فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال پنجم / شماره ۱۶/ بهار ۱۳۸۷/ صفحات ۱۱۰ -۸۱

مدل‌سازی سیاست‌گذاری انرژی با ملاحظات فنی، اقتصادی و اجتماعی: به‌کارگیری الگوریتم ژنتیکی مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب نخبه‌گرا در مطالعهٔ موردی موضوع تخصیص منابع

مرتضی محمدی اردهالی

دانشیار و مدیر آزمایشگاه سیستمهای انرژی، دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
ardehali@aut.ac.ir

امیر ادهم

کارشناس ارشد مهندسی سیستمهای انرژی - شرکت ملی گاز ایران

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/۹ تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۶

چکیده

سیاست‌گذاری صحیح در حوزهٔ انرژی برای دست‌یابی به اهداف توسعهٔ پایدار، مستلزم منظورکردن طیف متنوعی از ملاحظات سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است. از سوی دیگر منابع انرژی و فن‌آوری‌های در دسترس، محدودند. به دلیل پیچیدگی عوامل مؤثر بر فرایند تصمیم‌سازی، استفاده از روش‌های مدل‌سازی در بخش انرژی از اهمیت خاصی برخوردار است. متأسفانه روش‌های سنتی مدل‌سازی سیستم‌های انرژی پاسخ‌گوی نیازها و اهداف چندگانه نبوده و قابلیت کافی در هدایت سیستم‌ها به نقطهٔ بهینهٔ مطلوب را ندارند. توسعهٔ الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه و به‌کارگیری روزافزون آن‌ها در حل مسائل مهندسی، انگیزهٔ انجام این مطالعه در بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی بر مبنای اهداف چندگانه، متعارض و غیرهم‌مقیاس، بوده است. در این مقاله، با استفاده از الگوریتم ژنتیکی مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب نخبه‌گرا، مسئلهٔ تخصیص منابع به‌عنوان نمونه در نظر گرفته شده و مورد مدل‌سازی و تحلیل نتایج قرار گرفته است. مطالعهٔ حاضر نشان می‌دهد که به‌کارگیری روش‌های تصمیم سازی پس از جستجو، بر مبنای بهینه‌سازی چندهدفه، ضمن ایجاد امکان تحلیل تعادل اهداف چندگانه، متعارض و غیرهم‌مقیاس در سیستم‌های انرژی، قدرت سیاست‌گذاران را در پیش‌بینی و بهبود نتایج حاصل از تصمیمات متفاوت، افزایش داده و آنان را در اتخاذ سیاست‌های مناسب‌تر، حمایت می‌کند. ادامهٔ تحقیقات در زمینهٔ به‌کارگیری سایر روش‌های نوین بهینه‌سازی در تحلیل سیستم‌های انرژی، توصیه شده است.

طبقه‌بندی JEL : Q41, D61, C88, C63, C61, C53

کلید واژه: سیاست‌گذاری انرژی، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک، تخصیص منابع

۱- مقدمه

منابع ارزان و در دسترس انرژی به همراه محیط زیست سالم، از جمله مهم‌ترین عوامل دست‌یابی به توسعهٔ پایدار عنوان شده‌اند (افغان و همکاران[1]، ۱۹۹۸). رشد سریع تولید و مصرف انرژی، موجب برجای ماندن اثرات سوء کوتاه مدت و بلند مدتی نظیر آلودگی محیط زیست و فرسایش منابع می‌شود (دینسر و روسن[2]، ۱۹۹۹). به موضوعات زیست‌محیطی شناخته شده در حوزهٔ انرژی، به‌صورت محدودیت‌های بالقوهٔ اجتماعی نگریسته می‌شود، چرا که انتشار گازهای آلاینده علاوه بر اثرات منفی بهداشتی و زیست‌محیطی، موجب افزایش نگرانی‌ها و فشارهای اجتماعی بر فرایندهای تصمیم‌سازی در بخش انرژی شده است. هم‌چنین بالا بودن متوسط قیمت نفت خام در سال‌های اخیر، توسعه و رشد اقتصادی کشورهای جهان را با چالش جدی روبرو کرده است. جنبه‌های روانی و اثرات اجتماعی افزایش قیمت‌ها، تلاش‌ها برای کاهش نقش انرژی در اقتصاد را افزایش داده است. به دلیل طبیعت محدود ذخایر فسیلی و آلاینده بودن آن‌ها، بهره‌برداری پربازده از ذخایر موجود در کنار توسعهٔ به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (مورلاتوس وهمکاران[3]، ۱۹۹۸). از آن‌جا که بیش‌تر منابع انرژی مورد استفاده، هزینه‌بر، ناپایدار و دارای اثرات نامطلوب زیست‌محیطی هستند، منطقی است که با افزایش راندمان انرژی، این اثرات کمینه شود. بدین ترتیب برای سطح خدمات و تولیدات یکسان، انرژی کمتری مصرف می‌شود (وال و گنگ[4]، ۲۰۰۱). نقش مهم فن‌آوری در فرایندهای تولید، توزیع و مصرف انرژی و هم‌چنین بالا بودن عمر متوسط و سرمایهٔ مورد نیاز اکثر فن‌آوری‌های مورد استفاده، بر لزوم توجه به آن در سیاست‌گذاری تأکید می‌کند. با توسعهٔ فن آوری‌های متنوع و گوناگون تولید و تبدیل انرژی، انتخاب درست فن‌آوری باید بر اساس مطالعات مدون انجام گیرد. چراکه تغییرات فن‌آوری می‌تواند موجب تأمین نیازهای بیش‌تر، بدون افزایش در انرژی ورودی سیستم شده و هزینه‌های اقتصادی و آلایندگی آن را کاهش دهد (مانزینی ومارتینز[5]، ۱۹۹۹).

---

1 - Afghan et al
2 - Dincer & Rosen
3 - Mourelatos et al
4 - Wall& Gong
5 - Manzini & Martinez

موضوعات ذکر شده ارکان سیاست‌گذاری بهینه در بخش انرژی را با توجه به شرایط اجتماعی، متغیرهای اقتصادی و عوامل فنی و فن‌آوری، معین می‌کند. سیاست‌گذاران برای دست‌یابی به اهداف توسعهٔ پایدار، باید منابعی را به خدمت بگیرند که ضمن ارزان و در دسترس بودن، کم‌ترین خسارات زیست‌محیطی را به همراه داشته و در حداکثر بازدهی ممکن نیازهای جوامع را مرتفع کنند. به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر مستلزم صرف هزینه‌های اقتصادی و سرمایه‌گذاری بالا بوده و نیز افزایش سهم ذخایر فسیلی در سبد انرژی مصرفی موجب افزایش خسارات زیست‌محیطی می‌شود. گستردگی و پیچیدگی موضوعات مرتبط با مقولهٔ انرژی، انگیزهٔ توسعهٔ روش‌های مدل‌سازی عددی و تحلیلی گوناگون با هدف کمک به فرایند تصمیم‌سازی بوده است. به این ترتیب که به‌وسیلهٔ تنظیم معادلات تحلیلی و توسعهٔ مدل‌های عددی و با دانستن اهداف تصمیم‌ساز، تصمیمات مقتضی در جهت دست‌یابی به شرایط بهینه تعیین می‌شوند.

هدف اصلی از مدل‌سازی در مهندسی، ایجاد قدرت پیشگویی و تحلیل رفتار سیستم‌های حقیقی در شرایط متفاوت و توانایی تنظیم متغیرهای تصمیم در دست‌یابی به شرایط مطلوب است. به دلیل چند معیاره بودن و تعارض در اهداف قابل پی‌گیری در بخش انرژی، روش‌های سنتی مدل‌سازی و بهینه‌سازی فاقد کارآیی لازم در این زمینه‌اند. از این رو باید مفهوم بهینگی، متفاوت و شیوهٔ خاصی از مدل‌سازی در مقولهٔ انرژی مورد استفاده قرار گیرد تا طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی به‌سمت دست‌یابی به وضعیت بهینهٔ مطلوب هدایت شود(ادهم[1]، ۲۰۰۵). چالش اساسی در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه از آن‌جا ناشی می‌شود که به ندرت یک دسته تصمیم از مجموعهٔ تصمیمات ممکن وجود دارد که همهٔ اهداف را به‌طور هم‌زمان و در حداکثر ممکن بهینه سازد. در چنین حالتی بهینگی دارای تعریف ویژه‌ای بوده و به جای وجود یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه قابل دست‌یابی است.

روش‌های بهینه‌سازی به دو دستهٔ عمدهٔ گرادیانی[2] و غیرگرادیانی قابل تقسیم‌بندی‌اند (اندرسون[3]، ۱۹۹۹). روش‌های غیرگرادیانی به دلیل عدم نیاز به اطلاعات دربارهٔ مشتق تابع هدف، برای حل مسائل عمومی مهندسی مناسب‌تر هستند. الگوریتم‌های تکاملی و ژنتیکی در زمرهٔ مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های غیرگرادیانی

1 - Adham.
2- Gradient (Derivative) Method.
3 - Andersson.

بهینه‌سازی محسوب می‌شوند. با توسعهٔ روش‌های محاسباتی قدرتمند و هم‌چنین پیشرفت در زمینه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، به‌کارگیری مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه در علوم مختلف، رشد چشم‌گیری داشته است. الگوریتم‌های تکاملی در کنار شبکه‌های عصبی[1] و سیستم‌های فازی[2]، مجموعه‌ای از روش‌های محاسباتی را تشکیل می‌دهند که به هوش محاسباتی[3] یا محاسبهٔ نرم[4] شهرت یافته‌اند. تفاوت‌های الگوریتم‌های تکاملی با روش‌های قراردادی، جستجو و بهینه‌سازی آن‌ها را برای بهینه‌سازی چندهدفه مناسب می‌کند. برخی از مهم‌ترین این تفاوت‌ها به شرح زیرند (کوئلو[5]، ۱۹۹۹ و کوئلو و همکاران، ۲۰۰۲):

- الگوریتم‌های تکاملی، هم‌زمان دسته‌ای از جواب‌های ممکن را بررسی کرده و اجازه می‌دهند که مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه در یکبار اجرای الگوریتم به‌دست آیند. در این روش به‌جای یک نقطه، جمعیتی از نقاط به‌صورت موازی جستجو می‌شوند، بنابراین امکان تولید تعدادی از جواب‌های بالقوه برای مسائل ایجاد می‌شود.
- به‌کارگیری الگوریتمهای تکاملی عموماً صریح تر و راحت‌تر است، چرا که محدودیتی در شکل توابع هدف مورد نظر وجود ندارد. الگوریتم‌های تکاملی حساسیت کم‌تری نسبت به شکل یا خواص جبههٔ نقاط بهینه دارند. به‌عنوان مثال پیوسته یا ناپیوسته بودن، کوژ[6] یا کاو بودن[7] و خطی یا غیرخطی بودن آن تأثیری در کارآیی روش‌های تکاملی ندارند.
- الگوریتم‌های تکاملی نیازی به اطلاعات دربارهٔ مشتق و رفتار توابع هدف و سایر اطلاعات کمکی ندارند. تنها خود توابع هدف و سطح ارزندگی[8] مورد نظر در جهت‌گیری جستجو مؤثرند.

