirez-Rosado, "Review of distribution system planning models: a model for optimal multistage planning," *IEE PROCEED-INGS*, vol. 133, no. 7, pp. 397-408, 1986.

[25] I.D. Coope, "Circle fitting by linear and nonlinear least squares," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 76, no. 2, New York: Plenum Press, Feb. 1993.

[26] N. Meade and T. Islam, "Prediction Intervals for Growth Curve Forecasts," *Journal of Forecasting*, vol. 14, pp. 413–430, 1995.

[27] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," *Technical Report TR06, Engineering Faculty, Computer Engineering Department*, 2005.

[28] D. Karaboga, B. Akay, "A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 214, pp. 108-132, 2009.

www.SID.ir

Archive of SID

[29] G.E. Tsekouras and H. Sarimveis, "A new approach for measuring the validity of the fuzzy C-means algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 35, pp. 567–575, 2004.

[30] F.B. Zhan, C.E. Noon, "Shortest path algorithms: an evaluation using real road networks," *Transportation Science*, vol. 32, no. 1, pp. 65-73, Feb 1998.

[31] A.D. Winifred, "The Logit Transformation: with special reference to its uses in Bioassay," *Griffin's Statistical Monographs & Courses*, 1972.

علائم و نشانه‌ها

مجموعه‌ها:

Ω_{sel}^{cor} مجموعهٔ کریدورهای انتخاب شده؛

Ω_{exi}^{cor} مجموعهٔ کریدورهای موجود؛

Ω_{new}^{cor} مجموعهٔ کریدورهای جدید؛

Ω_{bus} مجموعهٔ شین‌های شبکه؛

$\Omega_{S,G}$ مجموعهٔ شین‌های تولیدی؛

$\Omega_{S,D}$ مجموعهٔ شین‌های مصرفی؛

Ω_{i} مجموعهٔ شین‌های مجاور شین iام؛

$\Omega_{C^{adj}}$ مجموعهٔ هزینهٔ احداث یک مدار کامل بر روی هر یک از کریدورهای شبکه (موجود و یا کاندیدا)؛

ثابت‌ها:

C_{total} هزینهٔ کل طرح (بر حسب واحد پول)؛

C_{line} هزینهٔ احداث خطوط (بر حسب km /واحد پول)؛

C_{loss} هزینهٔ تلفات انرژی (بر حسب MWh / واحد پول)؛

$C_{cor,i}^{maint}$ هزینهٔ سالانهٔ تعمیر و نگهداری کریدور i (بر حسب واحد پول)؛

C_{max}^{const} حداکثر هزینهٔ سرمایه‌گذاری شبکه (بر حسب واحد پول)؛

C_{max}^{maint} حداکثر هزینهٔ تعمیرات در دورهٔ مطالعه (بر حسب واحد پول)؛

$n_{exi,i}^{cor}$ تعداد مدارهای موجود در کریدور i؛

$n_{max,i}^{cor}$ حداکثر تعداد مدارهای کریدور i؛

w_i ارزش ریالی کریدور موجود i (بر حسب واحد پول)؛

δ_i ضریب ارزش اسقاطی کریدور i (بر حسب واحد پول)؛

$n_{ul,i}$ عمر مفید کریدور i (بر حسب سال)؛

d_i طول کریدور i (بر حسب km)؛

r_i مقاومت کریدور i (بر حسب Ω/km)؛

I_i جریان گذرنده از کریدور i (آمپر)؛

$P_{\max,i}$ حداکثر توان گذرنده از هر یک از مدارهای کریدور i (بر حسب MW)؛

LSF ضریب تلفات؛

$Infr$ نرخ تورم سالیانه؛

$Intr$ نرخ بهره سالیانه؛

ny طول دورهٔ مطالعه (بر حسب سال)؛

CF ضریب تبدیل هزینهٔ جاری به ارزش کنونی؛

SN تعداد زنبورهای ناظر و کارگر در کلونی مصنوعی زنبور عسل؛

$P_{D,k}$ میزان بار مصرفی در شین iام؛

k_{dep} ضریب استهلاک متوسط کریدورها؛

C_{ij}^{adj} هزینهٔ احداث یک مدار کامل بر روی کریدور مابین شین‌های i و j؛

تابع‌ها:

$k_{dep,ij}$ ضریب استهلاک کریدور i در سال j؛

P_i توان گذرنده از کریدور i (بر حسب MW)؛

$P_{G,k}$ میزان توان تولیدی در شین iام،

$\mathbf{V}_g$ بردار تولید انرژی الکتریکی شبکه؛

$\mathbf{V}_{g,max}$ بردار حداکثر تولید انرژی الکتریکی در شبکه؛

u_{ik} میزان تعلق دادهٔ kام به خوشهٔ iام در خوشه‌یابی فازی به روش c-میانگین؛

C_i^j هزینهٔ توسعهٔ شبکهٔ انتقال از سال i تا سال j (بر حسب واحد پول)؛

w_{ij} ارزش ریالی کریدور موجود بین شین‌های i و j؛

$\xi_{oper,j}^i$ هزینهٔ تلفات شبکهٔ انتقال طراحی‌شده برای سال افق i در سال j (بر حسب واحد پول)؛

www.SID.ir

Archive of SID

متغیرها:

β_{ij} متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهندهٔ وجود یا عدم کریدور احداث شده بین شین‌های i و j؛

$n_{new,i}^{cor}$ تعداد مدارهای جدید در کریدور i؛

n_{adq} تعداد سال‌های کفایت شبکه انتقال؛

$\mathbf{M}_I$ ماتریس تلاقی گره با شاخه شبکهٔ انتقال؛

$\mathbf{M}_p$ ماتریس توان‌های جاری‌شده در کریدورها؛

$\mathbf{V}_d$ بردار مصرف انرژی الکتریکی در شبکه؛

g_i عکس راکتانس کریدور i؛

$\Delta\theta_i$ اختلاف زاویه توان در شین‌های ابتدا و انتهای کریدور i؛

p_{ij}^n احتمال انتخاب n مدار در کریدور مابین شین‌های i و j؛

www.SID.ir