

توزیع اقتصادی بار میان نیروگاههای حرارتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن کمینه سازی آلودگی زیست محیطی

محمد کاشکی

شرکت خدمات مهندسی برق، مشانیر

ایران

فاطمه خرامان

دانشگاه تبریز، دانشکده فنی و مهندسی

ایران

واژه های کلیدی: بهینه سازی، در مدار قرار گرفتن نیروگاهها، توزیع اقتصادی بار، الگوریتمهای ژنتیکی، آلودگی زیست محیطی

چکیده

هدف اصلی توزیع اقتصادی بار، برنامه ریزی تولید واحدهای تولید انرژی الکتریکی است به نحوی که بار مورد نیاز شبکه تامین و هزینه های اقتصادی این تولید نیز کمینه شود. روشهای متداول برای حل توزیع اقتصادی بار واحدهای تولیدی حرارتی نیروگاهها، اغلب روشهای تکراری هستند که با اینکه جواب نسبتا دقیقی برای مساله را بدست می دهند، اما محدودیتهای بسیاری در کاربردهای عملی دارند، از جمله باید مشخصه نرخ افزایش حرارتی واحدها پیوسته باشد. روشهای مبتنی بر برنامه ریزی پویا با اینکه با این قبیل محدودیتها مواجه نیستند، ولی با افزایش تعداد واحدها زمان و حافظه مورد نیاز برای حل مساله بطور قابل توجهی افزایش می یابد. اما در مدلهای بر پایه الگوریتمهای ژنتیکی علاوه بر مواجه نبودن با محدودیتهای ذکر شده، زمان و ابعاد حل مساله تقریبا بصورت خطی با تعداد واحدها افزایش می یابد که با وجود کامپیوترهای امروزی انتخابی صحیح برای حل مسائل عملی توزیع اقتصادی بار به نظر می رسند.

از سوی دیگر تنها در نظر گرفتن هزینه های اقتصادی تولید به عنوان هدف نهایی توزیع اقتصادی بار کفایت نمی کند. یکی از پارامترهای مهم دیگری که در کنار هزینه های تولید می تواند تابع هدف کاملی را بسازد، میزان آلودگی زیست محیطی ناشی از احتراق سوخت های فسیلی نیروگاههای حرارتی است.

در این مقاله، مساله توزیع اقتصادی بار بین نیروگاههای حرارتی با تابع هدف ترکیبی تولید بهینه اقتصادی و کمینه سازی آلودگی زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با سایر روشها مقایسه شده است.

۱- مقدمه

توزیع اقتصادی بار الگوریتمی جهت اختصاص دادن بار مورد تقاضای شبکه بین واحدهای تولید انرژی موجود می باشد به نحوی که مجموع هزینه اقتصادی تولید می نیمم شود. این واحدهای تولیدی غالبا توسط برنامه هماهنگی تولید^۱ مشخص می گردند. ولی آنچه که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته شده است، تنها کمینه سازی هزینه اقتصادی تولید نمی تواند معیار مناسبی جهت

^۱ Unit commitment

تخصیص بار تولید واحدها باشد. یکی از عوامل مهمی که در کنار هزینه اقتصادی مورد توجه برنامه ریزان تولید قرار گرفته است، آلودگی زیست محیطی واحدهای تولید انرژی است که اکثراً سوخت فسیلی دارند.

روشهای ریاضی و تکنیکهای مختلف بهینه سازی برای حل مساله توزیع اقتصادی بار بکار گرفته شده است. روشهای توسعه یافته عبارتند از روش ضرائب لاگرانژ^۲، روش فاکتورهای اشتراک^۳، و روش گرادیان^۴ [۱ و ۲]. از میان روشهای ذکر شده روش ضرائب لاگرانژ بطور وسیعتری در بسته های نرم افزاری سیستمهای قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. با اینحال همانطور که در ادامه اشاره شده است، این روش محدودیتهای بسیاری بخصوص در مسایل عملی دارد. اخیراً استفاده از الگوریتمهای ژنتیکی بطور جدی تری در حل مساله توزیع اقتصادی بار مورد توجه قرار گرفته است. از توانائیهای بارز این الگوریتمها می توان به استفاده از جستجوی احتمالی به جای روشهای صریح و نیز یافتن کارآمدتر نقاط بهین کلی به جای نقاط بهین محلی نام برد [۳ و ۴]. الگوریتمهای ژنتیکی اولین بار توسط Holland [۵] ارائه و بعدها توسط Goldberg [۳] و Davis [۴] گسترش داده شد. این روش در بسیاری از زمینه ها مانند مسائل بهینه سازی، شناسائی و کنترل سیستمها، پردازش تصویر، مسائل ترکیبی، و آموزش شبکه های عصبی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج در خور توجه ای را بدنبال داشته است [۶ و ۷]. El-Keib مساله توزیع اقتصادی بار را برای واحدهای تولید انرژی با هدف کمینه سازی هزینه های اقتصادی مورد بررسی قرار داده است [۸]. Sheble روشهایی برای همگرا شدن سریعتر مدل الگوریتمهای ژنتیکی توزیع اقتصادی بار ارائه کرده است [۹]؛ و Chen نیز این الگوریتم را برای شبکه های وسیع تعمیم داده است [۱۰].