موارد مذکور از مشکلات اصلی در روش‌های کلاسیک برنامه‌ریزی ریاضی محسوب می‌شوند. به این ترتیب با به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی چندهدفه، اطلاعات کافی دربارهٔ راه حل‌های بهینهٔ ممکن به‌دست می‌آید. سپس تصمیم‌ساز با

1- Neural Networks.
2- Fuzzy Systems.
3- Computional Intelligence.
4- Soft Computing.
5 - Coello.
6- Convex.
7- Concave.
8- Fitness Level.

تحلیل این طیف گسترده از جواب‌ها، نقطهٔ بهینهٔ مطلوب را انتخاب می‌کند. در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیکی «مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب نخبه‌گرا»، مسئله تخصیص منابع به‌عنوان نمونه در نظر گرفته شده و مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار گرفته است. مطالعهٔ حاضر نشان می‌دهد که به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌سازی پس از جستجو، بر مبنای بهینه‌سازی چندهدفه، ضمن ایجاد امکان تحلیل تعادل اهداف چندگانه، متعارض و غیرهم‌مقیاس در سیستم‌های انرژی، قدرت سیاست‌گذاران را در پیش‌بینی و بهبود نتایج حاصل از تصمیمات متفاوت، افزایش داده و آنان را در اتخاذ سیاست‌های مناسب‌تر حمایت می‌کند.

در ادامه، بخش ۲ ادبیات موضوع، بخش ۳ تحلیل موضوع و معادلات حاکم، بخش ۴ توسعه مدل، بخش ۵ نتایج و در نهایت بخش ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌گردد.

۲- ادبیات موضوع

روش‌های تحلیلی و عددی متنوعی در ادبیات موضوع مدل‌سازی سیستم‌های انرژی پیشنهاد شده‌اند. بیش‌تر مطالعات اخیر با استفاده از مدل‌های چندهدفه انجام پذیرفته است. از آن جمله می‌توان به تحلیل مسئلهٔ تخصیص منابع در کشور لبنان، با روش برنامه‌ریزی آرمانی چندهدفه توسط مژر و همکاران[1] (۱۹۹۸) اشاره کرد. هم‌چنین چو[2] (۱۹۹۹)، ضمن به‌کارگیری روش تصمیم‌سازی چند هدفهٔ تعاملی[3] (تصمیم سازی در حین جستجو)، به سیاست‌گذاری اقتصادی و زیست‌محیطی انرژی پرداخته است. در همین راستا کورونئوس و همکاران[4] (۲۰۰۴) نیز مطالعه‌ای موردی در زمینهٔ بهینه‌سازی چندهدفهٔ سیستم‌های انرژی با تأکید بر مفهوم بهینگی پارتو انجام داده‌است.

همان‌طورکه اشاره شد، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در حل مسائل چند هدفه در یک دههٔ اخیر رشد بسیار سریعی داشته است. طی مطالعه‌ای فوجیتا و همکاران[5] (۱۹۹۸)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک[6]، پارامترهای طراحی در موتورهای درون‌سوز را با توجه به اهداف فنی - زیست‌محیطی مورد بهینه‌سازی قرار داده است. به‌طور مشابه

1 - Mezher et al.
2 - Cho.
3- Interactive Multiobjective Decision Method.
4 - Koroneos et al.
5 - Fujita et al.
6- Genetic Algorithm (GA).

بهینه سازی چندهدفهٔ مصرف سوخت و میزان آلایندگی موتورهـای دیزلـی نیـز توسـط هیرویاسو و همکاران[1] (۲۰۰۲)، انجام گرفته است. توزیع انرژی الکتریکی در شبکه‌هـای انتقال قدرت یا دیسپاچینگ به‌وسیلهٔ الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه و با توجه با اهـداف اقتصادی و زیست‌محیطی به‌طور جداگانه توسـط تسـی و همکـاران[2] (۲۰۰۱) و آبیـدو[3] (۲۰۰۱)، مورد بررسی قرار گرفته است. با به‌کارگیری الگـوریتم‌هـای ژنتیـک، بررسـی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های تولید هم‌زمان (CHP) با هدف کنترل گازهـای آلاینـده در طراحی ژنراتورها به‌وسـیلهٔ تسـی(۲۰۰۳) انجـام پذیرفتـه اسـت. هـم‌چنـین توفولـو ولازراتو[4](۲۰۰۲) و لازراتو و توفولو(۲۰۰۴)، نشان دادند که چگونـه پارامترهـای طراحـی در یک سیستم حرارتی را می‌توان با توجه به اهداف فنی، اقتصـادی و زیسـت‌محیطـی و به کمک الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه، بهینه‌سازی کرد.

ایدهٔ استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در یـک مسـئلهٔ چندهدفـه[5]، اولـین بـار توسـط روزنبرگ[6] (۱۹۶۷) و در قالب استفاده از خواص چندگانـه[7] در جسـتجوی ژنتیکـی ارائـه شد. با این وجود، نخستین کاربرد عملی این پیشـنهاد بـه‌وسـیلهٔ شـافر[8] (۱۹۸۴) انجـام گرفـت (زیتزلـر[9]، ۱۹۹۹). پـس از آن روش‌هـای مختلفـی بـه منظـور بـه‌کـارگیری الگوریتم‌های ژنتیکی در مسـائل بهینـه‌سـازی چندهدفـه پیشـنهاد شـده اسـت. مفهـوم بهینگی پارتو که اولین بار پرتو[10] (۱۸۹۷)، به آن اشاره کرد، توسط گلدبرگ[11] (۱۹۸۹)، در الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه به‌کارگرفته شده است. او ادبیـات موضـوع، روش‌هـا و مفاهیم الگوریتم‌های ژنتیکی را تشریح کرده اسـت. آن دسـته از الگـوریتم‌هـای تکـاملی چندهدفه که مفهوم بهینگی پارتو در توسعهٔ آن‌ها به‌کارگرفته شده اسـت، تحـت عنـوان روش‌های پارتویی[12] شناخته می‌شوند. برخی از مهم‌ترین الگوریتم‌هـای تکـاملی توسـعه یافته عبارتند از:

1 - Hiroyasu et al.
2 - Tsay et al.
3 - Abido.
4 - Toffolo & Lazzaretto .
5- Multi-objective Evolutionary Algorithms (MOEAs).
6 - Rosenburg.
7- Multiple Properties.
8 - Schaffer.
9 - Zitzler.
10 - Vilfredo Pareto.
11 - Goldberg.
12 - Pareto Based Methods.

- MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithm (Fonseca & Fleming, 1993)
- NSGA: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (Srinivas & Deb, 1994)
- NPGA: Niched Pareto Genetic Algorithm (Horn & Nafpliotis, 1993)
- SPEA: Strength Pareto Genetic Algorithm (Zitzler & Thiele, 1998)
- PAES: Pareto Archived Evolution Strategy (Knowles & Corne, 1999)
- SPEA2: Strength Pareto Genetic Algorithm2 (Zitzler et al, 2001)
- NSGA-II: Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (Deb et al, 2002)

به استثنای روش MOGA، که یک روش غیرپارتویی محسوب می‌شود، سایر روش‌ها بر مبنای مفهوم غلبهٔ پارتو توسعه یافته‌اند. تفاوت اصلی الگوریتم‌های تکاملی ذکر شده در سه مسئلهٔ عمدهٔ تخصیص ارزندگی[1]، هم‌گرایی[2] به جبههٔ جواب‌های بهینه و حفظ توزیع جواب‌ها[3] در طول جبههٔ بهینهٔ پارتو خلاصه می‌شود. مزایا و معایب هر کدام از الگوریتم‌های مذکور به‌طور مشروح در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته است. روش «مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب نخبه‌گرا» یا (NSGA-II)، که توسط دب و همکاران[4] (۲۰۰۲) ارائه شده است، تکامل یافتهٔ روش NSGA است. این الگوریتم ضمن افزایش سرعت محاسبه، عیوب روش قبلی از قبیل نیاز به تعیین شعاع قلمرو[5] و عدم نگهداری جواب‌های نامغلوب در مجموعهٔ نخبه[6] را پوشش داده است. به‌دلیل سادگی اجرا و کیفیت خوب جبههٔ جواب‌های بهینهٔ تولید شده، این روش به‌عنوان الگوریتم محاسباتی در مطالعهٔ حاضر برگزیده شده است و در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

۳- تحلیل موضوع و معادلات حاکم

الگوریتم‌های تکاملی که از جمله روش‌های جستجوی تصادفی[7] هستند، از نظریهٔ تکامل طبیعی «داروین» ایده‌برداری شده‌اند. این الگوریتم‌ها بر روی جمعیتی از جواب‌های بالقوه عمل کرده و با به‌کارگیری «اصل بقای اصلح[8]»، تقریب‌های بهتری از حل مورد نظر به‌دست می‌دهند (اندرسون ۱۹۹۹). در هر تولید نسل یا زایش[9]، مجموعه‌ای از تقریب‌ها بر حسب درجهٔ ارزندگی آن‌ها گزینش می‌شوند. این تقریب‌ها با

1- Fittness Assignment.
2- Convergence.
3- Preserving Diversity.
4 - Deb et al.
5- Sharing Parameter.
6- Elite Set.
7- Stochastic Search.
8- Survival of the Fittest.
9- Generation.

استفاده از عملگرهایی که از فرایندهای ژنتیکی طبیعی برگرفته شده‌اند، نسل جدیدی از جواب‌ها را به‌وجود می‌آورند. روند فوق به سمت تکامل جمعیت جواب‌هایی هدایت می شود که با تابع هدف تناسب و تطبیق بیش‌تری دارند. به این ترتیب تابع هدف نقش محیط‌زیست را ایفا می‌کند. درحقیقت الگوریتم‌های تکاملی، فرایندهای طبیعی مانند گزینش[1]، بازآفرینش[2]، جهش[3] و غیره را مدل‌سازی می‌کنند.

