

## ارائه مدل برنامه‌ریزی توسعه پایدار نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریسیته

میلاذ رحیمی مقدم<sup>۱</sup>، احمد اصل حداد<sup>۲</sup>، رضا رمضانیان<sup>۳</sup>

۱. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲. استادیار مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳. دانشیار مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۷/۰۳/۰۶، تاریخ تصویب: ۹۷/۰۵/۱۰)

### چکیده

در این مقاله مدل ریاضی جدید برای توسعه نیروگاه‌های انرژی الکتریسیته ارائه شده است که از نظر برنامه‌ریزی در گروه برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در ادبیات خود محسوب می‌شود، اما گام‌های مسئله به صورت ماهانه است. در نظر گرفتن محدودیت‌های نرم و سخت در کنار یکدیگر و متناسب با مفهوم مدل در دنیای واقعی، از دیگر ویژگی‌های مدل مذکور است. همچنین باید تقسیم‌بندی نیروگاه‌ها بر اساس مناطق احداث آن‌ها را نیز به دیگر ویژگی‌های مدل افزود. در ادامه حل دقیق مدل در ابعاد کوچک به کمک نرم‌افزار گمز صورت گرفته و به دلیل پیچیدگی مسئله، الگوریتم‌های فرابتکاری ژنتیک و بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری مطرح شده است. تنظیم پارامتر الگوریتم ژنتیک نیز با استفاده از روش RSM انجام شده و سپس ۲۲ سری مثال عددی با هریک از این دو الگوریتم حل شده است. نتایج نیز با یکدیگر مقایسه شده‌اند که نشان‌دهنده برتری الگوریتم ژنتیک هستند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری، الگوریتم ژنتیک، انرژی الکتریسیته، توسعه نیروگاه‌های انرژی الکتریسیته.

### مقدمه

از زمانی که صنعت انرژی الکتریکی با ژنراتوری کم‌قدرت برای برق‌رسانی منطقه‌ای محدود آغاز به کار کرده است، تا امروز که با شبکه‌های درهم‌تنیده مسئولیت تأمین تقاضای بار ایالت‌ها و کشورهای مختلف را بر عهده دارد، شبکه تولید و انتقال برق پیشرفت چشمگیری داشته است. کاربرد گسترده انرژی الکتریکی مؤلفه‌ای مهم در توسعه و پیشرفت جامعه مدرن محسوب می‌شود که سبب شده است نهادهای مرتبط با تأمین انرژی و شرکت‌های برق توجه خود را به تأمین نیاز مصرف‌کنندگان و سرویس‌دهی به آن‌ها معطوف کنند. تولیدکنندگان انرژی الکتریکی در زمینه تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی صورت داده‌اند [۱].

بیش از ۴۰ سال است که مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP) در جامعه صنعت برق مطرح شده است. با حل مسائل GEP طراح تصمیم می‌گیرد که چه نوع از نیروگاه‌هایی را در کدام مکان و زمان و با چه ظرفیتی و تحت چه شرایطی بسازد [۲]. از دیدگاه مدل‌سازی ریاضی،

مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، مسئله بهینه‌سازی با طبیعتی غیرخطی، پویا، مقید، دارای متغیرهای گسسته و ابعاد بالاست [۳]؛ البته مسائل GEP تغییرات فراوانی در طول زمان داشته است که یکی از فاکتورهای مهم آن انتقال از سیستم‌های سنتی تولید الکتریسیته به شبکه‌های فناوری است؛ البته مطابق با مقاله [۴] می‌توان مسائل GEP را از پنج فاکتور متأثر دانست که به ترتیب اهمیت و توجه عبارت‌اند از:

- آزادسازی ساختار بازار الکتریسیته؛
- تغییرات آب و هوایی و مسئله حفاظت از محیط‌زیست؛
- شبکه‌بندی و تحول فناوری‌ها؛
- سیاست‌های انرژی سبز؛
- مدل‌سازی و روش‌های حل.

آزادسازی ساختار بازار الکتریسیته شامل انتقال این ساختار از مقرراتی به نیمه‌مقرراتی و از نیمه‌مقرراتی به بازار آزاد است. هرچه ساختار بازار آزادتر باشد، رقابت بیشتر می‌شود و تابع هدف از کمینه‌کردن هزینه‌ها به

۳. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به منظور کاهش آلودگی [۱۶، ۱۷، ۱۲، ۲، ۵].

در مبحث شبکه‌بندی، درباره سرمایه‌گذاری در دو دسته از نیروگاه‌ها می‌شود: نیروگاه‌هایی با منابع تجدیدپذیر [۱۸] و نیروگاه‌های کوچک با منابع تجدیدناپذیر [۱۹]. باید توجه داشت که این رویکرد در تقابل با رویکرد تفکیک مسائل GEP و TEP قرار دارد.

اقتصاد سبز مبحثی جدید در مسائل GEP است. در بسیاری از مطالعات، سرمایه‌گذاری در منابع تجدیدپذیر (RES) راهبردی مؤثر برای کاهش وابستگی به سوخت‌های تجدیدناپذیر و افزایش دسترسی به منابع پایدار معرفی شده است [۲، ۲۰، ۶]. با وجود این، هزینه سرمایه‌گذاری بالا، تناوب، عدم قطعیت و بازگشت سرمایه بلندمدت از مهم‌ترین دلایل کمبود توجه به RES در صنعت انرژی است؛ بنابراین به منظور افزایش جذابیت این راهبرد، از راهکارهایی شامل مکانیسم FIT، تعیین سهمیه، سیستم ETS و مالیات کربن استفاده می‌شود [۴].

آخرین فاکتور به مدل‌سازی و روش حل مدل مربوط می‌شود. مسائل GEP به دلایل زیر جزء مسائل پیچیده به‌شمار می‌آیند [۴]:

- ماهیت گسسته برخی متغیرها مانند اندازه نیروگاه و تخصیص؛
  - وجود برخی محدودیت‌های غیرخطی؛
  - ابعاد بزرگ مسئله و ماهیت بلندمدت بودن برنامه‌ریزی؛
  - عدم قطعیت در مواردی مانند تقاضا و قیمت سوخت.
- مدل‌های موجود در ادبیات مسائل GEP، تقسیم‌بندی‌های متفاوتی دارند. ماهیت واقعی اهداف مسائل انرژی سرشار از تضادهاست که این موضوع بیش‌ازپیش بر پیچیدگی مسائل GEP می‌افزاید. مدل‌ها به دو دسته تک‌هدفه و چندهدفه تقسیم می‌شوند که مدل‌های تک‌هدفه معمولاً به دو صورت کمینه‌سازی سوخت و بیشینه‌سازی سود مطرح می‌شوند [۲، ۲۱، ۱۹، ۲۲].

مانند بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری در جهان واقعی، تصمیم‌گیری در مسائل GEP به فاکتورهای گوناگونی وابسته است؛ از این‌رو برای مدل‌سازی بهتر مسائل GEP مدل‌سازی تصمیم‌گیری چندمعیاره کاربرد دارد. مدل‌سازی

بیشینه‌کردن سود تغییر می‌یابد؛ برای مثال محققان در تحقیق [۵] ساختار مقرراتی و متمرکز را در مدل خود استفاده کرده‌اند. در این مقاله، مدل با تابع چندهدفه استفاده شده است که میزان آلاینده‌های تولیدشده نیز از جمله این اهداف به‌شمار می‌آید. در نهایت نیز حل مدل MINLP با نرم‌افزار GAMS صورت گرفت. در نقطه مقابل علی‌شاهی و همکاران مدل تک‌هدفه‌ای را با استفاده از برنامه‌ریزی پویا معرفی کردند که ساختاری کاملاً آزاد و غیرمتمرکز دارد [۶]. همچنین ساختارهای نیمه‌متمرکز نیز حالتی میان آزاد و متمرکز هستند. پژوهش‌کنان و همکاران و شایقی و همکاران نمونه‌هایی از مقالات با ساختار نیمه‌مقرراتی هستند.

فاکتور دوم، تغییرات آب و هوایی و مسئله حفاظت از محیط‌زیست است. اثرات سوئی که گازهای گلخانه‌ای بر سلامت بشر، محیط‌زیست و از همه مهم‌تر گرم‌شدن کره‌زمین و تغییرات آب و هوایی دارند، موجب شده است تا در مسائل GEP از مقررات زیست‌محیطی استفاده شود. این ایجاد مقررات در کنار برنامه‌ریزی با عنوان توسعه پایدار در سطوح ملی و بین‌المللی مطرح می‌شود [۴].