در این مقاله حل مساله توزیع اقتصادی بار بین واحدهای تولید توان با هدف کمینه سازی هزینه اقتصادی و اثرات آلودگی زیست محیطی با استفاده از الگوریتمهای ژنتیکی مورد بررسی قرار گرفته و با سایر روشها مقایسه شده است. مدل ریاضی که برای در نظر گرفتن مساله آلودگی زیست محیطی ارائه شده است، بسیار قابل انعطاف بوده و می تواند در تحقیقات آتی بصورت دقیقتر و جامعتری مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مشخصات واحدهای حرارتی تولید انرژی

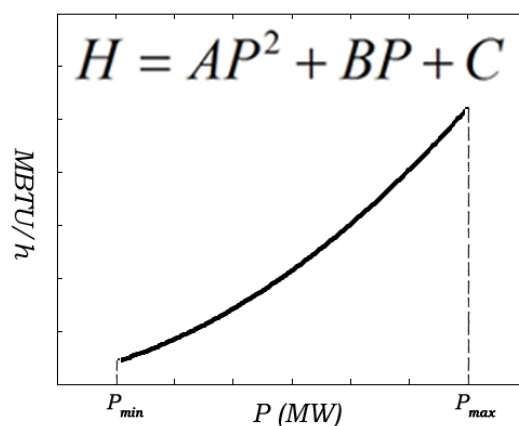
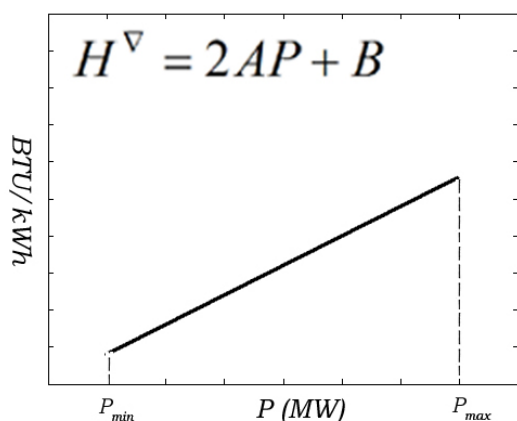
در اکثر روشهای متداول حل مساله توزیع اقتصادی بار، از یک مدل درجه دوم منحنی مشخصه ورودی-خروجی (نرخ حرارت ورودی $MBTU/h$ در برابر توان بر حسب مگاوات) برای مدلسازی واحدهای حرارتی تولید انرژی، استفاده می گردد. در این روشها نرخ افزایش حرارتی^۵ واحدها می بایست به طور یکنواخت افزایشی باشد. نرخ افزایش حرارتی، در حقیقت مشتق منحنی ورودی-خروجی می باشد. شکلهای (۱) و (۲) به ترتیب منحنی ورودی-خروجی و منحنی نرخ افزایش حرارتی یک واحد حرارتی ایده آل را نشان می دهد. با ضرب کردن منحنی مشخصه ورودی-خروجی در هزینه سوخت (بر حسب واحد پول بر میلیون BTU)، منحنی هزینه تولید نسبت به توان تولیدی بدست می آید.

² Lamda-iteration method

³ Participation factor method

⁴ Gradient method

⁵ Incremental heat rate

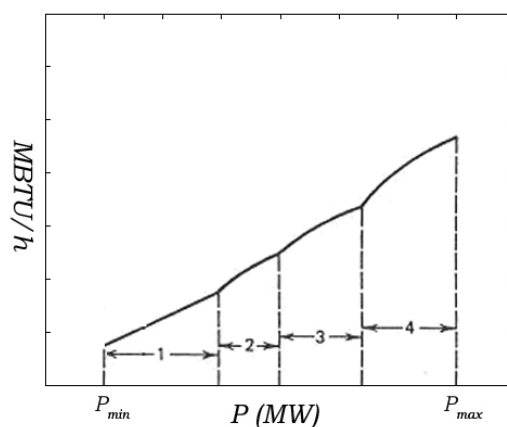
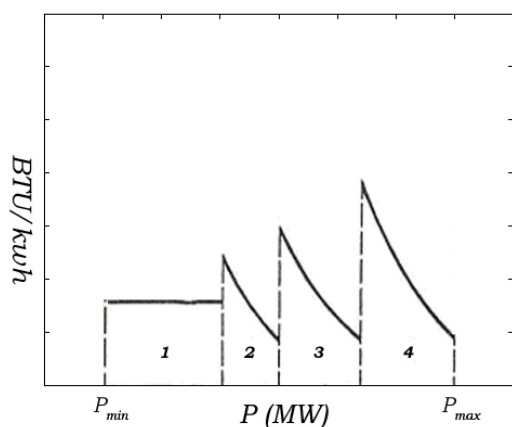


شکل ۱- منحنی ورودی-خروجی واحد حرارتی ایده آل

شکل ۲- منحنی نرخ افزایش حرارتی واحد حرارتی ایده آل

اما، در عمل صعودی بودن منحنی نرخ افزایش حرارتی، که شرط لازم برای استفاده از روشهای متداول توزیع اقتصادی بار است، برقرار نمی باشد: توربینهای بخار بزرگ، تعدادی شیر حرارتی دارند که به ترتیب با افزایش توان تولیدی ژنراتورها، باز می شوند. هنگامیکه شیری در ابتدا باز می شود به علت زیاد شدن سریع تلفات دریچه بخار، نرخ افزایشی حرارتی به صورت ناگهانی زیاد می شود. در نتیجه برای این واحدهای حرارتی، منحنی های ورودی-خروجی و نرخ افزایش حرارتی، به همواری منحنی نشان داده شده در شکلهای (۱) و (۲) نیست. شکلهای (۳) و (۴) به ترتیب منحنی ورودی-خروجی و منحنی نرخ افزایش حرارتی چنین واحد حرارتی با چهار شیر بخار را نشان می دهد.

بنابراین روشهای متداول موفقیتی در حل مسائل توزیع اقتصادی بار که شامل چنین واحدهای تولید انرژی هستند، نخواهند داشت. امروزه از روشهای مبتنی بر برنامه ریزی پویا^۶ نیز در حل مسائل توزیع اقتصادی بار کمک گرفته می شود [۱۱]. روشهای برنامه ریزی



شکل ۳- منحنی ورودی-خروجی واحد بخار واقعی با چهار شیر بخار

شکل ۴- منحنی نرخ افزایش حرارتی واحد بخار واقعی با چهار شیر بخار

پویا بر خلاف روشهای عمومی محدودیتی بر روی منحنی مشخصه ورودی-خروجی واحدهای تولید توان ندارند. با اینحال روشهای برنامه ریزی پویا در حل مسائل توزیع اقتصادی بار با مشکل ابعاد روبرو هستند؛ بدین معنا که با افزایش تعداد واحدهای تولیدی، میزان حافظه و زمان حل مساله بطور نمایی افزایش می یابد. در [۱] راه حلی برای فائق آمدن بر این مشکل تنها هنگامی که منحنی مشخصه ورودی-خروجی هموار و محدب باشد، ارائه شده است.