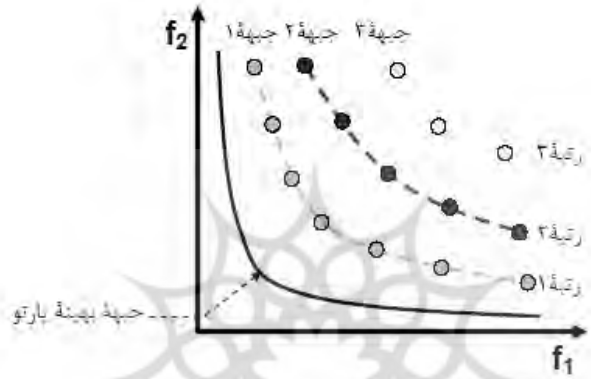
بخشی از الگوریتم‌های تکاملی که از عملگرهای ژنتیکی[4] استفاده می‌کنند، الگوریتم‌های ژنتیکی نامیده می‌شوند. اولین بار، الگوریتم ژنتیکی توسط هالند[5] (۱۹۷۵) ارائه شد. در الگوریتم‌های ژنتیکی هر جواب ممکن توسط دنباله‌ای از ژن‌ها که کروموزوم[6] نام دارد، نمایش داده می‌شود. یک جمعیت انتخابی از کروموزوم‌ها جامعه[7] نامیده شده و هر جامعه در مقطع زمانی خاص یک نسل خوانده می‌شود. پس از تعریف تابع هدف، جامعهٔ آغازین تولید می‌شود. این جمعیت آغازین ارزیابی شده و به هر کدام از کروموزوم‌ها رتبه‌ای بر اساس درجهٔ ارزندگی[8] آن‌ها تخصیص می‌یابد. در صورت عدم ارضای معیار مورد نظر مسئله، چرخهٔ تولید نسل با هدف بهبود جواب‌ها انجام می‌گیرد. این چرخه شامل مراحل گزینش، پیوند و جهش است. کروموزوم‌ها بر حسب رتبهٔ کسب شده، گزینش شده و وارد مرحلهٔ پیوند می‌شوند. در مرحلهٔ پیوند، کروموزوم‌های برگزیده (والدین)، کروموزوم‌های فرزند را تولید می‌کنند. این جواب‌ها به منظور تکمیل چرخهٔ تولید نسل وارد مرحلهٔ جهش شده و جامعهٔ جدید را تشکیل می‌دهند. بنابر این طبق موارد مذکور، هر الگوریتم ژنتیک لزوماً باید موارد ذیل را پوشش دهد (گلدبرگ، ۱۹۸۹):

- نمایش کروموزومی[9] جواب‌های ممکن
- تولید جمعیت آغازین
- تابع ارزیابی به منظور رتبه‌بندی جواب‌ها بر حسب ارزندگی آن‌ها

1- Selection.
2- Recombination.
3- Mutation.
4- Genetic Operators.
5 - Holland.
6- Chromosome.
7- Population.
8- Fitness Value.
9- Chromosome Representation.

- عملگرهای ژنتیکی برای ترکیب و تغییر ساختار کروموزوم‌ها
- سایر عملگرهای مورد نیاز مانند اندازهٔ جمعیت، احتمال جهش، احتمال پیوند و غیره.

در الگوریتم «مرتب‌سازی جوابهای نامغلوب» یا NSGA، مجموعهٔ جواب‌ها بر اساس مفهوم غلبهٔ پارتو به لایه‌های نامغلوب، دسته‌بندی می‌شوند. سپس به هرکدام از لایه‌ها یک ارزندگی مجازی تخصیص یافته و فرایندهای گزینش، بازآفرینش و جهش بر اساس



شکل۱ - دسته‌بندی جواب ها به لایه‌های نامغلوب در روش NSGA [۲۳]

این ارزندگی مجازی انجام می‌گیرند. ارزندگی مجازی تخصیص یافته به هر عضو برابر با شمارهٔ لایه‌ای است که در آن قرار دارد. به این ترتیب رتبهٔ اعضای نامغلوب که در اولین جبهه قرار دارند، یک است (سرینیواس و دب[1]،۱۹۹۴). شکل (۱)، به‌صورت شماتیک دسته‌بندی جواب‌ها به لایه‌های نامغلوب را نشان می‌دهد. در این الگوریتم فرایند بازآفرینش بر اساس کم‌ترین ارزندگی مجازی و طی انتخاب مسابقه‌ای دودویی[2] انجام می‌گیرد (سرینیواس و دب،۱۹۹۴). بنابراین اعضای جبههٔ نامغلوب دارای بیش‌ترین احتمال بازآفرینش در نسل بعدی هستند. الگوریتم فوق از روش اشتراک ارزندگی و قلمروسازی[3] برای حفظ توزیع جواب‌ها استفاده می‌کند(سرینیواس و دب،۱۹۹۴). الگوریتم تکاملی NSGA، در مقایسه با سایر روش‌ها نتایج بسیار خوبی به دست داده است، اما دارای اشکالاتی است که از آنجمله می‌توان پیچیدگی محاسباتی[4] بالا، عدم

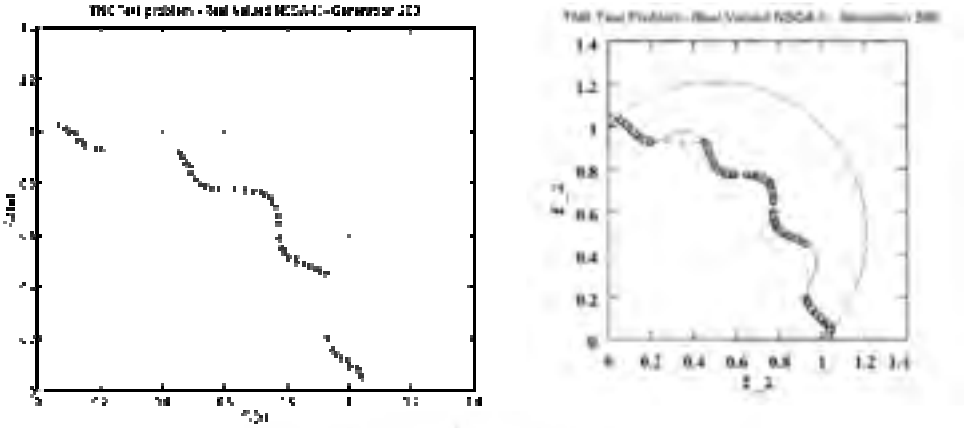
1 - Srinivas & Deb.
2- Binary Tournament Selection.
3- Niched Fitness Sharing Technique.
4- Computional Complexity.

نگهداری جواب‌های نامغلوب در مجموعهٔ نخبه و نیاز به تعیین شعاع قلمرو را نام برد (کوئلو و همکاران، ۲۰۰۲ و دب و همکاران ۲۰۰۲). الگوریتم NSGA-II با هدف بهبود الگوریتم NSGA و پوشش ضعف‌های آن توسعه یافته است. روش «مرتب سازی سریع جواب‌های نامغلوب[1]»، پیچیدگی محاسباتی و زمان لازم برای لایه‌بندی جواب‌ها را کاهش داده است. هم‌چنین مجموعهٔ نخبه که جواب‌های نامغلوب را در خود نگهداری می‌کند، کارآیی و هم‌گرایی الگوریتم را افزایش داده است. در ضمن «عملگر مقایسهٔ ازدحام[2]» بدون نیاز به تنظیم توسط کاربر، توزیع جواب‌ها را در طول جبههٔ پارتو حفظ می‌کند (سرینیواس و دب،۱۹۹۴). در این مقاله از تشریح بیش‌تر جزئیات روش فوق چشم پوشی شده است. به منظور ارزش‌گذاری و مقایسهٔ عملکرد الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه، توابع محک متعددی در ادبیات موضوع پیشنهاد شده است (زیتزلر و همکاران، ۲۰۰۱ و دب و همکاران ۲۰۰۲). بر این اساس قبل از تحلیل مسئلهٔ تخصیص منابع توسط کدهای توسعه یافته در این مطالعه، به درستی آزمایی آن‌ها در حل مسائل محک پرداخته می‌شود. چنان‌که در شکل (۲) نیز آمده است، جبههٔ جواب‌های بهینهٔ تولید شده توسط نرم‌افزار مورد استفاده، دارای سطح قابل قبول از نظر سرعت و دقت است. در ادامه به استفاده از الگوریتم مذکور در بهینه‌سازی سیستم انرژی مورد مطالعه پرداخته خواهد شد.

۴- توسعهٔ مدل

به منظور بررسی روش پیشنهادی، مسئلهٔ تخصیص منابع به‌عنوان مطالعهٔ موردی در نظر گرفته می‌شود. مسئلهٔ مذکور شامل یک سیستم انرژی با هشت منبع انرژی و سه مصرف نهایی است. داده‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ترکیبات مختلف منابع مصارف نهایی در سیستم انرژی مورد نظر در جدول(۱) تشریح شده‌اند. این جدول

1- Fast Non-dominated Sorting Approach.
2- Crowded-Comparison Operator.



شکل۲ -جبههٔ جواب های بهینه در حل مسئلهٔ محک TNK با ۱۰۰ کروموزوم اولیه
سمت راست: مطالعهٔ Deb et al[28] — سمت چپ: نرم افزار توسعه یافته در مطالعهٔ حاضر

شامل میزان بازدهی، هزینهٔ اقتصادی و مقدار انتشار گاز دی‌اکسیدکربن به ازای جابه‌جایی یک واحد انرژی در هر کدام از ترکیبات منابع - مصارف نهایی است. مقادیر Z1 تا Z8 بیانگر ظرفیت هرکدام از منابع مورد نظر بوده و C1 تا C3 نشان دهندهٔ میزان تقاضا در بخش‌های مصرف نهایی هستند. متغیرهای تصمیم یا جریان‌های انرژی متناظر با هرکدام از ترکیبات منابع - مصارف نهایی در جدول (۲) نام‌گذاری شده‌اند. به منظور یافتن مجموعهٔ نقاط بهینه در سیستم انرژی مفروض، یک مدل سه هدفه با توجه به محدودیت‌های بخش منابع، بخش تقاضا و هم‌چنین محدودیت‌های فنی توسعه داده می‌شود. به این ترتیب مسئلهٔ فوق دارای یازده محدودیت (سه محدودیت در بخش تقاضا و هشت محدودیت در بخش منابع) بوده و دارای ۲۴ متغیر تصمیم است. اهداف کاهش هزینه‌های اقتصادی، کاهش انتشار کربن و افزایش راندمان انرژی بر اساس متغیرهای تصمیم، تعریف شده‌اند معادلات (۲) تا (۴) توابع هدف مذکورند. هم‌چنین معادلات (۵) تا (۷) محدودیت‌های تأمین تقاضا و معادلهٔ (۸) محدودیت‌های ظرفیت منابع را بیان می‌کنند. مسئلهٔ مورد نظر تحت سناریوهای متفاوت مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. در هر کدام از سناریوهای مذکور، متغیرهای Z1 تا C3 مقادیر متفاوتی می‌پذیرند. این مقادیر در جدول (۳) ذکر شده‌اند. در سناریو۱ فرض شده است که هیچ‌گونه محدودیتی در ظرفیت‌سازی منابع انرژی وجود ندارد. بنابراین ظرفیت منظور شده برای هر کدام از منابع برای پوشش دادن تمامی مصارف نهایی کافی است. در

سناریوی ۲ و با هدف ایجاد تنوع در سبد مصرفی انرژی و افزایش امنیت عرضه، محدودیت ظرفیت‌سازی اعمال شده است. به این ترتیب ظرفیت هیچ‌کدام از منابع به تنهایی توانایی پوشش حتی یک مصرف نهایی را ندارد. سناریوی ۳ نیز حالتی خاص است که در آن دسترسی به منابع انرژی محدود است. نتایج عددی این مدل‌سازی در ادامه آمده است.