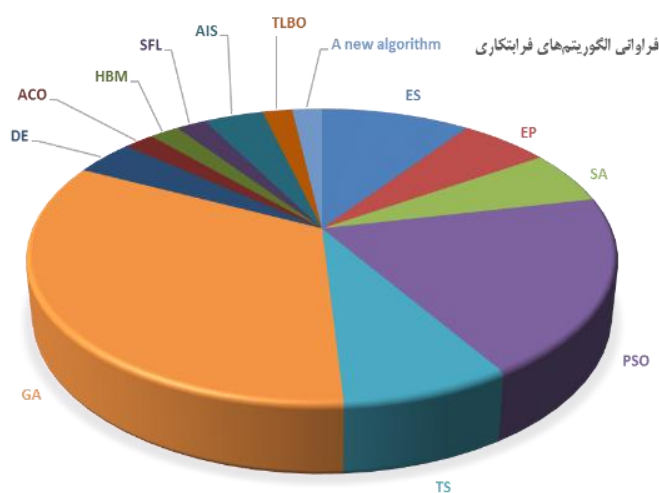
امروزه در بحث سیاست‌های کلان، سرمایه‌گذاران به نصب انرژی‌های تجدیدپذیر تشویق می‌شوند. همچنین در قوانین آژانس حفاظت از محیط‌زیست، رویکردهایی برای محدودکردن گازهای گلخانه‌ای، گاز کربن و گاز اکسید نیتروژن ارائه کرده است. راهکارهای گوناگونی از جمله استفاده از محدودیت‌های آلاینده‌ها، حبس و ذخیره کربن و استفاده از فناوری‌های جدید برای تولید آلاینده کمتر مطرح شده است. فناوری‌های جدید و مدرن مانند فناوری‌های هسته‌ای و بادی به‌هیچ‌عنوان آلودگی ایجاد نمی‌کنند، اما فناوری‌های قدیمی‌تر مانند توربین‌های گازی و سوخت فسیلی آلودگی‌های زیادی مانند اکسیدکربن و اکسید نیتروژن را در هوای اطراف رها می‌کنند.

به‌طورکلی، آلودگی در برنامه توسعه تولید و مدل‌بندی آن در برنامه‌ریزی‌های گوناگون از زوایای متفاوتی در نظر گرفته می‌شود که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. به‌صورت قید یا محدودیت [۹، ۱۴، ۱۲]؛
۲. به‌صورت هزینه یا مقدار در تابع هدف [۱۳، ۱۴، ۱۵]؛

مرتبط با موضوع شامل روش‌های حل ریاضی کلاسیک، رویکردهای فرابتکاری و استفاده از نرم‌افزارهای تجاری است. در روش‌های حل ریاضی کلاسیک می‌توان به مواردی نظیر برنامه‌ریزی پویا [۲۰-۲۱]، شاخه و حد [۲۵-۲۶] و تجزیه بندز عمومی [۲۱-۲۲] اشاره کرد. راه‌حل دیگر استفاده از الگوریتم‌های فرابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی است. این الگوریتم‌ها به صورت مقایسه‌ای یا به صورت ترکیبی استفاده می‌شوند. در شکل ۱، فراوانی و میزان استفاده از این الگوریتم‌ها در ادبیات موضوع آمده است. براین اساس، الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات بیشترین کاربرد را در میان مقالات داشته‌اند [۴].

MCDM به دو دسته تصمیم‌گیری چندهدفه و تصمیم‌گیری چندمشخصه تقسیم می‌شود. بزرگ‌ترین تفاوت این دو روش در فضای جواب شدنی است. در مدل‌سازی چندهدفه فضای جواب پیوسته، اما فضای جواب تصمیم‌گیری چندمشخصه، گسسته و محدود است [۲۳]. افزون بر این، مدل‌ها از نظر خطی یا غیرخطی بودن قابل دسته‌بندی هستند. معمولاً در مسائل بهینه‌سازی سعی می‌شود با استفاده از تقریب‌های موجه، مدل خطی شود [۲۳-۲۴]. همچنین مدل‌ها به دو دسته قطعی و غیرقطعی نیز تقسیم می‌شوند. براساس مطالعات، روش‌های حل استفاده‌شده در مقالات



شکل ۱. فراوانی الگوریتم‌های فرابتکاری در مسائل GEP

می‌شود. در این مقاله با صرف نظر کردن از هزینه‌های آلودگی و بازنشستگی واحدهای تولیدی، تابع هدف به صورت کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و بهره‌برداری نوع سوخت و انرژی تأمین‌نشده با توجه به ارزش بازیافتی هزینه‌های سرمایه‌گذاری مدنظر قرار گرفته است. برای محاسبه انرژی خروجی واحدهای تولیدی و شاخص‌های قابلیت اطمینان، یکی از روش‌های شبیه‌سازی احتمالاتی تولید به نام روش تابع انرژی معادل کاربرد دارد. براساس پژوهش حاضر، در برخی مقالات به تفکیک مناطق، توجه به بازسازی در نیروگاه‌های موجود و برنامه‌ریزی با گام‌های ماهانه پرداخته شده است که هیچ‌یک از آن‌ها نیز برخلاف مطالعه حاضر، به صورت یکجا به همه این مسائل توجه نکرده‌اند.

استفاده از نرم‌افزارهای تجاری راه‌حل دیگری در مسائل GEP است. نرم‌افزارهایی مانند LEAP، WASP و COYOZ [۱۵] در حل مسائل GEP استفاده می‌شوند، اما پرکاربردترین این نرم‌افزارها، GAMS است که دامنه وسیع‌تری از مدل‌ها را حل می‌کند [۴]. در بسیاری از مقالات، از این نرم‌افزار برای حل مسائل GEP استفاده شده است [۵، ۹، ۲۷].

هدف از حل مسئله GEP تعیین طرح توسعه تولید با کمترین هزینه است؛ به گونه‌ای که بتوان تقاضای بار پیش‌بینی‌شده را در عین برآوردن معیارهای قابلیت اطمینان و قیود فنی و اقتصادی گوناگون تأمین کرد. مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید به صورت بهینه‌سازی گسسته، غیرخطی و مقید به مجموعه‌ای از قیود مدل

## تعریف مسئله

هدف از حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، تعیین طرح این توسعه با کمترین هزینه است؛ به گونه‌ای که بتوان تقاضای بار پیش‌بینی شده را در عین برآوردن معیارهای قابلیت اطمینان و قیود فنی و اقتصادی گوناگون تأمین کرد. مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید به صورت مسئله بهینه‌سازی گسسته، غیرخطی و مقید به مجموعه‌ای از قیود مدل می‌شود. تولیدکنندگان انرژی الکتریکی در زمینه تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی سرمایه‌گذاری‌های فراوانی انجام داده‌اند [۲۸].

در این مقاله، مدل‌سازی جدید برای مسئله GEP ارائه شده است که در آن هدف، کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی، تولید آلاینده مضاعف و تأمین کردن یا نکردن انرژی تقاضا شده است. تقسیم‌بندی منطقه‌ای و تفکیک نیروگاه‌ها براساس نوع فناوری به کاررفته در آن‌ها از جمله مواردی است که در این مدل بررسی شده است. همچنین رویکرد بازسازی نیروگاه‌ها نیز از جمله موارد نادر در این مدل محسوب می‌شود. در این میان، در نظر گرفتن تقاضا در سطوح مختلف و برنامه‌ریزی برای تأمین انرژی از مواردی است که در بیشتر مقالات ادبیات این موضوع به آن توجهی نشده است.

به دنبال افزایش نگرانی‌ها درباره تغییرات زیست‌محیطی در جهان، برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در انرژی نیز به سوی رویکردی پایدار رفته است. با توجه به چندین پژوهش با رویکردها و دیدگاه‌های گوناگون، در حال حاضر مدل‌های انرژی در جهان به ویژه در کشورهای توسعه‌یافته، هنوز ساختاری ناپایدار در حوزه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارند. مفهوم توسعه پایدار براساس درهم‌تنیده بودن توسعه در ابعاد اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی است. درحقیقت، توسعه پایدار به درک ارتباط و برهم‌کنش این سه بعد پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) وابسته است [۲۹]. در این پژوهش با صرف نظر کردن از هزینه‌های آلودگی و بازنشستگی واحدهای تولیدی تابع هدف به صورت کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات، بهره‌برداری و انرژی تأمین نشده با توجه به نگاهی آرمانی

به توسعه بخش انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید کمتر آلاینده‌ها در نظر گرفته می‌شود.

به طور کلی، اصلی‌ترین نوآوری‌های ارائه شده در این مقاله عبارت است از:

- تفکیک کل منطقه برنامه‌ریزی به مناطق مختلف جغرافیایی از نظر شرایط محیطی؛
- رویکرد بازسازی نیروگاه‌ها؛
- در نظر گرفتن تقاضا در سطوح مختلف؛
- رویکرد پایدار در برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌های انرژی.

در این مدل، در ابتدای سال برنامه‌ریزی برای تعدادی نیروگاه و برخی مکان‌های بالقوه (دارای پتانسیل) برای احداث نیروگاه وجود دارد. همچنین براساس هزینه‌های گوناگون و سایر محدودیت‌ها تصمیم‌گیری می‌شود که کدام یک از نیروگاه‌های موجود بازسازی و کدام یک از نیروگاه‌ها تأسیس شوند. درباره میزان تولید هر یک از نیروگاه‌های فعال نیز تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد.