⁶ Dynamic programming

در روشهای مبتنی بر الگوریتمهای ژنتیکی، نه تنها واحدهایی با منحنی مشخصه ورودی-خروجی همانند واحدهای حرارتی با تعدادی شیر بخار، براحتی تحلیل می شوند، بلکه هیچ محدودیتی بر روی منحنی مشخصه ورودی-خروجی واحدها وجود ندارد. همچنین با افزایش تعداد واحدهای تولیدی، میزان حافظه و زمان حل مساله تقریباً به صورت خطی افزایش می یابد.

۳- مدلسازی آلودگی زیست محیطی

انواع متفاوتی از آلاینده های هوا وجود دارد که اثرات مضر بر سلامت انسان، گیاهان و جانوران داشته و محیط زیست طبیعی را تحت تأثیر قرار می دهند. آلاینده هایی که سبب بروز مشکلات در مناطق حساس می شوند عبارتند از: دود ناشی از احتراق، آلاینده های مضر از قبیل SO_2 ، NO_x ، CO ، ذرات معلق مانند غبار، هیدروکربنهای تولید شده در اثر احتراق نفت، مواد مضر نشر یافته از فرآیندهای شیمیایی متفاوت، فلزات سنگین به همراه فلزات پالایش شده، و بوهای نامطبوع متصاعد شده از فرآیندهای متفاوت. عوارض آلودگی ناشی از نیروگاههای حرارتی با سوخت فسیلی که می بایست مورد توجه قرار گیرند عبارتند از:

۱. آلاینده های مضر: CO ، NO_x ، SO_2

۲. ذرات معلق

البته در باب تأثیر این آلاینده ها بر انسان و گیاهان، طرق اندازه گیری و پالایش آنها، تأثیر آنها بر اتمسفر و ... مطالب مهم و ارزنده ای وجود دارد که از حوصله از مقاله خارج است و تنها به مدلسازی ریاضی آن و چگونگی تأثیر آن بر مساله توزیع اقتصادی بار خواهیم پرداخت.

آستانه مجاز میزان غلظت آلاینده ها در نشریه "جرائم زیست محیطی" انتشار شده از سوی معاونت امور انرژی وزارت نیرو مطابق جدول (۱) آورده شده است [۱۶].

جدول ۱- آستانه مجاز میزان غلظت آلاینده ها

نوع آلاینده	میزان مجاز درجه ۱	میزان مجاز درجه ۲
SO_2	800 ppm ¹	800 ppm
NO_x	350 ppm	350 ppm
CO	130 ppm	130 ppm
ذرات معلق	150 mg/m ³	350 mg/m ³

میزان مجاز درجه ۲ مربوط به نیروگاههایی می شوند که در نزدیکی شهرهای بزرگ کشور قرار دارند. برای سایر نیروگاهها میزان مجاز درجه ۱ قابل استفاده خواهد بود. برای وارد کردن میزان آلودگی زیست محیطی ناشی از چهار عامل آلودگی ذکر شده در جدول فوق، باید میزان آلودگی ناشی شده از هر عامل را به معادل واحد پول تبدیل نمائیم تا قابل قیاس با هزینه اقتصادی ناشی از تولید توان گردد. میزان آلودگی تولید شده ناشی از سه عامل اول از رابطه (۱) بدست می آید:

$$P = D_p \cdot V_m \cdot T \quad (1)$$

در این رابطه P میزان آلودگی بر حسب میلی گرم، D_p غلظت آلودگی بر حسب ppm ، V_m دبی جرمی گاز خروجی بر حسب میلی گرم بر ثانیه، و T دوره بهره برداری بر حسب ثانیه است. میزان آلودگی ناشی از ذرات معلق نیز از رابطه (۲) قابل حصول است.

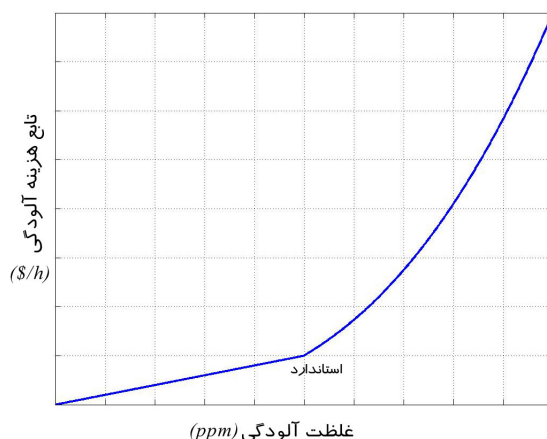
$$P = TSP_p \cdot V_v \cdot T \quad (2)$$

در این رابطه P میزان آلودگی بر حسب میلی گرم، TSP_p غلظت آلودگی بر حسب میلی گرم بر متر مکعب، V_v دبی حجمی گاز خروجی بر حسب متر مکعب بر ثانیه، و T دوره بهره برداری بر حسب ثانیه است. با ضرب کردن میزان آلودگی بدست آمده از رابطه (۱) یا (۲) در نرخ جریمه زیست محیطی^۷ مربوط به عامل آلودگی موردنظر بر حسب واحد پول بر میلی گرم، معادل میزان آلودگی بر حسب واحد پول بدست خواهد آمد. تنها نکته ای که باقی می ماند آن است که جریمه زیست محیطی تعریف شده توسط روابط فوق به صورت خطی با غلظت آلودگی تغییر می کند، حال آنکه این جریمه بایستی با عبور از میزان مجاز تشدید یابد. برای لحاظ کردن این موضوع جریمه زیست محیطی را برای حالتی که غلظت آلودگی از میزان مجاز تجاوز نماید، مطابق رابطه (۳) تغییر می دهیم.