(۱) بردار تصمیم جریان‌های انرژی $X=(x_1, x_2, ..., x_{24})$

(۲) کمینه‌سازی تابع هزینهٔ کلی سیستم $\text{Minimize } cost(X)=\sum_{i=1}^{24} x_i c_i$

(۳) کمینه‌سازی تابع میزان آلایندگی سیستم $\text{Minimize } emission(X)=\sum_{i=1}^{24} x_i e_i$

(۴) بیشینه‌سازی تابع راندمان کلی سیستم $\text{Maximize } \eta_{Overal}(X)=\frac{\sum_{i=1}^{24} x_i}{\sum_{i=1}^{24} \frac{x_i}{\eta_i}}$

Subject to:

(۵) محدودیت تأمین تقاضای روشنایی $\sum_{i=1}^{8} x_i \geq C_1$

(۶) محدودیت تأمین تقاضای گرمایش $\sum_{i=9}^{16} x_i \geq C_2$

(۷) محدودیت تأمین تقاضای پخت‌وپز $\sum_{i=17}^{24} x_i \geq C3$

(۸) محدودیت ظرفیت منابع هشت‌گانه $x_i + xi + 8 + x_{i+16} \leq Z_i \ , i=1,2,3,...,8$

جدول ۱ -مشخصات فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ترکیبات مختلف منابع -مصارف نهایی[۱۰]

مصرف نهایی	روشنایی			گرمایش			پخت و پز		
منبع	بازده η_i(%)	هزینه c_i($/kWh)	آلایندگی e_i($kgCo_2$/kWh)	بازده η_i(%)	هزینه c_i($/kWh)	آلایندگی e_i($kgCo_2$/kWh)	بازده η_i(%)	هزینه c_i($/kWh)	آلایندگی e_i($kgCo_2$/kWh)
بیوگاز[۱]	۰/۸۸	۰/۰۰۳۸	۹/۴۵۲	۵۲/۸	۰/۰۰۳۸	۰/۱۸۹	۴۴	۰/۰۰۳۸	۰/۱۸۹
نیروگاه خورشیدی[۲]	۴/۸	۰/۲	۰	۷/۲	۰/۲	۰	۱۲	۰/۲	۰
فتوولتائیک	۶	۰/۵	۰	۹	۰/۵	۰	۱۲	۰/۵	۰
نیروگاه بادی	۱۴	۰/۰۷	۰	۲۱	۰/۰۷	۰	۲۸	۰/۰۷	۰
نیروگاه برق‌آبی	۳۴	۰/۰۹۱۲	۰	۵۱	۰/۰۹۱۲	۰	۶۸	۰/۰۹۱۲	۰
ژنراتور دیزلی[۳]	۱۴	۰/۱۳	۰/۵۱۵	۲۱	۰/۱۳	۰/۳۴	۲۸	۰/۱۳	۰/۲۵۵۲۵
نیروگاه بخار[۴]	۱۲/۸	۰/۱۱۴	۰/۳۸۳	۱۹/۲	۰/۱۱۴	۰/۲۵۶	۲۵/۶	۰/۱۱۴	۰/۱۷۶
گاز طبیعی[۵]	-	-	-	۵۴	۰/۰۳۰۸	۰/۱۰۹	۴۵	۰/۰۳۰۸	۰/۱۰۹

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱ -تشکیل شده از مخلوط گازهای CH4 و CO2.

۲ -نیروگاه خورشیدی حرارتی با ظرفیت ۱۰۰ تا ۲۰۰ مگاوات.

۳ -خوراک سوخت دیزل با ارزش حرارتی 43.82 MJ/kg.

۴ -خوراک گاز طبیعی.

۵ -تشکیل شده از ۹۳/۳۵٪ متان، اتان، پروپان و دی‌اکسید کربن و با ارزش حرارتی 39.47 MJ/m3.

جدول۲ - نام گذاری متغیرهای تصمیم (جریان‌های انرژی) در ترکیبات مختلف منابع – مصرف نهایی

پخت و پز	گرمایش	روشنایی	مصارف نهایی / منابع	
C_3(MWh)	C_2(MWh)	C_1(MWh)		
x_{17}	x_9	x_1	Z_1(MWh)	بیوگاز
x_{18}	x_{10}	x_2	Z_2(MWh)	نیروگاه خورشیدی
x_{19}	x_{11}	x_3	Z_3(MWh)	فتوولتائیک
x_{20}	x_{12}	x_4	Z_4(MWh)	نیروگاه بادی
x_{21}	x_{13}	x_5	Z_5(MWh)	نیروگاه برق‌آبی
x_{22}	x_{14}	x_6	Z_6(MWh)	ژنراتور دیزلی
x_{23}	x_{15}	x_7	Z_7(MWh)	نیروگاه بخار
x_{24}	x_{16}	x_8	Z_8(MWh)	گاز طبیعی

جدول۳ - مقادیر مفروض برای ظرفیت منابع و مقدار تقاضای انرژی در سناریوهای مختلف

C_3	C_2	C_1	Z_8	Z_7	Z_6	Z_5	Z_4	Z_3	Z_2	Z_1	متغیر / سناریو
۵۰	۵۰	۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	سناریو ی ۱ (عدم محدودیت در ظرفیت‌سازی)
۵۰	۵۰	۵۰	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	سناریوی ۲ (تنوع منابع انرژی- امنیت عرضه)
۵۰	۵۰	۵۰	۰	۱۵۰	۱۵۰	۰	۰	۰	۱۵۰	۰	سناریوی ۳ (دسترسی به منابع محدود)

۵- نتایج

سیستم انرژی مورد مطالعه بر مبنای الگوریتم تکاملی NSGA-II و با استفاده از نرم‌افزار طراحی شده مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفت. این فرایند برای تمامی سناریوها و به‌صورت تک‌هدفه و چندهدفه انجام پذیرفته است. بهینه‌سازی تک‌هدفه بر اساس کمینه‌سازی تابع هزینه انجام شده است. در بهینه‌سازی دوهدفه توابع هزینه و آلایندگی وارد مدل شده‌اند. در نهایت در بهینه‌سازی سه‌هدفه تمامی توابع

هدف هزینه، آلایندگی و راندمان در مدل منظور شده‌اند. تعداد جمعیت آغازین در بهینه‌سازی تک‌هدفه و دوهدفه، ۲۰۰ کروموزوم بوده و الگوریتم با ۸۰۰ بار تولید نسل خاتمه یافته است. مقادیر مذکور در بهینه‌سازی سه‌هدفه ۲۰۰ کروموزوم و ۱۰۰۰ بار تولید نسل بوده است. نتایج به‌دست آمده از مدل، شامل مجموعهٔ جواب‌های بهینهٔ پارتو در فضای اهداف و متغیرهای تصمیم یا جریان‌های انرژی متناظر با هر کدام است. به منظور خلاصه‌سازی و مقایسهٔ نتایج با بهینه‌سازی تک هدفه و هم‌چنین تحلیل کمی و کیفی آن‌ها در بهینه‌سازی‌های چندهدفه، نقاطی از مجموعهٔ جواب‌های بهینه انتخاب شده‌اند. این نقاط که با حروف A، B، و C در شکل‌ها مشخص‌اند، به‌ترتیب نمایندهٔ استراتژی‌های کاهش هزینه، کاهش آلایندگی و افزایش راندمان هستند. بنابراین در صورتی‌که اهداف کاهش هزینه یا کاهش آلایندگی یا افزایش راندمان مورد توجه باشند، به‌ترتیب نقاط A، B و C به‌عنوان نقطهٔ بهینهٔ مطلوب انتخاب می‌شوند. هم‌چنین در صورت نسبی بودن این اولویت‌ها، نقطهٔ بهینهٔ مطلوب توسط تصمیم‌ساز و با توجه به شکل تعادل اهداف و از میان مجموعهٔ جواب‌های بهینه انتخاب می‌شود. در ادامه به تحلیل نتایج عددی به‌دست آمده پرداخته می‌شود.

۵-۱-مقادیر بهینهٔ اهداف و جریان‌های انرژی

مقادیر بهینهٔ توابع هدف در سناریوها و استراتژی‌های مختلف، در جدول(۴) فهرست شده‌اند. هم‌چنین متغیرهای تصمیم متناظر با آن‌ها، به‌صورت منابع تخصیص یافته به مصارف نهایی در نمودارهای(۱) الی (۶) آورده شده‌اند. به این ترتیب با توجه به سناریوی مورد نظر و اولویت اهداف، منابع تخصیص یافته به هرکدام از مصارف نهایی قابل دست‌یابی است.

- بهینه‌سازی تک‌هدفه (کمینه‌سازی هزینه)

مطابق جدول (۴)، کم‌ترین هزینه در مسئلهٔ تخصیص منابع، در سناریوی ۱ و با مقدار ۱۸۷۰ دلار قابل دست‌یابی است. در این سناریو عدم محدودیت در ظرفیت‌سازی فرض شده است. به همین دلیل مدل در انتخاب منابع آزاد بوده و با تخصیص ارزانترین منابع نظیر بیوگاز، گاز طبیعی و نیروگاه بادی به مصارف نهایی، هزینهٔ کلی سیستم را کاهش داده است (نمودار۱). منابع ذکر شده در جدول (۱) دارای کم‌ترین هزینه نسبت به سایر منابع در دسترس‌اند. در سناریوی ۲ به دلیل محدود کردن ظرفیت‌ها، نتایج

مدل طیف گسترده‌تری از منابع انرژی را پیشنهاد کرده‌اند. به این ترتیب هدف تصمیم-ساز از ایجاد تنوع در منابع یا امنیت عرضه، حاصل شده است. بیش‌ترین مقدار تابع هزینه در سناریوی ۳ به‌دست آمده است. وضعیت این سناریو نشان‌دهندهٔ تأثیر تنوع منابع در تعدیل هزینه‌های انرژی است. در سناریوی ۳ به دلیل عدم دسترسی به منابع مختلف و بالا بودن هزینهٔ منابع در دسترسی هزینهٔ کلی سیستم نسبت به سایر سناریوها بیش‌تر شده است. البته با وجود در دسترس بودن نیروگاه خورشیدی، نتایج مدل بیش‌ترین سهم از مصارف نهایی را به نیروگاه‌های بخار و دیزلی اختصاص داده است. علت این امر نیز با توجه به گران بودن نیروگاه خورشیدی نسبت به دو منبع دیگر، قابل توضیح است.