## اندیس‌ها و مجموعه‌های مسئله

$i$	: اندیس (مجموعه) نیروگاه‌ها
$h(I^{hyd})$	: اندیس (مجموعه) نیروگاه‌های آبی
$I^{RES}$	: اندیس (مجموعه) نیروگاه‌های تجدیدپذیر ( $I^{hyd} \subseteq I^{RES}$ )
$m$	: اندیس (مجموعه) ماه‌ها
$j$	: اندیس (مجموعه) سطوح بار مصرفی
$y(Y)$	: اندیس (مجموعه) سال
$S_i$	: اندیس (مجموعه) نوع نیروگاه
$b(B)$	: اندیس (مجموعه) باس‌های موجود در شبکه
$I^{old}$	: اندیس (مجموعه) نیروگاه‌هایی که در ابتدای برنامه‌ریزی فعال بوده‌اند.
$I^{new}$	: اندیس (مجموعه) نیروگاه‌هایی که کاندید اضافه‌شدن به شبکه تأمین نیرو هستند.

## پارامترهای مسئله

$T_i^{life}$	: کل دوره عمر نیروگاه $i$
$T_i^{ini}$	: میزان عمر از زمان تأسیس نیروگاه $i$ در ابتدای دوره برنامه‌ریزی

<b>متغیرهای تصمیم</b>		کل افق برنامه‌ریزی	$Y$
$Z$ : تابع هدف		نرخ اسمی تنزیل	$DR$
متغیر حالت تأسیس نیروگاه $i$ در سال $y$	$u_i^y$	طول زمانی سطح بار مصرفی $j$ در ماه $m$ از سال $y$	$dur^{ymj}$
متغیر تصمیم بازسازی نیروگاه $i$ در سال $y$	$x_i^y$	مقدار بار مصرفی $j$ در ماه $m$ از سال $y$	$L^{ymj}$
متغیر تصمیم تأسیس نیروگاه $i$ در سال $y$	$w_i^y$	هزینه عملیاتی نیروگاه‌های نوع $s$ در باس $b$ در سال $y$ جهت تولید یک واحد از نیرو	$OC_{sb}^y$
میزان انرژی خروجی واحد $i$ در ماه $m$ از سال $y$ در سطح بار $j$ (مگاوات)	$P_i^{ymj}$	هزینه عملیاتی نیروگاه‌های نوع $s$ در باس $b$ در سال $y$ جهت تولید یک واحد از نیرو پس از بازسازی	$ocr_{sb}^y$
میزان بار سرویس داده‌نشده در سطح باری $j$ در ماه $m$ در سال $y$ (مگاوات)	$NS^{ymj}$	ظرفیت تولیدی نیروگاه $i$ (مگاوات)	$P_i^{\max}$
هزینه‌های عملیاتی ساعتی واحد $i$ شامل هزینه‌های عملیاتی، نگهداری و تعمیرات، در طول سال $y$ با در نظر گرفتن تورم	$OC_i^{ymj}$	ظرفیت تولیدی نیروگاه $i$ پس از بازسازی (مگاوات)	$P_i^{\max}$
انحراف از مقدار تولید از منابع تجدیدپذیر مطلوب در سال $y$	$RES_{def}^y$	هزینه از دست دادن بار به ازای هر واحد	$VLL$
میزان آلاینده تولید شده بیش از سقف تعیین شده در سال $y$	$dev_y^+$	هزینه سرمایه‌گذاری واحد برای واحد $i$ (ریال / مگاوات)	$IC_{s_i b}$

### مدل ریاضی مسئله

مسئله GEP را می‌توان به صورت زیر مدل‌سازی کرد:

$$Z = \sum_y \frac{\left[ \sum_{mj} dur^{ymj} \cdot \left( \sum_i OC_i^{ymj} + VLL \cdot NS^{ymj} \right) \right]}{(1 + DR)^y} + \sum_y \frac{\sum_b \left( \sum_{i \in I^{new}} P_i^{\max} \cdot IC_{s_i b}^y \cdot w_i^y \right)}{(1 + DR)^y} + \sum_y \frac{\sum_b \left( \sum_{i \in I^{old}} Pr_i^{\max} \cdot ICr_{s_i b}^y \cdot x_i^y \right)}{(1 + DR)^y} + \sum_y \frac{PEN_{RES} \cdot RES_{def}^y + CP \cdot dev_y^+}{(1 + DR)^y} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_i P_i^{ymj} + NS^{ymj} = L^{ymj} \quad \forall y, m, j \quad (2)$$

$$P_i^{ymj} \leq P_i^{\max} \left( u_i^y - \sum_{\max\{0, y-T_i\}}^y x_i^y \right) + Pr_i^{\max} \sum_{\max\{0, y-T_i\}}^y x_i^y \quad \forall i \in I^{old}, y, m, j \quad (3)$$

$$P_i^{ymj} \leq P_i^{\max} u_i^y \quad \forall i \in I^{new}, y, m, j \quad (4)$$

$$F_i^{ymj} \geq f_i \cdot P_i^{ymj} - M \cdot \sum_{\max\{0, y-T_i\}}^y x_i^y \quad \forall i \in I^{old}, y, m, j \quad (5)$$

هزینه بازسازی واحد موجود  $i$  (ریال / مگاوات)

هزینه جریمه مربوط به انحراف از مقدار تولید از منابع تجدیدپذیر (ریال / مگاوات)

میزان مصرف سوخت از نوع  $s$  در نیروگاه  $i$  به ازای هر مگاوات خروجی انرژی (واحد سوخت / مگاوات)

سقف سوخت از نوع  $s$  در دسترس در سال  $y$  (واحد سوخت)

میزان تولید آلاینده (CO<sub>2</sub> و...) از نوع  $s$  در نیروگاه  $i$  به ازای هر مگاوات خروجی انرژی (واحد آلودگی / مگاوات)

سقف آلاینده تولیدی از نوع  $s$  در دسترس در سال  $y$  (واحد آلودگی)

هزینه هر واحد آلاینده تولید شده بیشتر از سقف تعیین شده در سال  $y$

ماکزیمم انرژی خروجی از نیروگاه آبی  $i$  در طول سال  $y$  (مگاوات ساعت)

ماکزیمم درصد سهم انرژی‌های تجدیدپذیر

(p.u.)

$$\sum_{y=1}^{y'} z_i^y \leq x_i^{y'} \quad \forall y' \in Y, i \in I^{old} \quad (26)$$

$$u_i^1 = 1 \quad \forall i \in I^{old} \quad (27)$$

$$u_i^y = \sum_{y-T_{life}}^{y-T_{ini}} x_{ii}^y \quad \forall i \in I^{old}, y > T_{life} - T_{ini} \quad (28)$$

$$dev_y^+, dev_y^- \geq 0 \quad \forall y \quad (29)$$

تابع هدف مدل ۱ شامل چند بخش می‌شود و به دنبال کمینه کردن هزینه‌هاست. بخش اول هزینه‌ها به هزینه‌های عملیاتی تولید نیروگاه‌ها و بخش دوم به هزینه مربوط به تقاضای پاسخ داده‌نشده تعلق دارد. در بخش سوم، تابع هدف به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و احداث واحدهای جدید پرداخته و بخش دیگر نیز هزینه‌های بازسازی نیروگاه‌های موجود را منظور کرده است. دو جمله انتهایی موجود در تابع هدف به صورت آرمانی عمل کرده و هزینه انحراف‌ها از میزان تولید هدف انرژی‌های تجدیدپذیر و آلاینده‌ها محاسبه شده است.

### محدودیت‌ها

**محدودیت تعادل انرژی (۲):** در این محدودیت بیان می‌شود در هر دوره از زمان سطحی از تقاضا وجود دارد که باید به کمک واحدهای فعال تأمین شود. در صورتی که میزان تولید نیروگاه‌ها کمتر از تقاضای آن دوره باشد، اختلاف میان این دو به صورت تقاضای پاسخ داده‌نشده (تأمین نشده) در نظر گرفته می‌شود.

**محدودیت فنی:** این دسته از محدودیت‌ها بیان می‌کند که میزان خروجی هر نیروگاه به دو مؤلفه حالت فعالیت و ظرفیت نیروگاه وابسته است. نیروگاهی می‌تواند خروجی داشته باشد که در دوره مربوط فعال باشد؛ بنابراین نیروگاه‌های غیرفعال فارغ از ظرفیتشان هیچ‌گونه خروجی‌ای ندارند. در گام بعد، همه نیروگاه‌های فعال تا سقف ظرفیتشان می‌توانند خروجی داشته باشند. البته میزان ظرفیت نیروگاه‌های بازسازی شده در مقایسه با قبل از بازسازی تغییر می‌کند. در مدل حاضر محدودیت‌های ۲ و ۳ این مطلب را بیان می‌کنند.

**محدودیت‌های مربوط به سوخت:** براساس این دسته از محدودیت‌ها، هر نیروگاه با توجه به نوع سوختی که مصرف می‌کند و میزان تولیدی که دارد، نیازمند

$$F_i^{ymj} \geq fr_i . P_i^{ymj} - M (u_i^y - \sum_{\max\{0, y-T_j\}}^y x_i^y) \quad \forall i \in I^{old}, y, m, j \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I^{old}, m, j} F_i^{ymj} . dur^{ymj} + \sum_{i \in I^{new}, m, j} f_i . dur^{ymj} . P_i^{ymj} \leq Ful_{max}^y \quad \forall y \quad (7)$$

$$POL_i^y \geq pol_i . P_i^y - M . \sum_{\max\{0, y-T_j\}}^y x_i^y \quad \forall i \in I^{old}, y, m, j \quad (8)$$

$$POL_i^{ymj} \geq polr_i . P_i^{ymj} - M (u_i^y - \sum_{\max\{0, y-T_j\}}^y x_i^y) \quad \forall i \in I^{old}, y, m, j \quad (9)$$

$$POL_i^y \geq pol_i . (1 - \sum_{\max\{0, y-T_j\}}^y x_i^y) + polr_i . \sum_{\max\{0, y-T_j\}}^y x_i^y \quad \forall i \in I^{old}, y \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I^{old}, m, j} POL_i^y . dur^{ymj} . P_i^{ymj} + \sum_{i \in I^{new}, m, j} pol_i . dur^{ymj} . P_i^{ymj} = POL \max_y^+ + dev_y^+ - dev_y^- \quad \forall y \quad (11)$$

$$\sum_b \sum_{i \in I^{new}} (P_i^{max} . IC_{i,b} . w_i^y) + \sum_{i \in I^{old}} (Pr_i^{max} . ICr_{i,b} . x_i^y) \leq B^y \quad \forall y \quad (12)$$

$$OC_i^{ymj} \geq oc_{ab}^y . P_i^{ymj} - M . \sum_{\max\{0, y-T_j\}}^y x_i^y \quad \forall i \in I^{old}, y, m, j, s, b \quad (13)$$

$$OC_i^{ymj} \geq ocr_{ab}^y . P_i^{ymj} - M (u_i^y - \sum_{\max\{0, y-T_j\}}^y x_i^y) \quad \forall i \in I^{old}, y, m, j, s, b \quad (14)$$

$$OC_i^{ymj} \geq OC_{ab}^{ymj} . P_i^{ymj} - M (1 - u_i^y) \quad \forall i \in I^{new}, y, m, j, s, b \quad (15)$$

$$\sum_{m, j} dur^{ymj} P_i^{ymj} \leq E_i^y \quad \forall i \in I^{hyd} \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I^{max-I}^{new}} P_i^{ymj} \leq \alpha^{RES} . L^{ymj} \quad \forall y, m, j \quad (17)$$

$$\sum_{m, j} (dur^{ymj} \sum_{i \in I^{new}} P_i^{ymj}) + RES_{def}^y \geq \lambda^y \sum_{m, j} (dur^{ymj} . L^{ymj}) \quad \forall y \quad (18)$$

$$w_i^y - z_i^y = u_i^y - u_i^{y-1}, \quad \forall i \in I, y \quad (19)$$

$$w_i^y + z_i^y \leq 1 \quad \forall i \in I^{new}, y \quad (20)$$

$$\sum_{\tau=1}^y w_i^\tau = u_i^y \quad \forall i \in I^{new}, y \quad (21)$$

$$\sum_{\tau=1}^y z_i^\tau = 1 - u_i^y \quad \forall i \in I^{new}, y \quad (22)$$

$$w_i^1 = 1 \quad \forall i \in I^{old} \quad (23)$$

$$\sum_{y=1}^{T_{life}-T_{ini}} \sum_l x_{il}^y \leq 1 \quad \forall i \in I^{old} \quad (24)$$

$$\sum_{y > T_{life}-T_{ini}} \sum_l x_{il}^y = 0 \quad \forall i \in I^{old} \quad (25)$$

**محدودیت‌های صفر و یک:** محدودیت‌های ۱۸ تا ۲۷ محدودیت‌های صفر و یک مدل هستند و روابط خاصی از وجود، احداث، بازسازی و اتمام فعالیت نیروگاه‌ها را بیان می‌کنند. در محدودیت ۲۹ نیز مثبت‌بودن متغیرها بیان می‌شود.

#### حل مسئله

پس از بررسی مسئله و حل آن در ابعاد کوچک با استفاده از نرم‌افزار گمز، برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از روش‌های حل فراابتکاری استفاده شد. با توجه به ادبیات موضوع مذکور، انتخاب دو الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری صورت گرفت.

#### الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی فراگشتی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند. این الگوریتم شناخته‌شده اولین بار از سوی جان هلند معرفی شد. در این قسمت روش اجرای مسئله در الگوریتم ژنتیک بیان می‌شود. در این الگوریتم دو الگوریتم ژنتیک به صورت ترکیبی به کار می‌رود. اولین الگوریتم که کلی‌تر است و در دل خود الگوریتم دیگری دارد، دربارهٔ تأسیس، بازسازی و اتمام فعالیت نیروگاه‌ها تصمیم‌گیری می‌کند. در الگوریتم دوم نیز که در الگوریتم بزرگ‌تر قرار دارد در مورد میزان تولید نیروگاه‌ها و درصد استفاده از ظرفیتشان تصمیم‌گیری می‌شود.

#### تعریف کروموزوم

در الگوریتم ژنتیک هر کروموزوم نمایندهٔ یک پاسخ است و مجموعهٔ این کروموزوم‌ها جمعیت را تشکیل می‌دهد. برای اجرای الگوریتم ژنتیک در مسئله مورد نظر مرحلهٔ اول تعریف کروموزوم‌ها منطبق با مدل GEP است. شکل ۲ نمونهٔ کروموزوم منطبق داده‌شده بر مدل مذکور است که وضعیت احداث، بازسازی و اتمام فعالیت نیروگاه‌ها را مشخص می‌کند. هر نیروگاه سه ژن دارد و همهٔ این ژن‌ها اعدادی بین صفر و ۱ به صورت پیوسته هستند. اگر نیروگاه موجود باشد، ژن اول متغیر تصمیم‌گیری در مورد بازسازی یا عدم بازسازی نیروگاه مذکور است. اگر این عدد تصادفی بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد، برای بازسازی نیروگاه مذکور

سطحی از سوخت است. همچنین میزان سوخت مصرفی به ازای هر واحد خروجی در نیروگاه‌ها پس از بازسازی نیز ممکن است تغییر کند. در هر صورت مجموع سوخت مصرفی در همهٔ نیروگاه‌ها در هر سال از میزان ذخایر سوختی در دسترس در آن سال تجاوز نمی‌کند. محدودیت‌های ۴، ۵ و ۶ محدودیت‌های مربوط به سوخت هستند.

**محدودیت‌های زیست‌محیطی:** بحث دیگر در مدل، مربوط به آلودگی و تولید آلاینده‌ها و به عبارتی انرژی‌های سبز است. هر نیروگاه با توجه به نوع سوخت مصرفی و میزان تولیدش، سطحی از آلاینده‌ها را به محیط‌زیست وارد می‌کند. در هر سال، براساس برخی مصوبات، سقفی برای تولید آلاینده‌ها در نظر گرفته می‌شود. به هر میزان که تولید آلاینده‌ها از این سقف تجاوز کند، مدل جریمه‌ای برای آن در نظر گرفته و مطلوبیت تابع هدف کاسته می‌شود. محدودیت‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ محدودیت‌های زیست‌محیطی مدل هستند.

**محدودیت بودجه:** دربارهٔ هزینه‌های احداث یا بازسازی نیروگاه‌ها همواره سقف بودجه‌ای در سال تعیین می‌شود. محدودیت ۱۱ محدودیت بودجهٔ مدل است.

**هزینه‌های عملیاتی:** در محدودیت‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ هزینه‌های عملیاتی تولید نیروگاه‌ها محاسبه می‌شود. این هزینه‌ها شامل همهٔ هزینه‌های تولیدی نیروگاه از قبیل هزینهٔ تولید، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و... می‌شود.

**محدودیت انرژی تولیدی در نیروگاه‌های آبی:** در نیروگاه‌های آبی می‌توان تا سطحی از انرژی کل مورد نیاز را تأمین کرد؛ زیرا نوع این نیروگاه‌ها به دلیل خطر بسیاری که دارند (از نظر احتمال کم‌آبی در سال‌های مختلف) سهم کمتری از تأمین انرژی را به خود اختصاص می‌دهند.

**محدودیت انرژی تجدیدپذیر:** در حال حاضر انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل نوع فناوری خود و نوظهور بودن آن‌ها باید به صورت تدریجی سهم خود را افزایش دهند. بحث دیگر بازدهی پایین و خروجی کم این نیروگاه‌هاست. محدودیت ۱۶ حد بالایی را برای نیروگاه‌هایی با انرژی تجدیدپذیر در نظر می‌گیرد. در محدودیت ۱۷ در عین حال که محدودیت حداقلی برای آن تعیین شده است، فاصله با این میزان حداقلی با جریمه کنترل می‌شود.

کروموزومها یافت شده و سپس فرزندان حاصل شده هریک، با ترکیب ژنهای قبل از نقطه انتخابی یک والد و ژنهای بعد از نقطه انتخابی والد دیگر حاصل شده‌اند.

### عملگر جهش

عملگر جهش در این الگوریتم اجرا شده با سه شکل جایگذاری، معکوس کردن و جابه‌جایی عمل می‌کند. در هر مورد که کروموزوم انتخاب برای انجام عملگر جهش بر روی آن مشخص شد، عددی تصادفی بین ۱ تا ۳ تولید و از میان این سه نوع عملگر جهش، عملگری انتخاب می‌شود.

### شرط توقف

شرط توقف در این الگوریتم، رسیدن به تعداد تکرار تعیین شده است.

### الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO)

الگوریتم بهینه‌سازی TLBO براساس فرایند آموزش و یادگیری در یک کلاس شکل گرفته است. این الگوریتم را اولین بار راتو و همکاران [۳۰] در مسائل مکانیکی بررسی کردند و در سال ۲۰۱۲ نیز توانستند این الگوریتم را در حالت کلی در مسائل بهینه‌سازی معرفی کنند. این الگوریتم از توانایی یادگیری دانش‌آموزان در کلاس درس و آموزش معلم به دانش‌آموزان برای ارتقای سطح علمی کلاس بهره می‌برد. معلم و دانش‌آموزان دو عنصر اصلی الگوریتم هستند. براین اساس فاز معلم و فاز دانش‌آموز، دو قسمت مهم و اصولی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند. در ادامه روش اجرای مسئله در این الگوریتم آمده است.

در این الگوریتم مانند الگوریتم ژنتیک دو الگوریتم TLBO به صورت ترکیبی استفاده می‌شود. در اولین الگوریتم که کلی‌تر است و در دل خود الگوریتم دیگری را دارد، درباره تاسیس، بازسازی و اتمام فعالیت نیروگاه‌ها تصمیم‌گیری می‌شود و الگوریتم دوم که درون الگوریتم بزرگ‌تر قرار دارد، درباره میزان تولید نیروگاه‌ها و درصد استفاده از ظرفیتشان تصمیم‌گیری می‌کند.

جمعیت این الگوریتم دانش‌آموزان هستند. برای تعریف هر فرد در جمعیت مانند منطق تعریف کروموزوم عمل

تصمیم‌گیری خواهد شد. در غیر این صورت بازسازی نیروگاه صورت نخواهد گرفت. ژن دوم بیانگر سال بازسازی نیروگاه مذکور است. اگر ژن اول بزرگ‌تر از  $0/5$  باشد،  $0/5 >$  است. عدد تصادفی ژن دوم، در تعداد سال عمر نیروگاه بدون بازسازی ضرب و رند می‌شود.

ژن سوم نمایانگر سال اتمام فعالیت نیروگاه است. اگر نیروگاه بازسازی شود این عدد تصادفی در طول عمر نیروگاه پس از بازسازی ضرب و سپس رند می‌شود. در این حالت عدد حاصل شده نشانگر تعداد سال فعالیت نیروگاه پس از سال بازسازی است. در غیر این صورت عدد تصادفی سوم در طول عمر نیروگاه بدون بازسازی ضرب و سپس رند می‌شود تا تعداد سال فعالیت نیروگاه از ابتدای افق برنامه‌ریزی مشخص شود.

در این میان، اگر نیروگاه جزء نیروگاه‌های موجود نباشد و در گروه نیروگاه‌های کاندیدا قرار بگیرد، تعریف ژن‌های مربوط به آن کمی متفاوت خواهد بود. بدین صورت که ژن نخست بیانگر متغیر تصمیم درباره تاسیس کردن یا تاسیس نکردن نیروگاه خواهد بود. اگر عدد تصادفی مربوط به ژن اول از  $0/5$  کمتر باشد ( $0/5 <$ ) نیروگاه تاسیس نمی‌شود و به تبع آن دو ژن دیگر معنای خود را از دست می‌دهند، اما اگر عدد بزرگ‌تر از  $0/5$  یا مساوی آن باشد ( $0/5 \geq$ )، نیروگاه احداث می‌شود. ژن‌های دوم و سوم نیز به این صورت تعریف می‌شود: ژن دوم بیانگر سال تاسیس نیروگاه است که در عدد افق برنامه‌ریزی ضرب و سپس رند می‌شود. ژن سوم سال اتمام فعالیت نیروگاه را بیان می‌کند که در طول عمر نیروگاه ضرب و سپس رند می‌شود. درباره الگوریتم ژنتیک دوم، کروموزوم به صورت زیر تعریف می‌شود: هر ژن مربوط به یک نیروگاه است که در دوره‌ای خاص فعالیت دارد. همواره تعداد ژن‌های موجود در کروموزوم یک عدد بیشتر از تعداد نیروگاه‌های فعال در آن دوره است، این ژن اضافه مربوط به میزان انرژی تأمین نشده در آن دوره است.

### عملگر ادغام

در این الگوریتم اجرا شده از روش one-point استفاده شده است. بدین صورت که در ابتدا به روش انتخابی چرخ رولت دو کروموزوم به عنوان کروموزوم‌های والد انتخاب شدند. سپس با تولید عددی تصادفی، نقطه‌ای در میان



### تنظیم پارامتر

ترکیب مناسب پارامترهای الگوریتم فراابتکاری در کیفیت جواب نهایی تأثیر بسزایی دارد [۳۱]. تعیین مقادیر پارامترها یکی از عوامل تأثیرگذار در کیفیت جواب‌های خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری است؛ بنابراین تصمیم‌گیری درباره مقادیر این پارامترها پیش از اجرای الگوریتم‌ها اهمیت بسیاری دارد. در این بخش از روش RSM به منظور بهینه‌سازی پارامترهای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. معادله کوادراتیک مورد استفاده در RSM از نوع CCD به صورت زیر است:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon. \quad (33)$$

که در آن  $y$  متغیر وابسته پاسخ و  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{jj}$  ضرایب رگرسیون،  $x_i$  و  $x_j$  پارامترهای ورودی ( $i < j$ ) و  $\varepsilon$  خطای جزئی آزمایشگاهی است. RSM برای مسائل کوچک و بزرگ استفاده می‌شود. در جدول ۱، متغیرها (فاکتورها) و سطوح مورد نظر در مورد الگوریتم GA نشان داده شده است. باقی فاکتورها ثابت هستند و حساسیت بالایی ندارند. در جدول ۲، نتیجه تنظیم پارامترها به کمک نرم‌افزار Design-Expert آمده است.

### بررسی و تحلیل نتایج

در این بخش، از آزمایش‌های کامپیوتری به منظور بررسی و اعتبارسنجی رفتار الگوریتم‌های اجرا شده و بررسی کیفیت پاسخ‌های ارائه شده استفاده می‌شود. از آنجا که هیچ‌گونه سابقه‌ای مانند مسئله مورد بررسی در ادبیات این موضوع مشاهده نشد، داده‌های مثال‌های مذکور به صورت تصادفی و براساس داده‌های نیروگاه‌های ایران تولید و آزموده شد. برخی از سایر داده‌های ورودی مسئله نیز براساس جدول‌های ۳ و ۴ است [۱۵].

در ابتدا تنظیم پارامترهای موجود در الگوریتم ژنتیک صورت گرفت و سپس نتایج اجرای مدل در ابعاد کوچک به کمک نرم‌افزار GAMS (حل دقیق)، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری نمایش داده شد. همچنین در ابعاد متوسط و بزرگ به دلیل زمان‌بر بودن روش حل دقیق تنها مقایسه دو الگوریتم فراابتکاری اشاره شده صورت گرفت.

می‌شود. در واقع هر دانش‌آموز ویژگی‌هایی دارد که در این الگوریتم مانند ژن‌های موجود در کروموزوم تعریف می‌شوند.

### فاز معلم

در این فاز سعی می‌شود تا میانگین کلاس یعنی  $Mean^k$  به سطح دانش خود یعنی  $Teacher^k$  افزایش یابد. در نتیجه این اختلاف سطح دانش بین میانگین کلاس و معلم به شکل زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$Diference - Mean^k = Teacher^k - TF^k \times Mean^k \quad (30)$$

در این فرمول  $TF^k$  ضریب یادگیری است که میزان حرکت میانگین به سوی معلم را کنترل می‌کند و مقدار آن به صورت احتمالی ۱ یا ۲ انتخاب می‌شود. در نهایت موقعیت جدید اعضا به صورت زیر به روزرسانی می‌شود:

$$X_{new}^k = X_{old}^k - Rand(.) \times Diference - Mean^k \quad (31)$$

که در آن  $X_{old}^k$  موقعیت قبلی دانش‌آموز  $k$  ام و  $X_{new}^k$  موقعیت جدید دانش‌آموز  $k$  ام است. این نکته مهم است که خروجی جمعیت از این فاز به عنوان ورودی جمعیت برای فاز دوم یعنی فاز دانش‌آموز در نظر گرفته می‌شود.

### فاز دانش‌آموز

این فاز قسمت دوم فرایند بهینه‌سازی TLBO را تشکیل می‌دهد که در آن دانش‌آموزان سطح دانش و اطلاعاتش را براساس فعل‌وانفعالات و مصالحه میان خودشان افزایش می‌دهند. هر دانش‌آموز به صورت تصادفی یکی دیگر از دانش‌آموزان را انتخاب می‌کند و براساس رابطه زیر سطح دانش خود را تغییر می‌دهد:

$$X_{new} = \begin{cases} X_i + Rand(.) \times (X_j - X_i) & \text{If } f(X_i) < f(X_j) \\ X_i + Rand(.) \times (X_i - X_j) & \text{else} \end{cases} \quad (32)$$

اگر این تغییر سطح دانش سبب بهتر شدن نمره دانش‌آموز شود، این موقعیت جایگزین موقعیت قبلی می‌شود. در غیر این صورت همان موقعیت قبلی در فضای جست‌وجو می‌ماند. شایان ذکر است که خروجی جمعیت از فاز دوم، یعنی فاز دانش‌آموز ورودی جمعیت برای تکرار بعدی است.

### شرط توقف

شرط توقف در این الگوریتم، رسیدن به تعداد تکرار تعیین شده است.

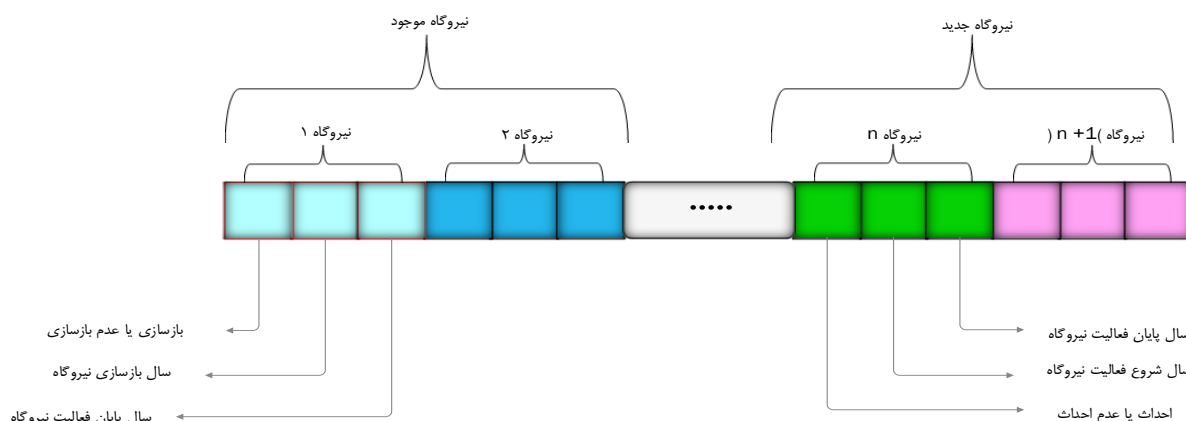
به مراتب از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری بهتر عمل کرده است. این مورد هم به کمک میانگین پاسخ‌ها و هم فاکتور ARPD (که پاسخ‌ها را نسبت به ابعادشان بی‌مقیاس می‌کند) قابل مشاهده است. معادله محاسبه  $ARDP$  نیز به صورت ذیل است:

$$ARDP = Mean\left(\frac{A I g_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} \times 100\right) \quad (34)$$

که در آن  $A I g_{sol}$  پاسخ مشاهده‌شده در الگوریتم مربوط و  $Min_{sol}$  بهترین جواب مشاهده‌شده در میان الگوریتم‌هاست.

در این بخش، مسائل در هر مسئله و در هر اندازه پنج بار اجرا می‌شود که نتیجه میانگین در جدول ذکر شده است. مسائل ردیف‌های ۱-۷ جزء مسائل ابعاد کوچک، ۸-۱۵ جزء مسائل ابعاد متوسط و ۱۶-۲۲ جزء مسائل ابعاد بزرگ هستند. مدل ریاضی پیشنهادشده به کمک نرم‌افزار MATLAB و GAMS IDE (ver. 24.1.2) در سیستم کامپیوتری با مشخصات (R2014a) (Intel(R) Core i7 CPU 2.00 GHz, 4GB RAM) حل شده است.

با توجه به جدول ۲، تابع هدف در الگوریتم ژنتیک



شکل ۲. تعریف کروموزوم

جدول ۱. سطوح مختلف فاکتورهای الگوریتم ژنتیک به همراه تعداد آزمایش‌ها

تعداد آزمایش‌ها	$Max It$		$Pop Size$		$P_c$		$P_m$		حد پایین (-) حد بالا (+)
	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	
۳۰	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۰/۶	۰/۸	۰/۲	۰/۴	مسائل در ابعاد کوچک
۳۰	۳۰۰	۶۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۰/۶	۰/۸	۰/۲۵	۰/۵۵	مسائل در ابعاد بزرگ

جدول ۲. پارامترهای تنظیم‌شده

$MaxIt=468$ $PopSize=194$ $P_c=0.612$ $P_m=0.397$	پارامترهای الگوریتم ژنتیک در مسائل با ابعاد کوچک
$MaxIt=514$ $PopSize=291$ $P_c=0.676$ $P_m=0.508$	پارامترهای الگوریتم ژنتیک در مسائل با ابعاد بزرگ

جدول ۳. ویژگی‌های اصلی فناوری‌های مختلف

فناوری	خروجی (MW)	نرخ حرارتی (MWBtu/MWH)
بخاری	۱۳۰۰-۱۰۰	۱۵-۱۰
هسته‌ای	۱۳۰۰-۹۰۰	۱۵-۱۰
توربین احتراقی گازی	۲۰۰-۲۵	۱۲/۵-۹/۵
سیکل ترکیبی	۶۰۰-۴۰۰	۷/۵-۶/۸
بادی	۱/۵-۰/۵	-

جدول ۴. رتبه‌بندی فناوری‌های مختلف براساس برخی شاخص‌های کلیدی

فناوری	هزینه ساخت	هزینه بهره‌برداری	پایایی	انعطاف پذیری	قطعیت تأمین سوخت	انتشار آلودگی
بخاری	C	B	A	B,C	A	D
سیکل ترکیبی	B	C	A	B,C	C	B
توربین احتراقی	A	D	B	B	C	C
هسته‌ای	E	C	A	B,C,D	B	A
آبی	C	A	C	A	-	A
بادی	E	B	E	E	-	A

جدول ۵. نتایج

رتب	مورد	نقطه	اطلاعات مربوط به مسئله (تعداد)			حل دقیق (GAMS)		الگوریتم TLBO		الگوریتم GA	
			منطقه	مساحت	زمان حل	پاسخ	زمان حل	پاسخ	زمان حل	پاسخ	
۱	۱۰	۱۵	۱۲	۱	۴	۷۷۳,۴۱۰	۱۴۰/۸۴	۷۷۳,۴۱۰	۹۰/۲۱	۷۷۳,۴۱۰	۱۰۱/۴۰
۲	۸	۱۷	۱۲	۴	۴	۱,۶۲۷,۴۹۹	۸۰۰/۵۰	۱,۸۱۳,۸۹۷	۳۹۴/۰۸	۱,۶۴۴,۱۹۲	۴۶۴/۳۶
۳	۱۰	۱۵	۲۰	۴	۴	۱,۸۰۲,۷۶۹	۲۰۰۰/۴	۱,۸۷۲,۳۲۰	۳۹۳/۱۹	۱,۸۰۲,۷۶۹	۴۵۹/۷۲
۴	۱۰	۱۷	۲۰	۲	۲	---	---	۲,۲۴۰,۶۶۳	۲۹۹۵/۹۸	۱,۷۵۲,۹۷۰	۲۱۰۹/۹۶
۵	۱۰	۱۵	۲۴	۱	۳	---	---	۲,۴۵۲,۰۹۹	۶۰۵۶/۶۵	۲,۳۹۵,۹۰۲	۵۰۲۸/۰۳
۶	۱۵	۱۵	۲۴	۲	۳	---	---	۲,۸۱۴,۸۷۹	۳۵۸۵/۴۰	۲,۸۱۸,۲۱۷	۳۰۲۱/۴۵
۷	۱۵	۲۰	۲۵	۳	۴	---	---	۳,۴۲۴,۴۲۶	۸۶۹۴/۶۶	۳,۰۲۲,۴۲۰	۸۴۴۴/۷۰
۸	۱۵	۲۰	۲۸	۳	۵	---	---	۴,۲۴۷,۶۳۴	۲۶۴۳/۰۲	۴,۰۷۶,۵۳۸	۱۸۷۳۲/۲۷
۹	۱۵	۲۰	۴۴	۲	۵	---	---	۲۲,۹۶۸,۶۰۸	۱۷۴۷۱/۱	۲۱,۷۰۹,۷۳۰	۱۱۷۸۰/۹۶
۱۰	۱۵	۲۵	۳۰	۲	۵	---	---	۲۶۳,۷۴۵,۳۲۹	۳۴۸۹۴/۳	۲۴۸,۲۰۱,۷۳۶	۲۳۵۳۸/۹۴
۱۱	۲۰	۲۵	۳۰	۲	۵	---	---	۲۸۷,۲۷۴,۵۲۰	۶۲۳۱۰/۳	۲۶۴,۹۳۴,۹۳۴	۴۲۳۸۶/۷۵
۱۲	۲۰	۳۰	۳۰	۳	۵	---	---	۴۱۷,۶۴۱,۴۰۰	۶۴۲۰۸/۸	۴۳۷,۶۲۶,۵۳۷	۴۱۳۳۶/۹۶
۱۳	۲۰	۳۰	۳۰	۴	۵	---	---	۵۵۱,۴۲۹,۳۶۷	۶۱۰۰۴/۶۰	۵۰۲,۶۰۲,۹۹۲	۴۱۴۵۵/۸۱
۱۴	۲۰	۳۰	۲۵	۵	۵	---	---	۵۰۳,۵۰۲,۷۰۷	۷۲۲۹۶/۱	۵۶۹,۹۶۷,۰۰۳	۴۲۰۲۳/۷۸
۱۵	۲۵	۳۵	۲۵	۶	۵	---	---	۱,۱۶۰,۱۱۵,۰۰۰	۱۳۱۹۸۲	۱,۰۸۹,۱۹۱,۹۱۲	۵۵۳۱۳/۸۱
۱۶	۲۵	۳۵	۲۸	۶	۵	---	---	۱,۳۲۸,۴۴۶,۰۱۷	۱۳۹۱۲۹	۱,۱۱۷,۰۵۰,۵۳۰	۶۰۶۴۶/۲۶
۱۷	۲۵	۴۰	۲۸	۶	۵	---	---	۱,۴۳۶,۸۹۹,۷۹۹	۱۴۴۵۷۶	۱,۳۴۲,۵۹۰,۵۱۸	۶۳۹۳۸/۵۵
۱۸	۲۵	۴۰	۳۰	۵	۵	---	---	۱,۹۵۱,۸۵۸,۱۵۵	۱۵۱۳۳۱	۲,۰۳۸,۱۴۳,۷۲۶	۶۸۹۳۴/۳۳
۱۹	۲۵	۴۵	۳۰	۶	۵	---	---	۲,۱۲۷,۹۶۶,۶۷۳	۱۵۹۸۶۶/۱	۲,۰۰۷,۴۸۹,۱۴۷	۷۹۵۸۷/۵۱
۲۰	۲۷	۴۵	۳۰	۵	۵	---	---	۲,۷۳۹,۷۷۰,۱۴۹	۱۶۶۳۳۳/۹	۲,۴۳۴,۱۷۲,۲۱۱	۸۸۹۷۵/۳۰
۲۱	۲۷	۵۰	۳۰	۶	۵	---	---	۲,۵۰۸,۴۱۲,۵۲۶	۱۷۴۶۷۲/۶	۲,۴۷۷,۴۱۸,۰۷۱	۱۰۶۳۷۶/۷۲
۲۲	۳۰	۶۰	۴۵	۶	۵	---	---	۳,۲۱۱,۲۸۲,۶۱۶	۱۸۰۲۰۲	۳,۰۳۹,۶۳۴,۰۰۴	۱۵۸۷۶۲۷
								۸۴۲,۳۱۶,۰۰۹		۸۰۰,۴۰۹,۹۷۶	
								۶/۸۱۷		۱/۰۲۴	
											ARPD

## تحلیل حساسیت مسئله

تغییر پارامترهای مختلف ارزیابی شد که در ادامه به تحلیل

حساسیت آن در موارد زیر پرداخته می‌شود:

۱. هزینه عملیاتی نیروگاه‌ها ( $OC_{sb}^y$  و  $OCR_{sb}^y$ )

۲. هزینه هر واحد آلاینده تولید شده بیشتر از سقف

تعیین شده در سال  $y$  ( $CP_y$ )

به‌منظور بررسی صحت عملکرد مدل پیشنهادی،

اعتبارسنجی مدل و همچنین بررسی نحوه اثرگذاری

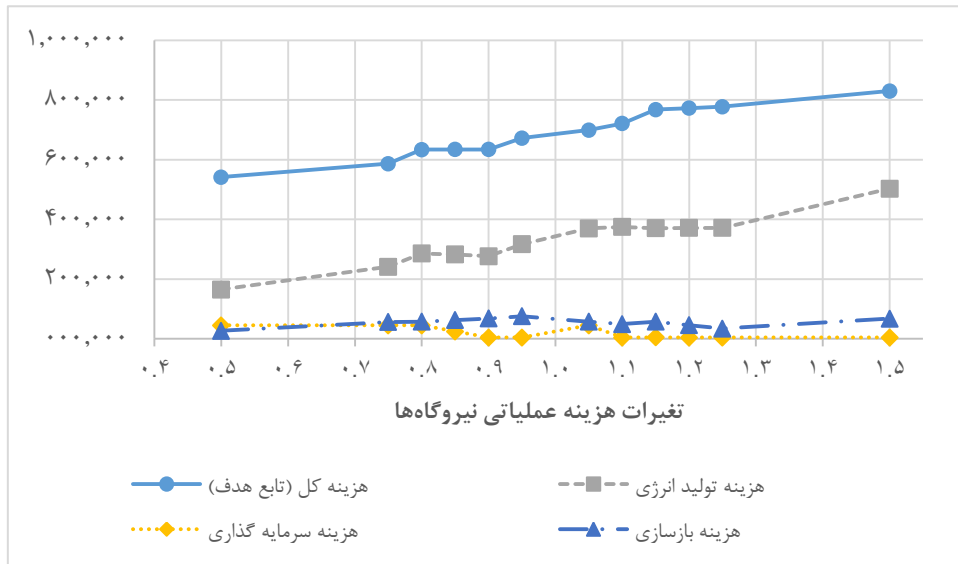
فاکتورهای مختلف بر یکدیگر و تابع هدف، یک مسئله با

هزینه عملیاتی نیروگاهها ( $OC_{sb}^y$  و  $OCR_{sb}^y$ )

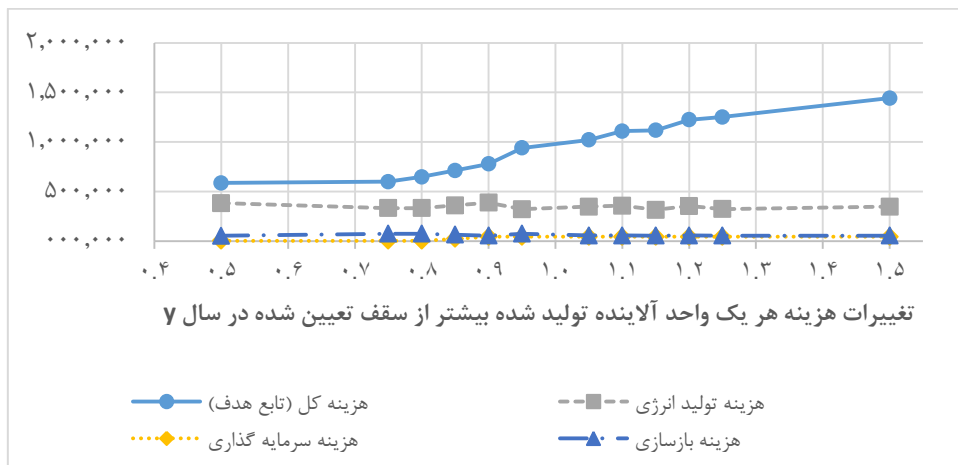
در این قسمت هزینه‌های عملیاتی نیروگاهها از ۰/۵ تا ۱/۵ با گام‌های ۰/۰۵ تغییر می‌یابد که نتایج آن در نمودار ۱ آمده است. براین اساس، با افزایش هزینه‌های عملیاتی نیروگاهها، هزینه کل نیز روند صعودی داشته است. در برخی موارد، مسئله با تغییراتی در احداث یا بازسازی نیروگاهها و با وجود افزایش هزینه‌های عملیاتی آنها، همچنان هزینه کل را ثابت نگه داشته است و در برخی موارد با شیب کمتری رشد داشته است. دلیل این موضوع نیز تبادل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بازسازی، تغییرات سرمایه‌گذاری در مناطق مختلف، کاهش هزینه‌های آلاینده‌ها با استفاده بیشتر از نیروگاههایی با آلاینده‌ها کمتر و... است.

هزینه هر واحد آلاینده تولید شده بیشتر از سقف تعیین شده در سال  $y$  ( $CP_y$ )

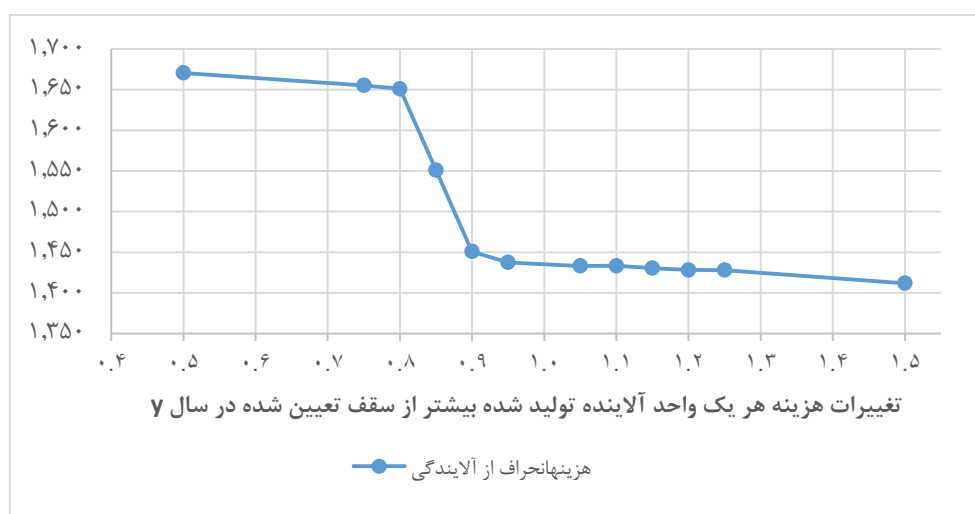
در این قسمت هزینه هر واحد آلاینده تولید شده بیشتر از سقف تعیین شده در سال  $y$  از ۰/۵ تا ۱/۵ برابر با گام‌های ۰/۰۵ تغییر می‌کند که نتایج آن در نمودار ۲ و ۳ آمده است. با توجه به نمودار ۲، با افزایش پارامتر مذکور هزینه کل نیز روند صعودی داشته است. روند تغییرات هزینه‌های تولید انرژی، بازسازی و سرمایه‌گذاری نشان‌دهنده بی‌تفاوتی آنها به این پارامتر است، اما در نمودار ۳ به‌وضوح مشخص است که هرچه این پارامتر افزایش می‌یابد، میزان آلاینده تولید شده بالاتر از سقف کمتر می‌شود.



نمودار ۱. تحلیل حساسیت مسئله (اثر تغییرات هزینه عملیاتی نیروگاهها بر هزینه‌ها)



نمودار ۲. تحلیل حساسیت مسئله (اثر تغییرات  $CP_y$  بر هزینه‌ها)



نمودار ۳. تحلیل حساسیت مسئله (اثر تغییرات  $CP_y$  بر میزان آلاینده تولید شده بیش از سقف تعیین شده در سال  $y$ ) ( $dev_y^+$ )

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله مدل‌سازی جدید برای مسئله GEP ارائه شده است که در آن هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، عملیاتی، تولید آلاینده مضاعف، تأمین و عدم تأمین انرژی مدنظر است. تقسیم‌بندی منطقه‌ای و تفکیک نیروگاه‌ها براساس نوع فناوری به‌کاررفته در آن‌ها از جمله مواردی به‌شمار می‌آید که در این مدل بررسی شده است. همچنین رویکرد بازسازی نیروگاه‌ها از موارد نادر دیده‌شده در این مدل است. در این میان، توجه به تقاضا در سطوح گوناگون و برنامه‌ریزی برای تأمین انرژی از مواردی است که در بیشتر مقاله‌های ادبیات این موضوع

به آن توجهی نشده است. در ادامه مسئله در ابعاد کوچک با استفاده از حل دقیق حل شده و در ابعاد بزرگ‌تر به‌دلیل پیچیدگی مسئله از دو الگوریتم GA و TLBO استفاده شد. پاسخ‌های الگوریتم GA به‌مراتب از پاسخ‌های الگوریتم TLBO بهتر است.

در پایان برخی موضوعات مهم به‌عنوان پیشنهادهای آینده مطرح می‌شود. از جمله اینکه می‌توان مدل ارائه‌شده در این مقاله را با استفاده از روش‌های دقیق مانند شاخه و کران و شاخه و قیمت برای نمونه‌هایی با اندازه بزرگ حل کرد. همچنین یکپارچه‌سازی مدل با مسئله انتقال و توزیع انرژی نیز می‌تواند از موضوعات پژوهش‌های آتی باشد.

### منابع

1. Seifi, H., and Sepasian., M. S., (2011). *Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions, Springer Science and Business Media.*
2. Careri, F. et al. (2011). "Generation Expansion Planning In The Age Of Green Economy", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 4, PP. 2214-2223.
3. Wang, X., and Mcdonald, J. R., (1994). *Modern Power System Planning, Mcgraw-Hill Companies.*
4. Sadeghi, H., Rashidinejad, M., and Abdollahi, A. (2017). "A Comprehensive Sequential Review Study Through the Generation Expansion Planning", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, No. 1, PP. 1369-1394.
5. Unsihuay Vila, C. et al. (2011). "Multistage Expansion Planning of Generation and Interconnections with Sustainable Energy Development Criteria: A Multiobjective Model", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, No. 2, PP. 258-270.
6. Alishahi, E., Moghaddam, M. P., and Sheikh-El-Eslami, M. K. (2011). "An Investigation on the Impacts of Regulatory Interventions on Wind Power Expansion in Generation Planning", *Energy Policy*, Vol. 39, No. 8, PP. 4614-4623.

7. Kannan, S., Slochanal, S.M.R., Baskar, S. and Murugan, P.(2007). "Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning in the Partially Deregulated Environment", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 1, No. 1, PP. 111-118.
8. Shayeghi, H., Pirayeshnegab, A., Jalili, A., and Shayanfar, H. A. (2009). "Application of PSO Technique for GEP in Restructured Power Systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 9, PP. 2127-2135.
9. Tekiner, H., Coit, D. W., and Felder, F. A. (2010). "Multi-Period Multi-Objective Electricity Generation Expansion Planning Problem with Monte-Carlo Simulation", *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, No. 12, PP. 1394-1405.
10. Sirikum, J., Techanitisawad, A., and Kachitvichyanukul, V. (2007). "A New Efficient GA-Benders' Decomposition Method: For Power Generation Expansion Planning with Emission Controls", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, PP.1092-1100.
11. Alizadeh, B., and Jadid, S. (2011). "Reliability Constrained Coordination of Generation and Transmission Expansion Planning in Power Systems Using Mixed Integer Programming", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 5, No. 9, PP. 948-960.
12. Hemmati, R., Hooshmand, R. A., and Khodabakhshian, A. (2016). "Coordinated Generation and Transmission Expansion Planning in Deregulated Electricity Market Considering Wind Farms", *Renewable Energy*, Vol. 85, No. 1, PP. 620-630.
13. Delgado, F. et al. (2011). "The Influence of Nuclear Generation on CO<sub>2</sub> Emissions and on the Cost of the Spanish System in Long-Term Generation Planning", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, No. 3, PP.673-683.
14. Tekiner, H., Coit, D. W., and Felder, F. A. (2010). "Multi-Period Multi-Objective Electricity Generation Expansion Planning Problem With Monte-Carlo Simulation", *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, No. 12, PP.1394-1405.
15. Javadi, M. S. et al. (2013). "Multi-Objective Expansion Planning Approach: Distant Wind Farms and Limited Energy Resources Integration", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 7, No. 6, PP. 652-668.
16. Alishahi, E., Moghaddam, M. P., and Sheikh-El-Eslami, M. K., (2012). "A System Dynamics Approach for Investigating Impacts of Incentive Mechanisms on Wind Power Investment", *Renewable Energy*, Vol. 37, No. 1, PP. 310-317.
17. Careri, F. et al. (2011). "Generation Expansion Planning in the Age of Green Economy", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 4, PP. 2214-2223.
18. Hatami, M. et al. (2015). "Off Grid Photovoltaic System Design Considering Reliability and Cost Indicators (Case Study: Kermanshah, Iran)", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 49, No. 2, PP. 177-184.
19. Cao, Y. et al. (2012). "Multiple Resource Expansion Planning in Smart Grids with High Penetration of Renewable Generation", *In Smart Grid Communications (Smartgridcomm), 2012 IEEE Third International Conference on* (PP. 564-569). IEEE.
20. Wang, W., Xu, Y., and Khanna, M. (2011). "A Survey on the Communication Architectures in Smart Grid", *Computer Networks*, Vol. 55, No. 15, PP. 3604-3629.
21. Kannan, S., Slochanal, S. M. R., and Padhy, N. P. (2005). "Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 1, PP. 466-475.
22. Pereira, M. V. F. et al. (1985). "A Decomposition Approach to Automated Generation/Transmission Expansion Planning", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 11, No. 1, PP. 3074-3083.
23. Huang, J. P., Poh, K. L., and Ang, B. W. (1995). "Decision Analysis in Energy And Environmental Modeling", *Energy*, Vol. 20, No. 9, PP. 843-855.
24. Zhu, J., and Chow, M. Y. (1997). "A Review of Emerging Techniques on Generation Expansion Planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 4, PP.1722-1728.
25. Liu, G., Sasaki, H., and Yorino, N. (2001). "Application of Network Topology to Long Range Composite Expansion Planning of Generation and Transmission Lines", *Electric Power Systems Research*, Vol. 57, No. 3, PP. 157-162.

26. Unsuhay, C., Marangon-Lima, J. W., and De Souza, A. Z. (2007, July). "Integrated Power Generation and Natural Gas Expansion Planning", In *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne* (PP. 1404-1409). IEEE.
27. He, Y., Wang, L., and Wang, J. (2012). "Cap-And-Trade Vs. Carbon Taxes: A Quantitative Comparison from a Generation Expansion Planning Perspective", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 3, PP. 708-716.
28. Seifi, H., and Sepasian, M. S. (2011). "Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions", *Springer Science and Business Media*.
29. Mohagheghi, V., Mousavi, S., Vahdani, B. (2016). "Sustainable Construction Project Portfolio Selection Under Interval- Valued Type-2 Fuzzy Sets", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 50, No. 2, PP. 327-340.
30. Rao, R. V., and Patel, V., (2011). Thermodynamic Optimization of Plate-Fin Heat Exchanger Using Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) Algorithm. *Optimization*, 10, (P.11).
31. Zandieh, M. et al. (2009). "A Robust Parameter Design for Multi-Response Problems", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 2, No. 230, PP. 463-476.

#### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Generation Expansion Planning (GEP)
2. Response Surface Methodology (RSM)
3. Feed-In-Tariff Mechanism (FIT)
4. Emission Trading System (ETS)
5. Traininig – Learninig Based Optimization (TLBO)
6. Average Relative Percent Deviation (ARPD)