$$P^\nabla = P \left(1 + \frac{D - D_{st}}{D_{st}} \right)^w \quad (3)$$

$$1 < w \leq 2$$

در این رابطه P^∇ جریمه زیست محیطی بر حسب واحد پول، D غلظت آلودگی بر حسب ppm یا میلی گرم بر متر مکعب، D_{st} غلظت مجاز آلودگی بر حسب ppm یا میلی گرم بر متر مکعب، و w جریمه نمائی است که به نسبت عوامل آلودگی که در مقطع زمانی مورد مطالعه حساسترند، بزرگتر در نظر گرفته می شود. نمودار جریمه زیست محیطی نسبت به تغییرات غلظت آلودگی در شکل (۵) رسم شده است.



شکل ۵- نمودار جریمه زیست محیطی نسبت به تغییرات غلظت آلودگی

بدیهی است جریمه زیست محیطی کلی، مجموع جرائم در نظر گرفته شده تمام عوامل آلودگی می باشد.

۴- توزیع اقتصادی بار

صورت مساله توزیع اقتصادی بار بدین صورت است: N واحد تولید توان با محدوده های تولید معین داریم، می خواهیم بار شبکه P_L را به گونه ای توزیع کنیم که مجموع هزینه های تولید و جرائم زیست محیطی واحدها، می نیمم شود. بار P_L معمولاً توسط برنامه پیش بینی بار^۸ معین می شود. لذا مساله بهینه سازی به صورت ذیل مطرح می باشد:

⁷ Pollution penalty rate

⁸ Load forecasting

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } F = w_C \sum_{i=1}^N C(P_i) + w_E \sum_{i=1}^N E(P_i) \\
& \text{s.t. } P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \\
& \sum_{i=1}^N P_i = P_L \\
& w_C + w_E = 1
\end{aligned} \tag{4}$$

که در رابطه فوق، F هزینه کل تولید و جرائم زیست محیطی واحدها، $C(.)$ تابع هزینه تولید، $E(.)$ تابع جریمه زیست محیطی، P_i توان تولیدی هر واحد، w_C وزن هزینه اقتصادی تولید، و w_E وزن جرائم زیست محیطی است. وزنهای w_C و w_E بسته به اینکه هزینه های اقتصادی تولید و جرائم زیست محیطی نسبت بهم چقدر مهم هستند، انتخاب می گردد.

۵- الگوریتم های ژنتیکی

الگوریتمهای ژنتیکی بر پایه کروموزومها و تکامل طبیعی آنها بنا شده است. در این روش بر خلاف روشهای تحلیلی و سعی و خطا به جای کار کردن بر روی یک جواب بهینه، بر روی چند جواب که آن را "جمعیت" می نامند، کار می شود. در نتیجه فضای جواب مساله به صورت موثرتری جستجو می شود. همچنین جستجو و عملیات تکاملی بر روی حالت کد شده جوابها که عموماً کدینگ باینری می باشد، صورت می گیرد. مشخصه خاصی که روشهای مبتنی بر الگوریتمهای ژنتیکی در حل مسائل بهینه سازی دارند آن است که این روشها بدون داشتن اطلاعات خاص از مساله و یا نیاز به داشتن شرایط خاصی از فضای جواب مانند همواری، محدب بودن، و تک مقداری بودن، کارآیی بالایی در حل مسائل دارند.

خاصیت مهم دیگری که این الگوریتمها از نظر برنامه ریزی محاسباتی دارند، این است که هر عضو از جمعیت جواب وابسته به اعضا دیگر نیست و مستقلاً تکامل می یابد. بنابراین در حل مسائل پیچیده و سنگین می توان از پردازنده های موازی به منظور حل سریع مساله استفاده نمود.

در مساله توزیع اقتصادی بار با توجه به اینکه N واحد تولید داریم، $N-1$ واحد (متغیر) را در نظر می گیریم؛ زیرا با در دست داشتن توان تولیدی $N-1$ واحد، توان تولید واحد N ام که آن را P_{ref} نیز می نامیم را می توانیم به صورت رابطه (۵) بدست آوریم. معمولاً P_{ref} را واحدی می گیرند که محدوده تولید آن (یعنی $P_{max} - P_{min}$) از سایر واحدها بیشتر باشد.

$$P_{ref} = P_L - \sum_{i=1}^{N-1} P_i \tag{5}$$

در این مقاله از کدینگ باینری برای اعمال الگوریتم ژنتیک در حل مساله توزیع اقتصادی بار استفاده شده و هر کروموزوم، حاصل بهم پیوستن رشته کد شده مقادیر عددی $N-1$ متغیر است. در مساله فوق، طول رشته کد شده i امین متغیر، کوچکترین عدد صحیحی است که در رابطه (۶) صدق کند.

$$2^{m_i-1} < (P_{i,\max} - P_{i,\min}) \times 10^l \leq 2^{m_i} - 1 \tag{6}$$

در رابطه فوق، m_i طول رشته کد شده i امین متغیر، $P_{i,\max}$ حداکثر توان تولیدی واحد i ام، $P_{i,\min}$ حداقل توان تولیدی واحد i ام، و l تعداد رقمهای پس از اعشار است.

پس از پیوستن رشته های کد شده متغیرها، کروموزوم که حاوی مقادیر کد شده تمام متغیرهاست، حاصل می شود. بنابراین طول کروموزومهای الگوریتم از رابطه (۷) قابل تعیین است.

$$L = \sum_{i=1}^{N-1} m_i \quad (7)$$

بدیهی است با افزایش تعداد واحدهای تولید، تولید کروموزومهای الگوریتم و در نتیجه میزان حافظه مورد نظر سیستم به صورت خطی افزایش می یابد.