- بهینه‌سازی دوهدفه(کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی)

همان‌طورکه در جدول (۴) آمده است، کم‌ترین هزینه با مقدار ۶۳۸۰ دلار در سناریوی ۱، استراتژی کاهش هزینهٔ قابل دست‌یابی است. مقدار آلایندگی در این حالت ۱۴/۱۵ تن- کربن است. کم‌ترین آلایندگی نیز در سناریوی ۳، استراتژی کاهش آلایندگی به دست آمده است. تحت چنین شرایطی میزان آلایندگی صفر شده است و تابع هزینه برابر با سی هزار دلار دارای بیش‌ترین مقدار در بین تمام سناریوها است. هم‌چنین بیش‌ترین آلایندگی در همین سناریو- استراتژی کاهش هزینه دارای ۳۴/۵۷ تن- کربن است. در این حالت تابع هزینه دارای مقدار کمینهٔ ۱۸,۶۶۰ دلار است.

منابع تخصیص یافته در نمودارهای (۲) و (۳) نشان می‌دهد که در سناریوی ۱، استراتژی کاهش هزینه برای مصرف نهایی گرمایش منبع بیوگاز تخصیص یافته است، اما در استراتژی کاهش آلایندگی منبع نیروگاه بادی پیشنهاد شده است. همان در جدول (۱) نیز آمده است، بیوگاز منبعی ارزان اما با آلایندگی بالا است، اما نیروگاه بادی، منبعی تجدیدپذیر و بدون آلایندگی است. در سناریوی ۲، تنوع منابع در هردو استراتژی کاهش آلایندگی و کاهش هزینه مشاهده می‌شود. با توجه به محدودیت ظرفیت منابع منظور شده، مدل مجبور به استفاده از طیف گسترده‌تری از آن‌ها شده است. در نهایت در سناریوی ۳، که نیروگاه‌های بخار، دیزلی و خورشیدی در دسترس بوده‌اند، در استراتژی کاهش هزینه بیش‌ترین سهم مصارف نهایی از نیروگاه بخار تأمین شده است، که کم‌ترین هزینهٔ ممکن را دربر دارد، اما در استراتژی کاهش آلایندگی، همهٔ مصارف

نهایی با نیروگاه خورشیدی که در میان منابع موجود آلایندگی کم‌تری دارد، پوشش داده شده است. مقایسهٔ مقدار توابع هزینه و آلایندگی در تمام سناریوها و استراتژی‌های کاهش هزینه و کاهش آلایندگی، حاکی از کاهش آلایندگی در ازای افزایش هزینهٔ کلی سیستم است. این مسئله در بخش تعادل اهداف به‌طور مشروح بررسی خواهد شد. اما دلیل آن با توجه به تفاوت مشخصات منابع ارائه شده در جدول (۱) قابل توضیح است: منابع پاکو تجدیدپذیر عموماً گران‌تر و کم بازده‌تر از منابع فسیلی و آلاینده هستند.

- بهینه‌سازی سه‌هدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی و بیشینه‌سازی راندمان)

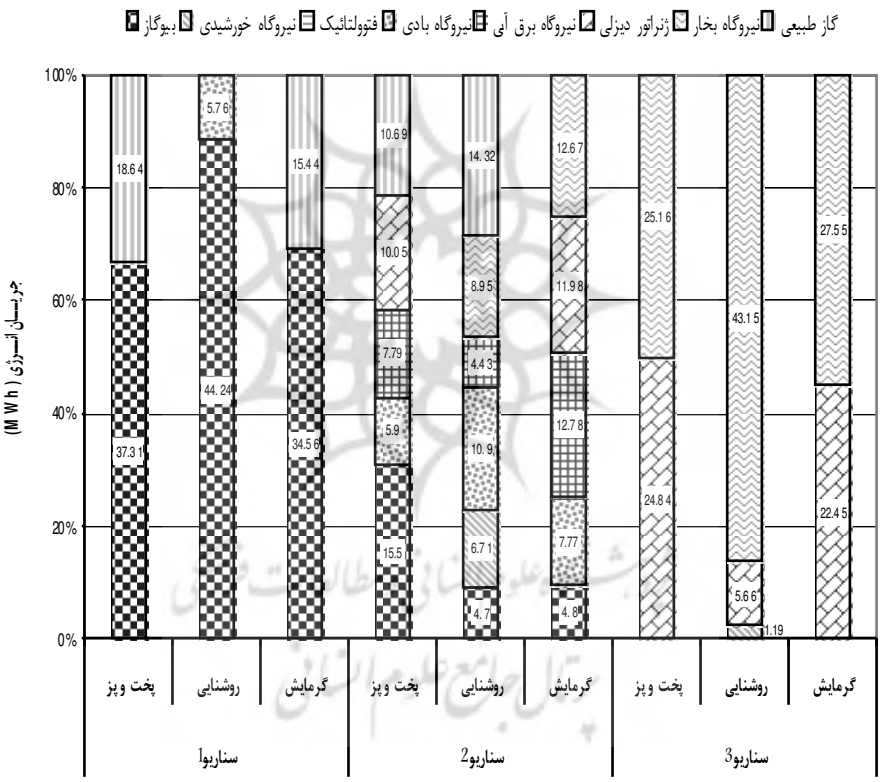
بر اساس جدول (۴)، کم‌ترین هزینه با مقدار ۵,۹۲۰ دلار در سناریوی ۱، استراتژی کاهش هزینه اتفاق افتاده است. هم‌چنین بیش‌ترین هزینه در سناریوی ۳، استراتژی کاهش آلایندگی با مقدار ۳۰,۲۵۰ دلار قابل دست‌یابی است. میزان آلایندگی در

جدول ۴ -مقادیر بهینهٔ توابع هدف در سناریوها و استراتژیهای مختلف

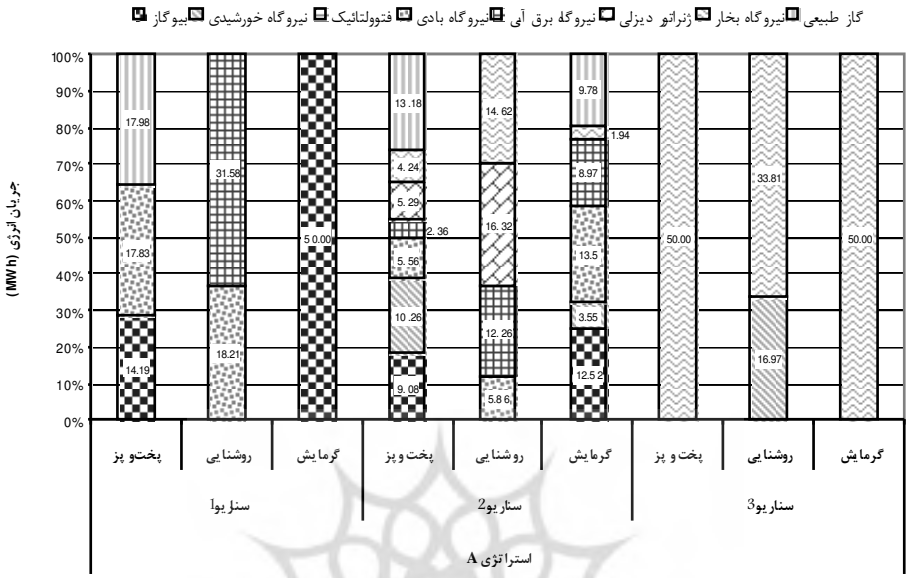
نوع بهینه‌سازی		تک‌هدفه			دوهدفه					
سناریو		۱	۲	۳	۱		۲		۳	
استراتژی		-	-	-	A	B	A	B	A	B
مقدار بهینهٔ تابع هدف	هزینه($)	۱۸۷۰	۱۱۵۴۰	**۱۸۰۵۰**	۶۳۸۰	۱۰۹۹۰	۱۲۹۴۰	۲۲۱۷۰	۱۸۶۶۰	**۳۰۰۰۰**
	آلایندگی ($Ton\ CO_2$)	-	-	-	۱۴/۱۵	۱/۱۹	۲۳/۱۹	۸/۹۶	**۳۴/۵۷**	۰/۰۰
	راندمان (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
نوع بهینه‌سازی		سه‌هدفه								
سناریو		۱			۲			۳		
استراتژی		A	B	C	A	B	C	A	B	C
مقدار بهینهٔ تابع هدف	هزینه($)	۵۹۲۰	۱۲۲۶۰	۱۰۳۸۰	۱۲۷۲۰	۲۲۶۴۰	۱۲۷۳۰	۱۷۴۵۰	**۳۰۲۵۰**	۱۸۶۴۰
	آلایندگی ($Ton\ CO_2$)	۱۵/۴۹	۰/۰۷	۶/۴۷	۲۱/۰۲	۱۰/۶۱	۲۱/۰۹	۴۲/۴۲	۱/۷۹	**۴۵/۴۹**
	راندمان (%)	۲۹/۵۶	۲۶/۰۳	۳۲/۴۲	۲۳/۰۲	۱۶/۱۸	۲۳/۰۵	۱۷/۸۷	**۷/۲۰**	۱۸/۲۸

سناریوی ۱استراتژی کاهش آلایندگی تقریباً صفر شده است و بیش‌ترین میزان آن در سناریوی ۳، استراتژی افزایش راندمان برابر با ۴۵/۴۹ تن -کربن به‌دست آمده است.

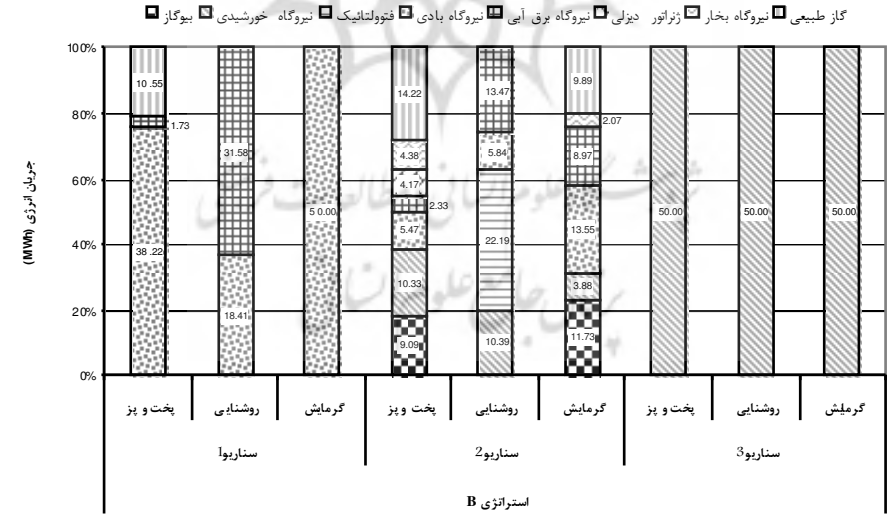
تابع راندمان کلی سیستم در سناریوی ۱، استراتژی افـزایش رانـدمان دارای بـیش‌تـرین مقدار (۳۲/۴۲٪) و در سناریوی ۳، استراتژی کـاهش آلاینـدگی دارای کـم‌تـرین میـزان (۷/۲٪) است. چنان‌چه از نتایج جدول (۴) قابل استنباط اسـت، بـدترین مقـادیر توابـع هدف در سناریوی ۳، که محدودیت دسترسی به منابع اعمال شده، به‌دست آمـده اسـت. از سوی دیگر در سناریوی ۱، که عدم محدودیت در منابع و ظرفیت‌سـازی منظـور شـده است، کم‌ترین هزینه و کم‌ترین میزان آلایندگی و بیش‌ترین راندمان بـا اسـتراتژی‌هـای متفاوت قابل دست‌یابی است.



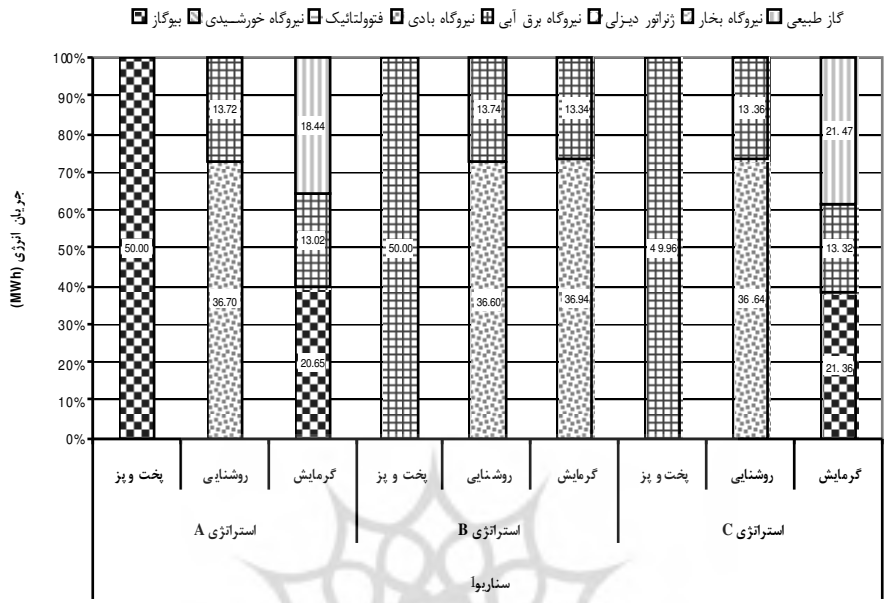
نمودار ۱ - تخصیص منابع بر اساس بهینه‌سازی تک‌هدفه(کمینه‌سازی هزینه)



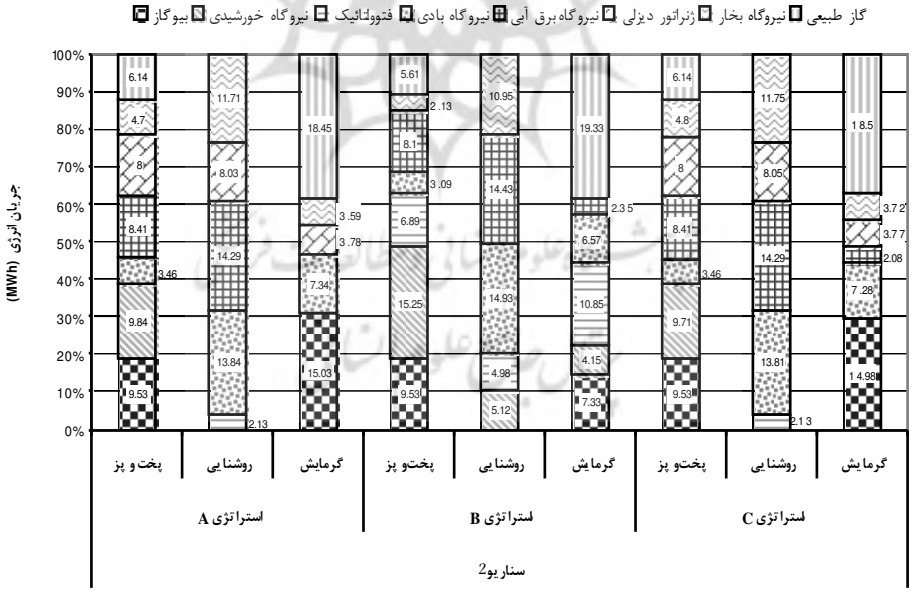
نمودار ۲ - تخصیص منابع بر اساس بهینه‌سازی دوهدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی) - استراتژی کاهش هزینه



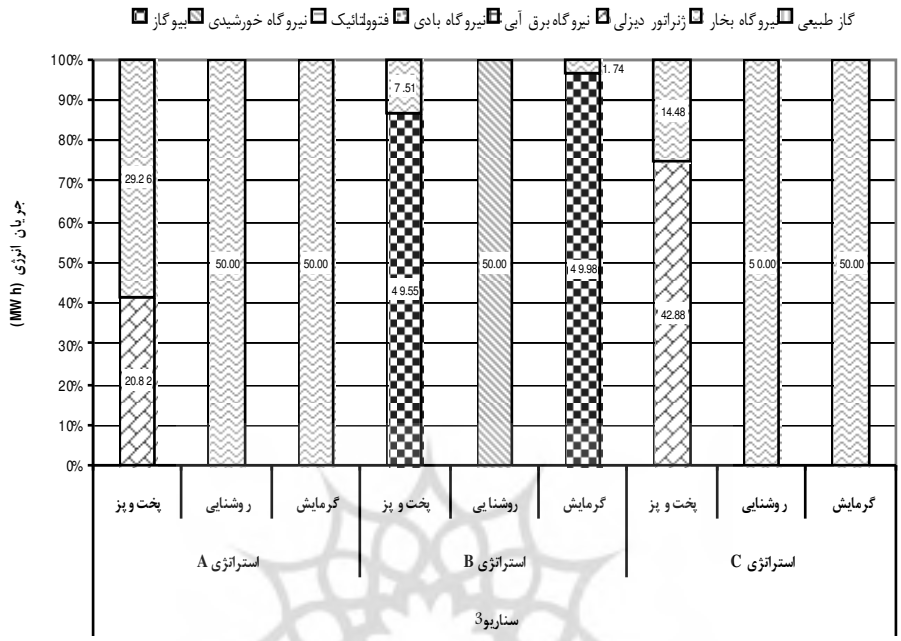
نمودار ۳ - تخصیص منابع بر اساس بهینه‌سازی دوهدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی) - استراتژی کاهش آلایندگی



نمودار۴ - تخصیص منابع بر اساس بهینه‌سازی سه‌هدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی و بیشینه‌سازی راندمان) -سناریوی۱



نمودار۵ - تخصیص منابع بر اساس بهینه‌سازی سه‌هدفه(کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی و بیشینه‌سازی راندمان) -سناریوی ۲



نمودار۶ - تخصیص منابع بر اساس بهینه‌سازی سه‌هدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی و بیشینه‌سازی راندمان) -سناریوی ۳

۲-۵- تعادل اهداف

همان‌طورکه اشاره شد، در بهینه‌سازی چندهدفه معمولاً مجموعه‌ای از نقاط بهینه قابل شناسایی است. جبههٔ جواب‌های بهینه بیانگر تعادل اهداف در برابر و نمایانگر رفتار اهداف در مقابل یکدیگر است. تعادل‌ها نشانگر وجود تناقض یا هماهنگی میان اهداف مورد نظر در سیستم مورد بررسی بوده و به کمک آن‌ها رفتار سیستم قابلیت ارزیابی و تحلیل پیدا می‌کند. اشکال (۳) الی (۶)، مجموعهٔ جواب‌های بهینهٔ پارتو و تعادل اهداف را در بهینه‌سازی‌های چندهدفه نشان می‌دهد. برای هر نقطه در جبههٔ جواب‌های بهینه، جریان‌های انرژی متناظر، مانند آن‌چه در نمودارهای (۳) الی (۶) آمده، وجود دارد. همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهند، جبههٔ پارتو به‌صورت یک طیف در فضای اهداف، گسترده شده است. بدیهی است هر نقطه‌ای در فضای اهداف که خارج از این نقاط

متصور شود، غیر بهینه یا ناشدنی است. هر جواب بهینه بازتاب دهندهٔ یک استراتژی در سیستم مورد نظر است.

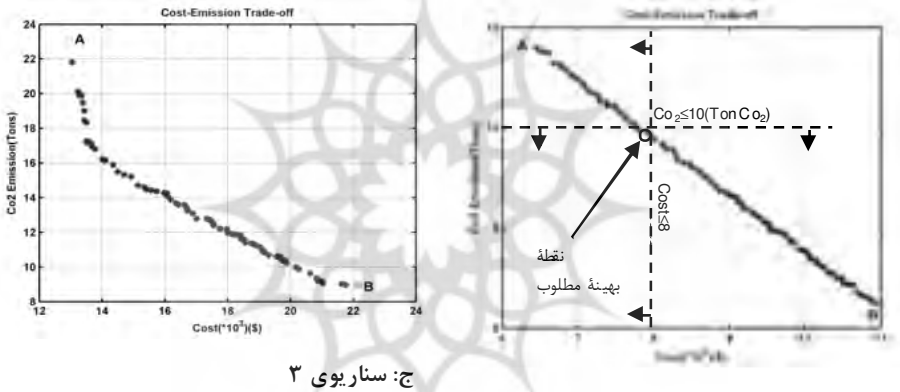
با ارائهٔ جواب‌های بهینهٔ به‌دست آمده، به تصمیم‌ساز، مرحلهٔ تصمیم‌سازی و اعمال ترجیحات سیاست‌گذار انجام می‌گیرد. در شکل (۳)، محدودیت‌ها و ترجیحات فرضی تصمیم ساز به‌صورت آلایندگی کم‌تر از ۱۰ تن - کربن و هزینهٔ کم‌تر از ۸۰۰۰ دلار نشان داده شده است. چنان‌که در شکل نیز مشخص شده است، با ورود محدودیت‌های هزینه و آلایندگی، قسمتی از جواب‌های بهینهٔ به‌دست آمده از مجموعهٔ جواب‌ها حذف شده و در صورت وجود جواب‌های مطلوب در شرایط مورد نظر، آن نقاط به‌عنوان بهینهٔ مطلوب، انتخاب و منابع تخصیصی متناظر با آن‌ها به اجرا گذاشته می‌شوند. بدین ترتیب انتخاب نقطهٔ بهینهٔ مطلوب در بهینه‌سازی چند هدفهٔ یک سیستم انرژی، بر اساس ایدهٔ «تصمیم سازی پس از جستجو» انجام می‌گیرد. ناگفته پیداست که در چنین شرایطی بسته به محدودیت‌های اعمال شده از طرف تصمیم‌ساز، ممکن است نقاط بهینه وجود داشته و یا نداشته باشند. در صورت عدم وجود نقاط بهینه، باید محدودیت‌های تصمیم‌ساز با توجه به طبیعت مسئله تغییر کند.

با توجه به شکل(۳) و بررسی تعادل اهداف در بهینه‌سازی دوهدفه، می‌توان دریافت که در تمام سناریوها با افزایش هزینه از میزان آلایندگی کاسته شده است. با مراجعه به جدول(۱) و بررسی مشخصات ارائه شده در آن، چنین رفتاری را می‌توان توضیح داد. کاهش آلایندگی به دلیل به‌کارگیری منابع تجدید پذیر و پاک بوده است‌که عموماً نسبت به منابع آلاینده گران‌تر نیز هستند.