همچنین برای برگرداندن کروموزوم به مقادیر حقیقی متغیرهای مساله، ابتدا هر کروموزوم را به رشته های کد شده متناظر تقسیم کرده و سپس از رابطه (۸) استفاده می کنیم.

$$P_i = P_{min,i} + decimal(substring) \times \frac{P_{i,max} - P_{i,min}}{2^{m_i} - 1} \quad (8)$$

جمعیت آغازین الگوریتم ژنتیک بطور تصادفی تشکیل می شود و سپس فرایندهای تکاملی زیر بر روی جمعیت صورت گرفته و نسل جدیدی بوجود می آید:

- چرخه رولت^۹: در این فرایند کروموزومهای جمعیت، با احتمالی متناسب با میزان برازندگی کروموزوم (مقدار تابع هدف) انتخاب می شوند. طی این فرایند ممکن است کروموزومی بیش از یکبار انتخاب گردد (کروموزوم قوی) و یا کروموزومی هرگز انتخاب نگردد (کروموزوم ضعیف).
- تزویج^{۱۰}: طی این فرایند از دو کروموزوم والد، دو کروموزوم فرزند بوجود می آید. ساده ترین الگوریتم برای این فرایند، الگوریتم نقطه قطع منقرض^{۱۱} می باشد. این فرایند با احتمال p_c بر روی جمعیت صورت می گیرد.
- جهش^{۱۲}: طی این فرایند چند ژن (بیت) از کروموزومهای جمعیت از یک به صفر، یا بر عکس از صفر به یک تغییر می کند. این فرایند با احتمال کوچک p_m بر روی جمعیت اعمال می شود.

در فرایند اول، کروموزومهای جمعیت به سمت کروموزوم (یا کروموزومهای) برتر همگرا می شوند. در فرایند دوم کروموزومهای فرزند با دارا بودن خواص والدین خود بوجود می آورند و الگوریتم را به سمت نقطه بهینه سوق می دهد. برای حرکت سریعتر به سمت نقطه بهینه، بهتر است همواره یکی از والدین، بهترین کروموزوم نسل باشد. در فرایند سوم امکان وارد شدن کروموزومهایی که احتمال ورود آنها به الگوریتم بسیار کم است و ممکن است حتی جواب بهینه مساله باشد، مهیا می گردد. احتمال این فرایند باید کم باشد تا الگوریتم روند تصادفی پیدا نکند.

همانطور که واضح است، فرایند تزویج موجب همگرایی و فرایند جهش موجب واگرایی الگوریتم می شود. بنابراین برای سریعترین شدن همگرایی می توان در هر نسل میزان برازش کلی نسل را ارزیابی کرده و احتمالات p_c و p_m را برای نسل آینده تصحیح نمود. نکته مهمی که باید بدان اشاره شود آن است که ممکن است در الگوریتم کروموزومی وجود داشته باشد که متعلق به فضای جواب نباشد. چنین حالتی در مساله توزیع اقتصادی بار زمانی بوجود می آید که به ازای آن کروموزوم، P_{ref} در محدوده تولید خود واقع نشود یعنی:

$$P_{ref} \notin [P_{min,ref}, P_{max,ref}] \quad (9)$$

⁹ Roulette wheel

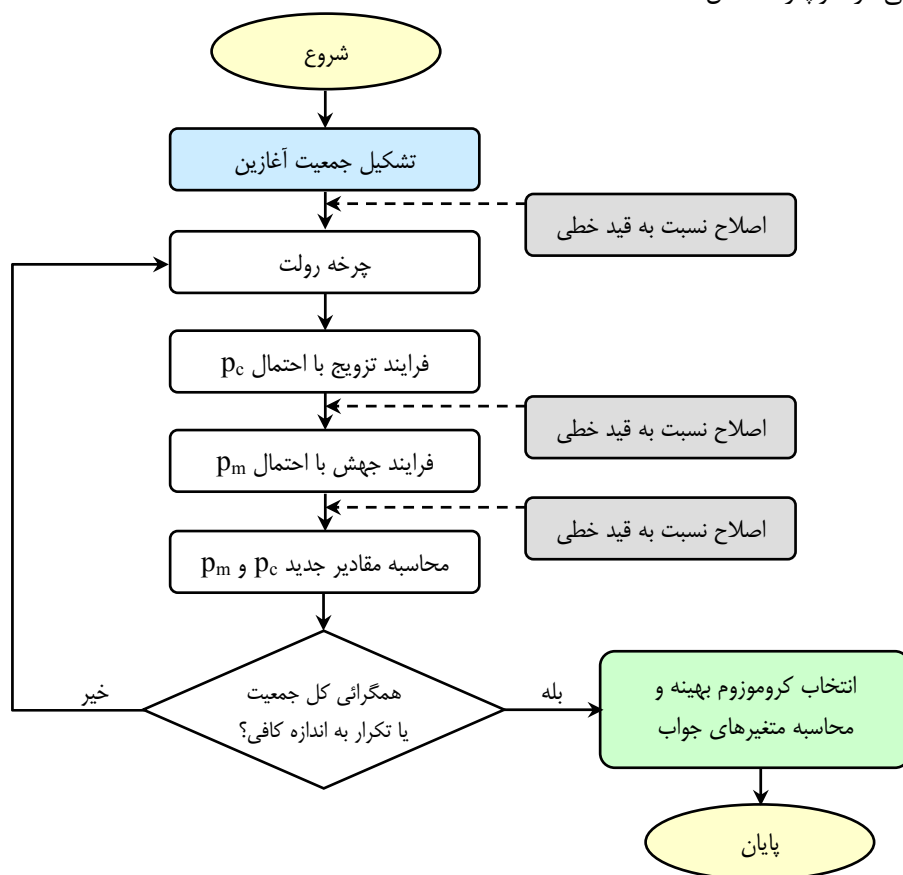
¹⁰ Cross-over

¹¹ One-cut-point

¹² Mutation

در این حالت باید این کروموزوم را حذف نموده و کروموزوم دیگری را جایگزین نماییم. این فرایند را اصلاح نسبت به قید خطی^{۱۳} می نامند.

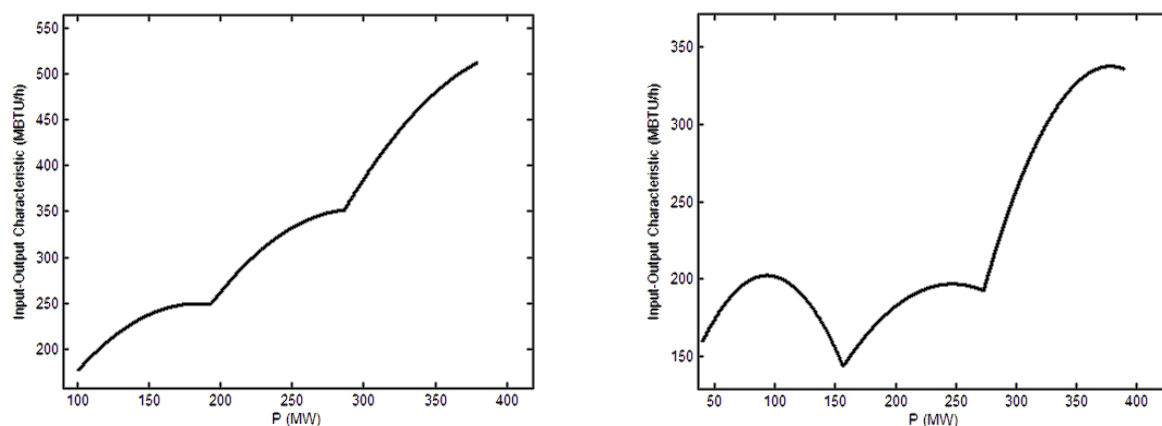
چرخه الگوریتم ژنتیکی در فلوچارت شکل (۶) آمده است:



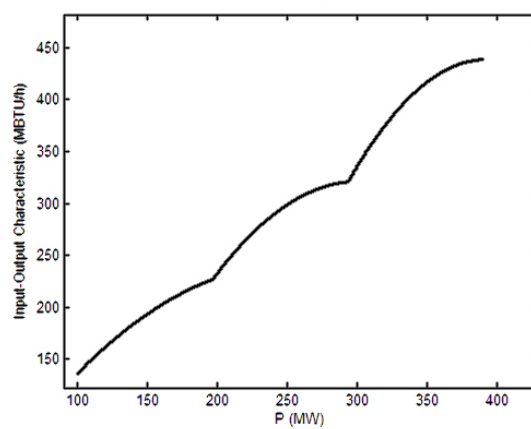
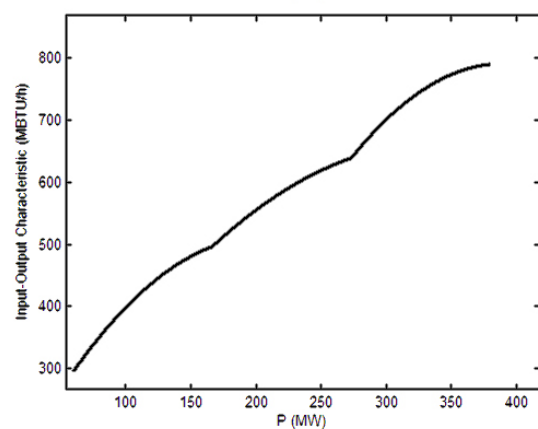
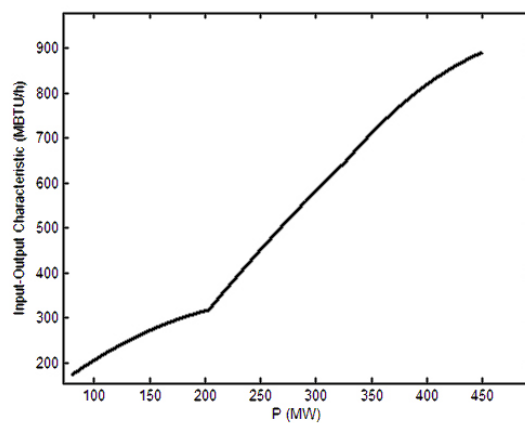
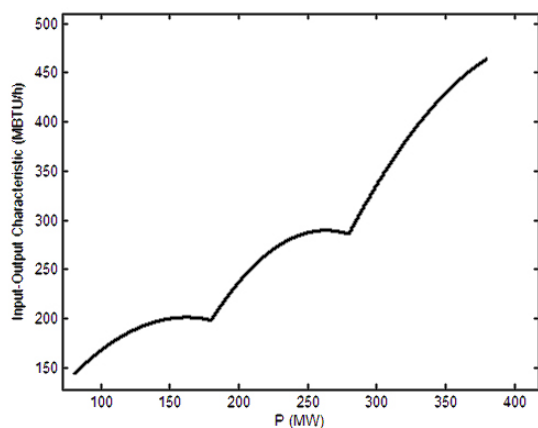
شکل ۶- چرخه فرایندهای الگوریتم ژنتیک

۶- حل یک مثال و مقایسه الگوریتم ژنتیک با روش برنامه ریزی پویا

مساله توزیع اقتصادی بار با شش واحد تولیدی که منحنی های مشخصه ورودی و خروجی آنها در شکل (۷) رسم شده اند را در نظر بگیرد.

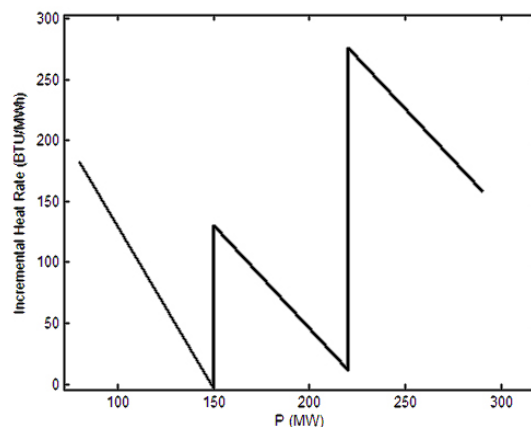
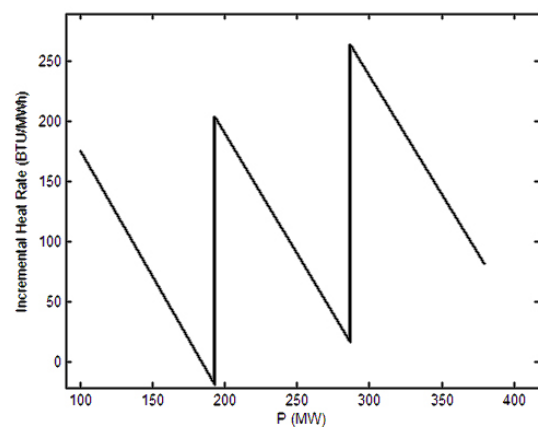


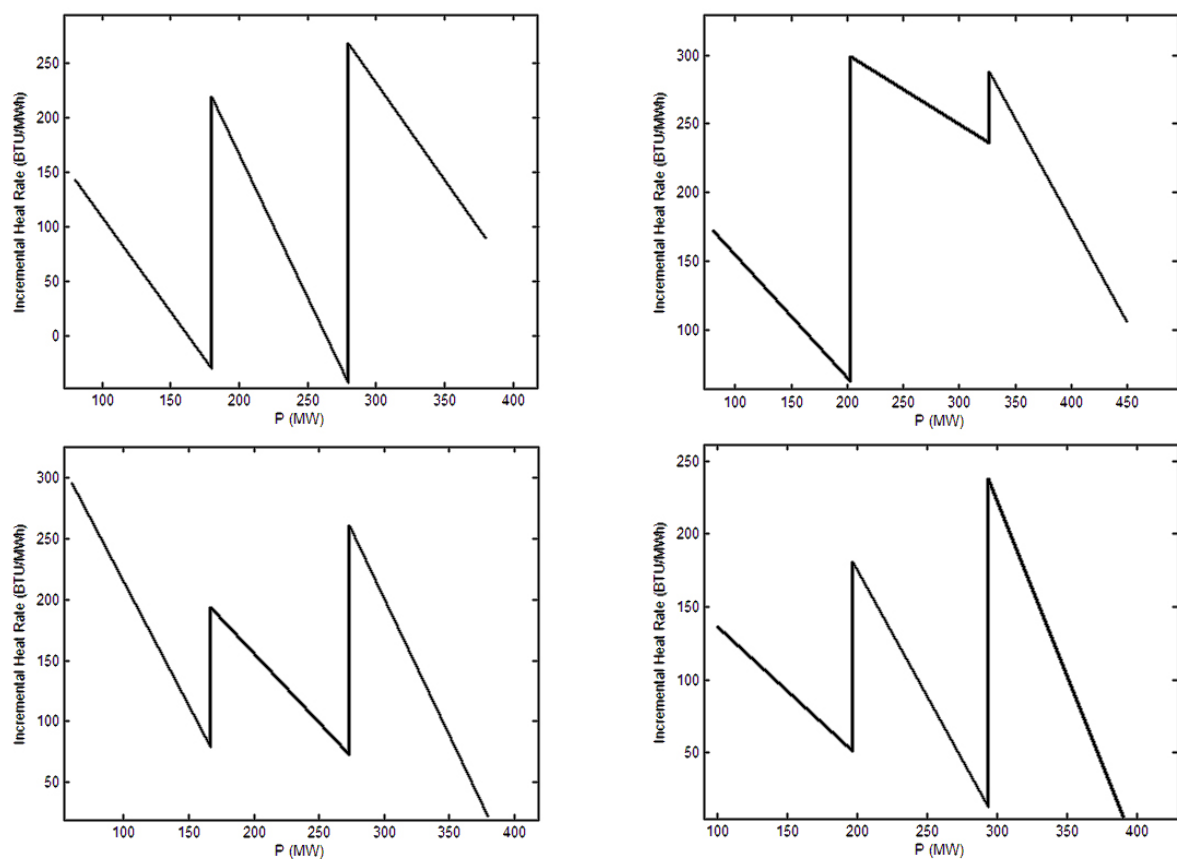
¹³ Correction due to linear constraint



شکل ۷- منحنی های مشخصه ورودی - خروجی واحدهای تولیدی

منحنی های نرخ افزایش حرارتی واحدها نیز به ترتیب در شکل (۸) آمده است.





شکل ۸- منحنی های مشخصه نرخ افزایش حرارتی واحدهای تولیدی

می خواهیم بار شبکه معادل ۲۰۰۰ مگاوات را توسط این واحدها تامین کنیم. سایر مشخصات مورد نیاز برای حل مساله در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- مشخصات واحدهای تولید کننده توان

واحد	۱	۲	۳	۴	۵	۶
توان حداقل	۴۰	۱۰۰	۸۰	۸۰	۱۰۰	۶۰
توان حداکثر	۳۹۰	۳۸۰	۴۵۰	۳۸۰	۳۹۰	۳۸۰
هزینه سوخت	۱۱۰۰	۱۱۵۰	۹۰۰	۸۵۰	۱۰۵۰	۹۵۰
درجه آلودگی	۱	۱	۱	۱	۱	۲
SO_2	۷۰۰	۶۶۰	۶۵۰	۶۴۰	۶۷۰	۶۹۰
NO_x	۳۲۰	۳۰۰	۳۰۵	۳۱۰	۳۱۹	۳۱۵
CO	۱۲۰	۱۱۰	۱۱۵	۱۰۵	۱۲۰	۱۲۰
ذرات معلق	۱۵۰	۱۴۰	۱۳۰	۱۳۵	۱۴۵	۳۰۰

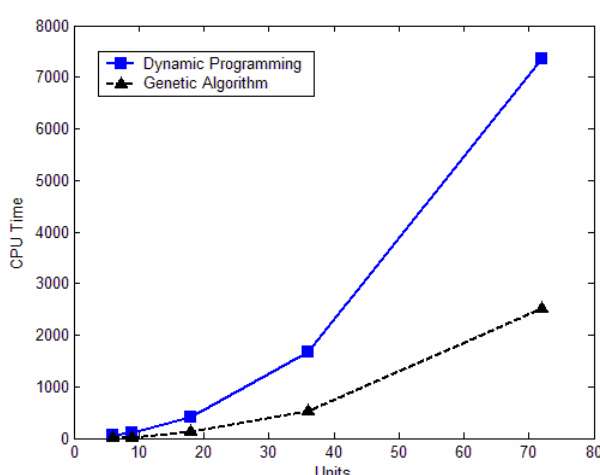
$$P_L = 2000^{MW}, V_m = 41 \frac{mg}{s}, V_v = 210 \frac{m^3}{s}, T = 1^{hr}$$

همانطور که از منحنی های نرخ افزایش حرارتی واحدها مشخص است، مساله را توسط روشهای عمومی مانند ضرائب لاگرانژ و ... نمی توان حل نمود. تنها روشهای حل مساله فوق روش برنامه ریزی پویا و روش الگوریتمهای ژنتیکی است. نتایج حل مساله توسط الگوریتم ژنتیک در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- نتایج حل مساله توزیع اقتصادی بار توسط الگوریتم ژنتیک

واحد	۱	۲	۳	۴	۵	۶
توان بهینه (مگاوات)	۳۰۴/۰۲	۲۸۰/۱۸	۳۱۷/۱۳	۳۸۴/۲۳	۳۳۰/۳۶	۳۸۴/۰۴

برای مقایسه روش الگوریتم ژنتیک با روش برنامه ریزی دینامیکی مساله توزیع اقتصادی بار را برای ۶، ۹، ۱۸، ۳۶، و ۷۲ واحد تولیدی حل شده و متوسط زمان مورد نیاز برای حل توسط یک پردازنده پنتیوم ۳۳۰ مگاهرتز در نمودار شکل (۹) آورده شده است.



شکل ۹ - مقایسه زمان مورد نیاز برای حل توسط برنامه ریزی دینامیکی و الگوریتم ژنتیک

همانطور که از شکل نیز واضح است، توانایی روشهای ژنتیکی نسبت به روشهای برنامه ریزی پویا، با افزایش تعداد واحدهای تولید کننده، به وضوح افزایش می یابد.

۷- نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

در این مقاله مساله توزیع اقتصادی بار میان نیروگاههای حرارتی با روش الگوریتم ژنتیک با هدف می نیمم سازی هزینه اقتصادی تولید و نیز آلودگی ناشی از سوخت های فسیلی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین با سایر روشهای متداول مانند روش ضرائب لاگرانژ و برنامه ریزی پویا مقایسه گردید. نتیجه این مقایسه، کارآمدی و توانایی روش الگوریتم ژنتیک در حل مسائل عملی و حقیقی است. در ادامه تحقیقات می توان برنامه ریزی واحدهای آبی را نیز مورد تحقیق قرار داده و با تلفیق با این روش، مدل برنامه ریزی و هماهنگی نیروگاههای حرارتی و برق آبی را ارائه نمود.

- [1] Wood, A.J. and B.F. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [2] Chen, C.L. and S.C. Wang, "Branch-and bound scheduling for thermal generating units", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 8, No. 2, pp. 184-189, June 1993.
- [3] Goldberg, D.E. "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, 1989.
- [4] Davis, L., *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1991
- [5] Holland, J.H., "Outline for a logical theory of adaptive systems", J. Anoc. Comput. Mach., pp. 297-314, July 1962.
- [6] Petridis, V., Kazarlis, S., Papaikonomou, A., and Felelis, A., "A hybrid genetic algorithm for training neural networks", Proceedings of ICANN 92, Brighthon, pp. 953-956, September 1992.
- [7] Petridis, V., Kazarlis, S., Papaikonomou, A., "A genetic algorithm for training recurrent neural networks", Proceedings of IJCNN 93, Nagoya, Japan, September 1992.
- [8] El-Keib, H. Ma., R. E. Smith, "A genetic algorithm-based approach to economic dispatch of power systems", IEEE Trans. On Power Systems , pp. 212-216, 1994.
- [9] Sheble, G. B., K., Brittig, "Refined genetic algorithm- economic dispatch example", IEEE Trans. On Power Systems , Vol. 10, No. 1, pp. 117-124, February 1995.
- [10] Chen, P., H., Chen, "Large-Scale economic dispatch by genetic algorithm", IEEE Trans. On Power Systems , Vol. 10, No. 4, pp. 1919-1926, November 1995.
- [11] Liang, Z. X., and Glover J.D. "A zoom feature for a dynamic programming to economic dispatch including transmission losses", IEEE Trans., pp. 544-540, 1992.
- [12] Wilde, P. J., Beightler, C. S., *Foundation of Optimization*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1967.
- [13] Wismer, D. A., *Optimization Methods for Large-Scale Systems With Applications*, McGraw-Hill, New York, 1971.
- [14] Gen, M., Cheng, R., "Genetic Algorithms and Engineering Design", Wiley-Interscience Publication, 1996.

[۱۵] کرباسی، عبدالرضا، و دیگران، "انرژی و محیط زیست"، معاونت امور انرژی وزارت نیرو، ۱۳۷۶

[۱۶] "جرائم زیست محیطی"، معاونت امور انرژی وزارت نیرو، ۱۳۸۰