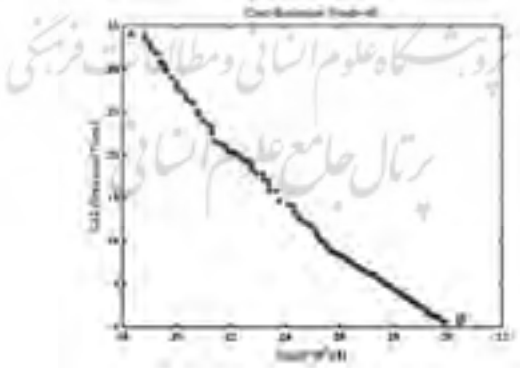
همان‌طور که در شکل (۴) آمده است، مجموعهٔ جواب‌های بهینهٔ سناریوی ۱ بر روی دو خط موازی و روی صفحهٔ ABC پخش شده‌اند. در شکل (۵)، تعادل اهداف در فضای سه هدفه برای سناریوی ۲ به‌صورت یک کمان کشیده شده است و نقاط A و C که به‌ترتیب نمایندهٔ استراتژی کاهش هزینه و افزایش راندمان هستند در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب در نقطه‌ای که هزینه کمینه شده است، راندمان نیز بالاترین مقدار خود را دارا است. بنابراین اهداف کمینه‌سازی هزینه و افزایش راندمان، در این سناریو به‌صورت اهداف هماهنگ عمل می‌کنند. تعادل اهداف هزینه و آلایندگی سناریوی ۳ در شکل (۶)، نشان می‌دهد که با افزایش هزینه در مسیر AB. آلایندگی کاهش می‌یابد، اما در مسیر AC افزایش یافته است. با مراجعه به جدول(۱) و بررسی

سهم منابع مختلف در نقاط A، B و C، می‌توان علت این مسئله را توضیح داد. در نقطهٔ B سهم انرژی خورشیدی (منبع تجدیدپذیر و گران) بالا است. با حرکت از نقطهٔ B به A از این سهم کاسته شده و به سهم نیروگاه بخار (منبع فسیلی کم بازده و ارزان) افزوده می‌شود. در ادامهٔ مسیر از A به C از سهم نیروگاه بخار کاسته شده و مقدار تخصیص یافته به نیروگاه دیزلی (منبع فسیلی پربازده‌تر، گرانتر و آلاینده‌تر)، افزایش می‌یابد. بدین ترتیب اهداف کاهش هزینه و افزایش راندمان در مسیر AB به‌صورت متناقض و در مسیر AC به‌صورت هماهنگ عمل کرده‌اند. به‌طور مشابه علت کاهش راندمان در مسیر AB و افزایش آن در مسیر AC بر اساس سهم منابع تشریح می‌شود.

الف: سناریوی ۱ ب: سناریوی ۲

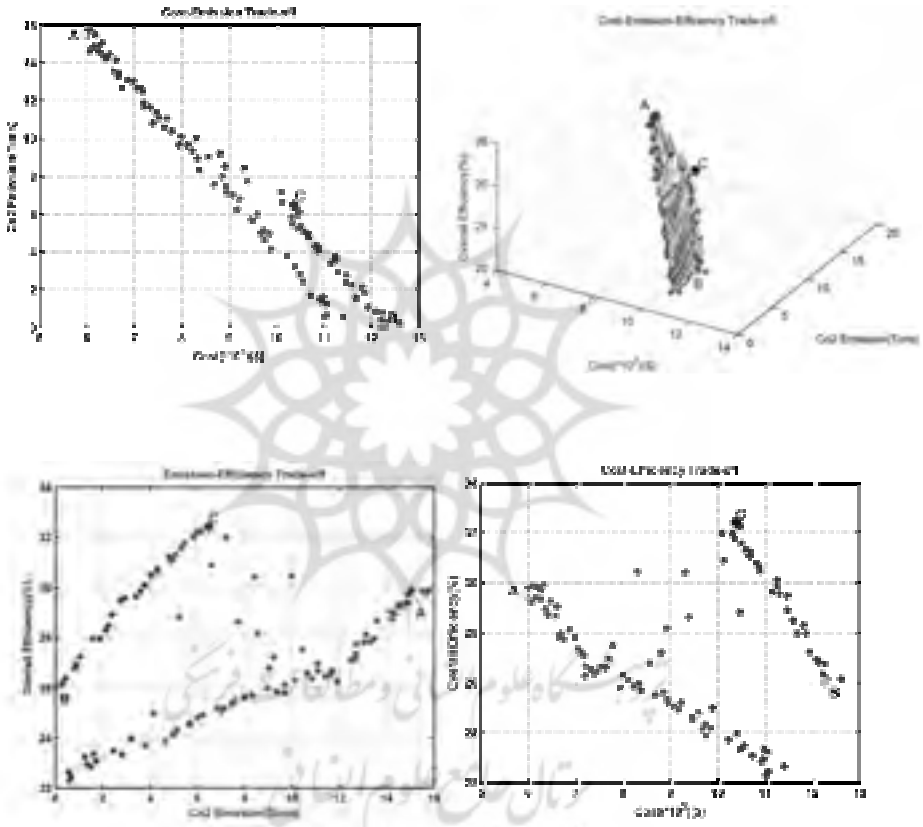


ج: سناریوی ۳

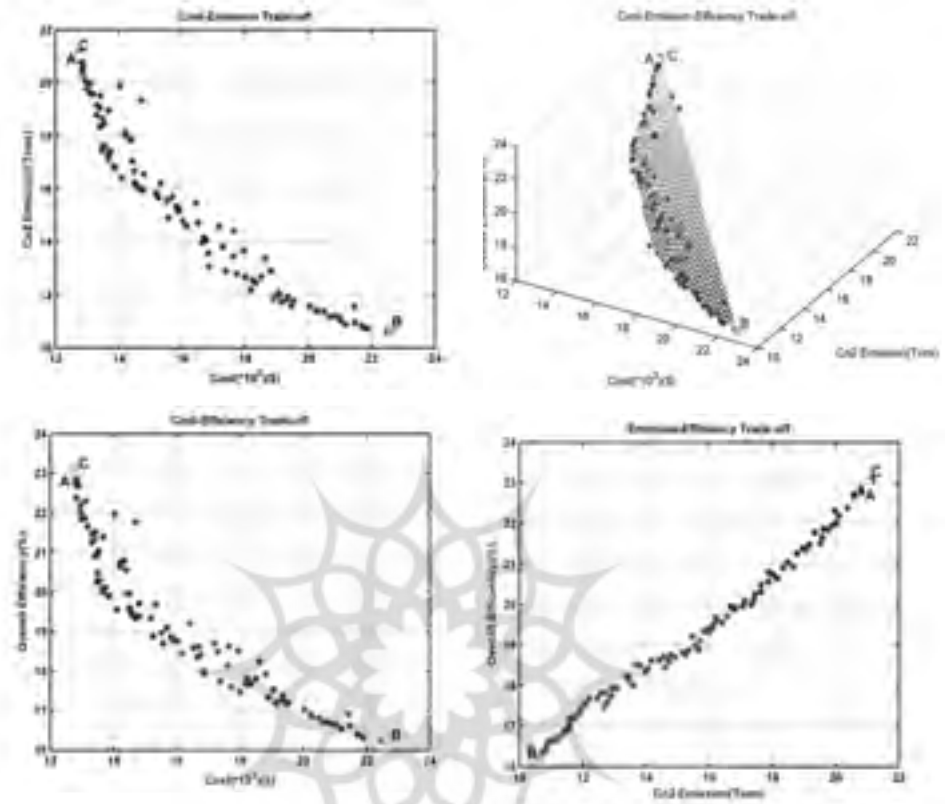


شکل۳ - تعادل اهداف در بهینه‌سازی دوهدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی) -سناریوهای۱ تا ۳

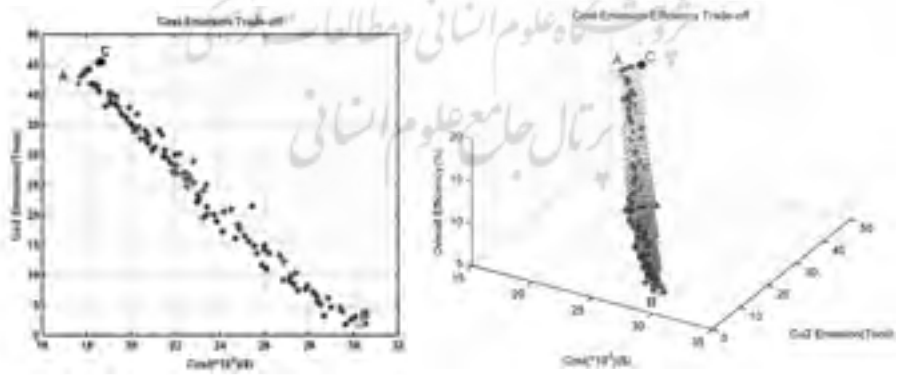
شکل جبههٔ جواب‌های بهینهٔ پارتو، وابستگی کامل به رفتار سیستم و توابع هدف مورد نظر دارد. بنابراین چنان‌که در اشکال (۳) الی (۶) نیز مشاهده شد، این شکل برای همهٔ سیستم‌ها ثابت نبوده و ممکن است در یک سیستم به‌صورت یک خط و در دیگری به‌صورت یک صفحه باشد. رفتار سیستم و اهداف مورد نظر، خطی یا غیر خطی بودن و شکل جبههٔ جواب‌های بهینه را مشخص می‌کند.

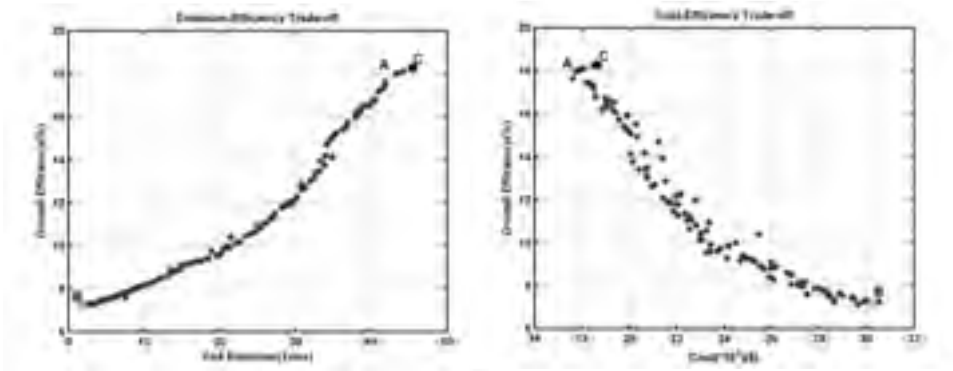


شکل ۴ - تعادل اهداف در بهینه‌سازی سه‌هدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی و بیشینه‌سازی راندمان) -سناریوی۱



شکل۵ - تعادل اهداف در بهینه‌سازی سه‌هدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی و بیشینه‌سازی راندمان) -سناریوی ۲





شکل ۶ - تعادل اهداف در بهینه‌سازی سه‌هدفه (کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی و بیشینه‌سازی راندمان) -سناریوی ۳

۳-۵-مقایسهٔ نتایج

برای روشن شدن نقش توابع هدف، نوع بهینه‌سازی و اثر سناریوها بر منابع تخصیص یافته در مسئلهٔ مورد مطالعه، نتایج بهینه‌سازی‌های تک‌هدفه و چندهدفه ارائه شده در نمودارهای (۳) الی (۶) با یکدیگر مطابقت داده می‌شود. مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده برای سناریوی ۱ نشان می‌دهد که در بهینه‌سازی تک‌هدفه برای مصرف نهایی پخت‌وپز، منابع بیوگاز و گاز طبیعی پیشنهاد شده است. اما مدل دوهدفه در استراتژی کاهش هزینه، ترکیبی از منابع بیوگاز، گاز طبیعی و نیروگاه بادی و در استراتژی کاهش آلایندگی ترکیب گازطبیعی، نیروگاه بادی و برق‌آبی را منظور کرده است. در مدل‌سازی سه‌هدفه که بیشینه‌سازی راندمان نیز ملاحظه شده است، در استراتژی کاهش هزینه، تمامی مصرف نهایی پخت‌وپز با منبع بیوگاز و در استراتژی‌های کاهش آلایندگی و افزایش راندمان با نیروگاه برق‌آبی پوشش داده شده است. به‌طور مشابه می‌توان چنین مقایسه‌ای را برای مصارف نهایی دیگر در سناریوها و استراتژی‌های سه‌گانه انجام داد. دلیل این گوناگونی ترکیبات بر اساس شرایط فنی، اقتصادی و زیست محیطی ترکیبات مختلف منابع –مصارف نهایی در جدول (۱) و نقش آن‌ها در دست‌یابی به اهداف مورد قابل تشریح است. در کمینه‌سازی هزینه. تنها منابعی گزینش شده‌اند که دارای حداقل هزینه باشند. اما در بهینه‌سازی دوهدفهٔ هزینه و آلایندگی، منابع ارزان با حداقل عوارض زیست‌محیطی تخصیص یافته‌اند. در نهایت در بهینه‌سازی سه‌هدفه که بیشینه‌سازی

بازدهی کلی سیستم هم وارد مدل شده است، ترکیب ارزان پاک و دارای بالاترین بازدهی برای مصارف نهایی در نظر گرفته شده است. به این ترتیب مدل مورد استفاده با توجه به شرایط هر سناریو، خواص منابع در دسترس و اهداف مورد نظر و به وسیلهٔ تغییر در سهم منابع مختلف انرژی تخصیص یافته شرایط بهینه را تعیین کرده است. با توجه به موارد فوق مشخص می‌شود که روش بهینه‌سازی مورد استفاده و توابع هدف و هم‌چنین محدودیت‌های هر سناریو برای به‌کارگیری منابع مختلف، در نتیجهٔ نهایی به‌دست آمده از مدل تأثیر مستقیم دارد. لذا تفسیر و توجیه این نتایج باید با ملاحظهٔ موارد مذکور انجام گیرد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در شرایطی که بیش از یک هدف در فرایند سیاست‌گذاری مورد نظر باشد، دیگر بهینه‌سازی تک‌هدفه دارای اعتبار نخواهد بود. بنابراین نیاز به به‌کارگیری روش مدل‌سازی و بهینه‌سازی چندهدفه استمعمو لاً در چنین شرایطی به‌جای یک نقطهٔ بهینه، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه وجود خواهد داشت. این مجموعه جواب‌ها بیانگر تعادل اهداف مورد نظر بوده و نقطهٔ بهینهٔ مطلوب نقطه‌ای است که تأمین کنندهٔ ترجیحات تصمیم‌ساز باشد.

همان‌گونه که در این مقاله عنوان شد، مزیت به‌کارگیری مدل‌های چندهدفه بر روش‌های وزنی، تعیین تمامی نقاط بهینه در یکبار اجرای مدل است. در صورت مدل‌سازی با روش‌های وزنی و ادغام توابع هدف در یک تابع، در هر اجرای مدل، یک نقطهٔ بهینهٔ متناسب با ضرائب وزنی اعمال شده به‌دست می‌آمد. اما با استفاده از مدل چند هدفه، تمامی نقاط بهینه در یک‌بار اجرای مدل به‌دست آمده‌اند. بنابراین امکان انتخاب نقطهٔ بهینهٔ برتر از میان نقاط بهینهٔ ممکن به جای انتخاب از میان کلیهٔ نقاط ممکن در فضای اهداف ایجاد شده است. از سوی دیگر با توجه به شکل جبههٔ بهینهٔ به‌دست آمده، تعادل اهداف در برابر هم و رفتار سیستم قابلیت ارزیابی و تحلیل پیدا کرده است. نتایج این مدل‌سازی نشان می‌دهد که روش مذکور، ضمن ایجاد امکان تحلیل تعادل اهداف متناقض، غیرهم‌مقیاس و چندگانه در سیستم‌های انرژی، قدرت پیش‌بینی و بهبود نتایج حاصل از تصمیمات متفاوت را نیز به‌دست می‌دهد. در نهایت نباید فراموش کرد که نتایج هر مدل‌سازی همواره باید با منطق انسانی مورد نقد و

تجزیه و تحلیل مهندسی قرار گیرد. به منظور ادامهٔ مطالعات و فعالیت‌ها در این زمینه موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- توسعهٔ روش ارائه شده در تحلیل سیستمهای انرژی واقعی
- ورود اهدافی نظیر راندمان اگزرژی و یا قابلیت اطمینان به مدل پیشنهادی
- مقایسهٔ نتایج مدل‌های چند هدفه با روش‌های وزنی و تک‌هدفه
- مقایسهٔ سایر الگوریتم‌های تکاملی در مدل‌سازی سیستم‌های انرژی
- به‌کارگیری سایر روش‌های نوین، مانند شبکه‌های عصبی و منطق فازی در مدل‌سازی سیستم‌های انرژی

فهرست منابع

Abido M. A., "A New Multiobjective Evolutionary Algorithm for Environmental/Economic Power Dispatch" *In Proceeding IEEE Power Engineering Society, Summer Meeting, Vol. 2, pp. 1263-1286, 2001.*

Adham A., "Energy Policy Modeling with Considerations for Technical, Economical and Social Constraints" *MSc thesis, Energy Systems Engineering Division, KNT University of Technology, Supervisor: Ardehali M. M., March 2005.*

Afghan N. H., Al Ghobaisi D., Carvalho M. G., Cumo M., "Sustainable Energy Development" Renewable and Sustainable Energy Reviews 2(1998) 235-286.

Andersson J., "A survey of multiobjective optimization in engineering design" *Technical Report: LiTH-IKP-R-1097, Department of Mechanical Engineering, Linkoping University, Sweden, 1999.*

Cho C. J., "The economic-energy-environment policy problem: An application of the interactive multiobjective decision method for Chungbuk Province" *Journal of Environmental Management 56 (1999) 119-131.*

Coello Coello C. A., Van Veldhuizen D. A., Lamont G. B., "Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems" *Kluwer, New York, 2002.*

Coello Coello C. A., "A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques" *Knowledge and Information Systems. An International Journal, 1(3) (1999) 269-308.*

Deb K., Agrawal S., Pratap A., Meyarivan T., "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II" *IEEE Transaction on Evolutionary Multiobjective Optimization 6(2) (2002) 182-197.*

Deb K., "Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization in Engineering Design" *Kanpur Genetic Algorithms Laboratory (KanGAL), Depatment of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, India, 1999.*

Dincer I., Rosen M. A., "Energy, Environment and Sustainable Development" *Applied Energy 64(1999) 427-440.*

Fonseca C. M., Fleming P. J., "Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization" *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. Morgan Kauffman, pp. 416-423, 1993.*

Fujita K., Hirokawa N., Akagi S., Kitamura S., Yokohata H., "Multi-Objective Optimization Design of Automotive Engine Using Genetic Algorithm" *In Proceeding of DETC'98, 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, September 13-16, 1998, Atlanta, Georgia.*

Goldberg D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning" *Addison Wesley Publishing Company, 1989.*

Hiroyasu T., Miki M., Kamiura J., Watanabe S., "Multi-Objective Optimization of Diesel Engin Emission and Fuel Economy using Genetic Algorithms and Phenomenological Model" *2002, Society of Automotive Engineers.*

Horn J., Nafpliotis N., "Multiobjective Optimization using the Niched Pareto Genetic Algorithm" *Technical Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 1993.*

Knowles J. D., Corne D. W., "The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Multiobjective Optimisation" *In 1999 Congress on Evolutionary Computation, IEEE Service Center, pp. 98–105, 1999.*

Koroneos C., Michailidis M., Moussiopoulos N., "Multiobjective optimization in energy systems the case study of Lesvos Island, Greece" *Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (2004) 91-100.*

Lazzaretto A., Toffolo A., "Energy, economy and environment as objectives in multicriterion optimization of thermal systems design" *Energy 29 (2004) 1139-1157.*

Manzini F., Martinez M., "Choosing an energy future: the environmental impact of end-use technologies" *Energy Policy 27 (1999) 401-414.*

Mezher T., Chedid R., Zahabi W., "Energy resource allocation using multi-objective goal programming: the case of Lebanon" *Applied Energy 61 (1998) 175-192.*

Mourelatos A., Dlakoulaki D., Papagiannakis L., "Impact of CO_2 Reduction Policies on the development of renewable energy sources" *Hydrogen Energy 23(2) (1998) 139-149.*

Srinivas N., Deb K., "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms" *Evolutionary Computation, 2(3) (1994) 221–248.*

Toffolo A., Lazzaretto A., "Evolutionary algorithms for multiobjective energetic and economic optimization in thermal system design" *Energy 27 (2002) 549-567.*

Tsay M. T., Lin W. M., Lee J. L., "Application of evolutionary programming for economic dispatch" *Electrical Power and Energy Systems 23 (2001) 805-812.*

Tsay M. T., "Applying the multiobjective approach for operation strategy of cogeneration systems under environmental constraints" *Electrical Power and Energy Systems 25 (2003) 219-226.*

Wall G., Gong M., "On exergy and sustainable development - part1: Condition and concepts" *Exergy, an International Journal 1(3)(2001) 128-145.*

Zitzler E., Thiele L., "An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: The strength pareto approach" *Technical Report: 43, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology, May 1998.*

Zitzler E., "Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Application" *Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology, November 1999.*

Zitzler E., Laumanns M., Thiele L., "SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm" *Technical Report: 103, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology, May 2001.*

http://www.lania.mx/~ccoello/EMOO

http://www.jeo.org/emo

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی