

الگوریتم‌های تکاملی برای مسئله مکان‌یابی تخصیص زنجیره تأمین زیست‌متان

سهیلا خویشتن‌دار*، مصطفی زندیه**، بهروز درّی***،

سیدامید رعنائی سیادت****

چکیده

زیست‌متان به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست، نقش مهمی در تأمین انرژی مطابق با معیارهای توسعه پایدار ایفا می‌کند. در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح غیرخطی برای تصمیم‌گیری در مورد مکان بهینه رآکتور تولید زیست‌متان و چگونگی تخصیص انواع پسماند به‌عنوان ماده اولیه به رآکتور مطالعه می‌شود. در این مدل هزینه کل راه‌اندازی سیستم تولید زیست‌متان، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مقدار عرضه انواع پسماند در هر مرکز جمع‌آوری، مقدار تقاضای انواع پسماند در رآکتور و تعداد نیروی کار موجود، حداقل می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی برای حل مدل، توسعه داده شده‌اند و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. زمان حل هر دو الگوریتم نسبتاً یکسان است و الگوریتم تکامل تفاضلی، عملکرد بهتری از نظر مقدار تابع هدف نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین زیست‌متان؛ مکان‌یابی؛ تخصیص؛ برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی؛ الگوریتم‌های تکاملی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۷/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۹/۲۲.

* دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول).

E-mail: skhishtandar@gmail.com

** دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی.

*** دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی.

**** استادیار، دانشگاه شهید بهشتی.

۱. مقدمه

کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و آثار مخربی که این سوخت‌ها بر محیط‌زیست دارند، موجب ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. منابع تجدیدپذیر انرژی مانند خورشید، باد، زمین‌گرمایش و زیست‌توده با جایگزینی منابع سنتی انرژی به توسعه پایدار کمک کرده، گازهای گلخانه‌ای کمتری منتشر می‌کنند و از لحاظ اقتصادی به‌صرفه هستند. در میان این منابع، زیست‌متان در سال‌های اخیر، مورد توجه قرار گرفته است [۱۹].

گاز متان، جزء اصلی گاز طبیعی است و به علت دارا بودن نسبت بالای حرارت احتراق به جرم مولکولی واحد، از این گاز در تولید برق، گرمایش خانگی و به‌عنوان سوخت وسایل نقلیه استفاده می‌شود. روش‌های سنتی استخراج گاز طبیعی، مطابق توسعه پایدار نبوده و هزینه‌بر هستند. زیست‌متان از طریق مجموعه واکنش‌های زیست‌شیمیایی به‌دست می‌آید. ماده اولیه تولید زیست‌متان، پسماندهای زیستی مانند فضولات حیوانی و بقایای کشاورزی هستند که در دامداری‌ها و مزارع به‌وفور یافت می‌شوند. تمام‌نشدنی بودن ماده اولیه تولید زیست‌متان نشان می‌دهد این گاز از منابع تجدیدپذیر انرژی است و استفاده از آن به توسعه پایدار کمک می‌کند. تولید زیست‌متان نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر ارزان‌تر است؛ زیرا در تولید آن از ضایعات و مواد دورریختنی استفاده می‌شود. مزیت زیست‌متان به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر باعث می‌شود که گزینه مناسب انرژی جایگزین در آینده باشد. کشورهایی مانند آلمان، انگلیس، ژاپن، چین و آمریکا به‌صورت گسترده‌ای به استفاده از زیست‌متان به‌عنوان منبع جایگزین منابع سنتی انرژی روی آورده‌اند [۴].

یکی از روش‌های تولید متان، فرایند هضم بی‌هوازی است. این فرایند در یک رآکتور با استفاده از مواد اولیه‌ای مانند بقایای جنگلی و فضولات حیوانی انجام شده و محصول آن زیست‌گاز نامیده می‌شود که شامل ۵۵-۷۰ درصد متان و ۳۰-۴۵ درصد دی‌اکسیدکربن است. به علت پایین بودن درصد متان تولیدشده توسط این فرایند، استفاده از زیست‌گاز محدود است و نمی‌تواند جایگزین گاز طبیعی شود؛ اما متان خالص یا زیست‌متان که از ارتقای زیست‌گاز حاصل می‌شود، کاربردی مشابه گاز طبیعی دارد [۱۶].

در سیستم تولید زیست‌متان، کنترل هزینه‌ها مسئله بسیار مهمی است؛ زیرا سیستم تولید سودآور پایدار، سرمایه‌گذاران را جذب می‌کند و نویدبخش توسعه صنعت تولید زیست‌متان خواهد بود. بهینه‌سازی زنجیره تأمین، روش مؤثری در کاهش هزینه‌های راه‌اندازی سیستم تولید زیست‌متان است.

در بخش دوم مقاله، مروری بر مطالعات طراحی و مدیریت زنجیره تأمین انجام می‌شود. در بخش سوم، مدل ریاضی زنجیره تأمین زیست‌متان با تبیین فرض‌های مدل و تعریف پارامترها و

متغیرهای مدل و روابط آن‌ها، در قالب تابع هدف و محدودیت‌ها تشریح شده است. در بخش چهارم، الگوریتم‌های حل پیشنهادی و نحوه تطابق آن‌ها با مدل زنجیره تأمین زیست‌متان، تبیین شده است. همچنین با ارائه مثال‌های عددی به تنظیم پارامتر الگوریتم‌های تکاملی و مقایسه عملکرد آن‌ها با روش‌های تحلیل آماری پرداخته شده است. بخش پنجم مقاله، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

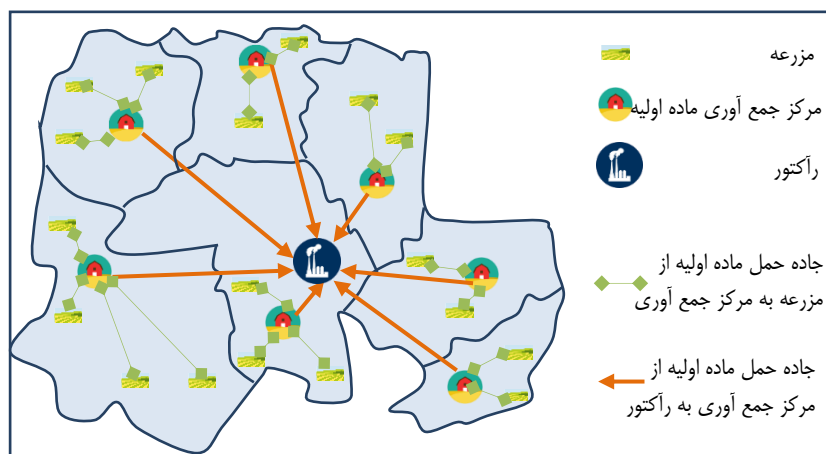
مطالعات بسیاری درباره مدل‌سازی و طراحی زنجیره تأمین انواع زیست‌انرژی انجام شده است [۸، ۲۷، ۲۰]؛ اما پژوهش‌های اندکی طراحی زنجیره تأمین زیست‌متان را به صورت خاص بررسی کرده‌اند. ییلیمز بالامن و سلیم (۲۰۱۴)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین تولید زیست‌گاز در ترکیه ارائه کردند [۲۶]. هان و همکاران (۲۰۱۴)، برای بهینه‌یابی مکان کارخانه‌های تولید زیست‌متان در جنوب فنلاند، یک مطالعه موردی انجام دادند [۱۳]. فرانکو و همکاران (۲۰۱۵)، یک روش فازی برای حل مدل چندمعیاره تعیین مکان کارخانه‌های زیست‌گاز به کار بردند [۱۱]. میرله و فیگریدو (۲۰۱۶)، به طراحی سیستم زنجیره تأمین زیست‌گاز از فضولات حیوانی از طریق هضم بی‌هوازی پرداختند [۱۸]. روش ارائه‌شده در پژوهش آن‌ها با اهداف حداکثرشدن مشارکت و حداقل کردن اتلاف گاز، تصمیم‌های مربوط به مکان تجهیزات تولید زیست‌گاز، سیستم حمل‌ونقل و زمان‌بندی جمع‌آوری زیست‌توده از مزارع را اتخاذ می‌کند. در برخی از پژوهش‌ها از روش‌های هیوریستیک و متاهوریستیک برای حل مدل‌های مکان‌یابی تخصیص زیست‌انرژی استفاده شده است. وو و همکاران (۲۰۱۵)، زنجیره تأمین یک مرحله‌ای تولید زیست‌متان شامل یک رآکتور و تعدادی مراکز جمع‌آوری پسماند را با هدف حداقل کردن هزینه کل سیستم مدل‌سازی و سپس با استفاده از الگوریتم‌های هیوریستیک، بهینه‌یابی کردند [۲۵]. چلی و همکاران (۲۰۰۸)، تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات تولید ترکیبی حرارت و برق از زیست‌توده را در ساردینیا (ایتالیا) بهینه‌یابی کردند [۵]. هدف مدل، حداکثرسازی سود سرمایه‌گذاران خصوصی بود و از سیستم اطلاعات جغرافیایی به همراه الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه مسئله استفاده شد.

ساختار سیستم تولید زیست‌متان وجوه مشترکی با ساختار تولید سایر انواع زیست‌انرژی دارد؛ اما برخی ویژگی‌های ساختاری مختص تولید زیست‌متان است. برای مثال، نیاز به خطوط لوله برای حمل گاز تولیدشده، مختص سیستم تولید زیست‌متان است؛ بنابراین برای طراحی زنجیره تأمین زیست‌متان باید ویژگی‌های متمایز آن لحاظ شود. در مقاله‌های مکان‌یابی تخصیص صنعت زیست‌انرژی موردبررسی، عموماً بر مدل‌سازی زنجیره تأمین تمرکز شده است و ارائه

روش متاهیوریستیک برای حل مدل، بررسی نشده است. مسائل مکان‌یابی تخصیص در حوزه مسائل دشوار^۱ قرار دارند [۲۴]؛ بنابراین در این پژوهش برای حل مدل عدد صحیح مختلط غیرخطی مکان‌یابی تخصیص زنجیره تأمین زیست‌متان که توسط وو و همکاران (۲۰۱۵) ارائه شده، الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی ارائه و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۳. روش شناسی پژوهش

بیان مسئله و تعریف مدل ریاضی. سیستم تولید زیست‌متان مورد بررسی، از سه جزء تشکیل شده است: ۱. مناطقی که انواع پسماند از آن‌ها جمع‌آوری می‌شود؛ ۲. مراکز جمع‌آوری پسماند و ۳. یک رآکتور تولید زیست‌متان. ماده اولیه تولید زیست‌متان می‌تواند شامل انواع پسماند، مانند بقایای کشاورزی، بقایای جنگلی، فضولات حیوانی و انسانی باشد. در هر منطقه یک مرکز جمع‌آوری قرار دارد که فقط پسماندهای همان منطقه را جمع‌آوری می‌کند و مکان آن قبلاً توسط سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین شده است. شکل ۱، نمایی از مکان رآکتور، مراکز جمع‌آوری و راه‌های حمل‌ونقل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مدل شماتیک زنجیره تأمین یک مرحله‌ای زیست‌متان

هزینه‌های زنجیره تأمین زیست‌متان شامل هزینه‌های مواد اولیه، ساخت، حمل و کارگر است. هزینه ماده اولیه، هزینه خرید پسماند از مراکز جمع‌آوری؛ هزینه ساخت رآکتور، میانگین هزینه ساخت در مناطق مختلف؛ هزینه حمل، هزینه حمل پسماند از مراکز جمع‌آوری به رآکتور از طریق حمل‌ونقل جاده‌ای و هزینه کارگران، هزینه به‌کارگرفتن کارگران برای بارگیری و

باربرداری از کامیون‌های حمل پسماند است. محدودیت‌های تقاضای راکتور به انواع پسماند در برابر عرضه آن، در دسترس بودن نیروی کار و ضایعات مواد اولیه در مدل در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح غیرخطی برای تصمیم‌گیری در مورد مکان بهینه راکتور تولید زیست‌متان و چگونگی تخصیص ماده اولیه به راکتور ارائه می‌شود. با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان هزینه کل راه‌اندازی سیستم تولید زیست‌متان را با در نظر گرفتن محدودیت‌های مقدار عرضه انواع پسماند در هر مرکز جمع‌آوری، مقدار تقاضای انواع پسماند در راکتور و تعداد نیروی کار موجود محاسبه کرد.

نمادهای مدل. پارامترهای مدل عبارت‌اند از:

K : تعداد کل انواع پسماندهای مورد استفاده به عنوان ماده اولیه در تولید زیست‌متان

Z : تعداد کل مراکز جمع‌آوری ماده اولیه

k : اندیس نوع پسماند، $z = 1, 2, \dots, Z$

z : اندیس مرکز جمع‌آوری ماده اولیه، $k = 1, 2, \dots, K$

A_{zk} : مقدار موجود از پسماند k در مرکز جمع‌آوری z در یک سال (بار کامیون)

C^f : هزینه ثابت ساخت راکتور (دلار)

C^w : هزینه به کارگرفتن یک کارگر (دلار/ نفر/ بار کامیون)

C_{zk}^t : هزینه حمل پسماند k از مرکز جمع‌آوری z به راکتور (دلار/ بار کامیون/ کیلومتر)

C_{zk}^r : هزینه تهیه پسماند k از مرکز جمع‌آوری z برای راکتور (دلار/ بار کامیون)

D_k : میزان تقاضای پسماند k در راکتور (بار کامیون)

w_k : تعداد کارگر مورد نیاز برای بارگذاری پسماند k (نفرات/ بار کامیون)

W : تعداد کل کارگران در دسترس برای راکتور (نفرات)

β : درصد ضایع شدن انواع پسماند بر اثر ذخیره‌سازی در مراکز جمع‌آوری

$h_z = (x_z, y_z)$: مختصات مرکز جمع‌آوری z

متغیرهای تصمیم مدل عبارت‌اند از:

$r = (x_r, y_r) \in \mathbb{R}^2$: مختصات راکتور

α_{zk} : تعداد کامیون‌هایی که باید برای حمل پسماند k از مرکز جمع‌آوری z به راکتور ارسال شود.

$\alpha = [\alpha_{zk}] \in \mathbb{N}^{z \times k}$: ماتریسی است که تعداد کامیون‌هایی که باید برای حمل پسماند k از

مرکز جمع‌آوری z به راکتور ارسال شود را نمایش می‌دهد.

معیار عملکرد مدل عبارت است از:

$TC(r, \alpha)$: هزینه کل سیستم (دلار) هنگامی که رآکتور در مکان r احداث و α بار کامیون از مراکز جمع‌آوری به رآکتور ارسال شود.

فرض‌های مدل. فرض‌های مدل عبارت‌اند از:

۱. رآکتور توانایی تولید زیست‌متان از انواع پسماند (بقایای جنگلی و کشاورزی، فضولات حیوانی و غیره) را دارد. همه انواع پسماند در هاضم‌هوازی برای تولید زیست‌متان با یکدیگر ترکیب می‌شوند؛

۲. دسترسی به کارگر و مواد اولیه در مکان‌های مختلف در طول یک سال محدود است. حداقل مقدار نیروی کار و ماده اولیه در طول سال با در نظر گرفتن تأثیر موقعیت مکانی و فصلی در مدل لحاظ شده است؛

۳. بخشی از پسماندهایی که برای مدتی نسبتاً طولانی در مراکز جمع‌آوری ذخیره می‌شوند در معرض هوا ضایع می‌شوند و از بین می‌روند؛

۴. فاصله بین مرکز جمع‌آوری و رآکتور با خط مستقیم یا فاصله اقلیدسی محاسبه می‌شود.

مدل مکان‌یابی تخصیص رآکتور زیست‌متان. پس از تعریف پارامترها، متغیرها و فرض‌های

مدل مکان‌یابی تخصیص زنجیره تأمین زیست‌متان که توسط وو و همکاران (۲۰۱۵)، ارائه شده است در این بخش مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح غیرخطی مربوطه تشریح می‌شود.

هزینه کل ساخت و عملیات یک رآکتور زیست‌متان از سه بخش تشکیل می‌شود:

۱. هزینه ساخت رآکتور؛ ۲. هزینه حمل که بستگی به فاصله مراکز جمع‌آوری از رآکتور، شرایط جاده و ظرفیت کامیون دارد و ۳. هزینه به‌کارگرفتن کارگران.

قبل از ارائه مدل لازم است d_z که فاصله اقلیدسی بین مرکز جمع‌آوری z در مکان $h_z = (x_z, y_z)$ از رآکتور در مکان $r = (x_r, y_r)$ مطابق رابطه ۱، تعریف شود:

$$d_z = d(r, h_z) = \sqrt{(x_r - x_z)^2 + (y_r - y_z)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

مدل مکان‌یابی تخصیص رآکتور زیست‌متان به صورت زیر است:

$$\text{Min } TC(r, \alpha) = C^f + \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K C_{zk}^r \alpha_{zk} + \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K d_z C_{zk}^t \alpha_{zk} + C^w \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K w_k \alpha_{zk} \quad \text{رابطه (۲)}$$

subject to:

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K w_k \alpha_{zk} \leq W, \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sum_{z=1}^Z \alpha_{zk} \geq D_k, \quad \text{for } k = 1, \dots, K \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{z=1}^Z \alpha_{zk} \leq (1 - \beta) \sum_{z=1}^Z A_{zk}, \quad \text{for } k = 1, \dots, K \quad \text{رابطه (۵)}$$

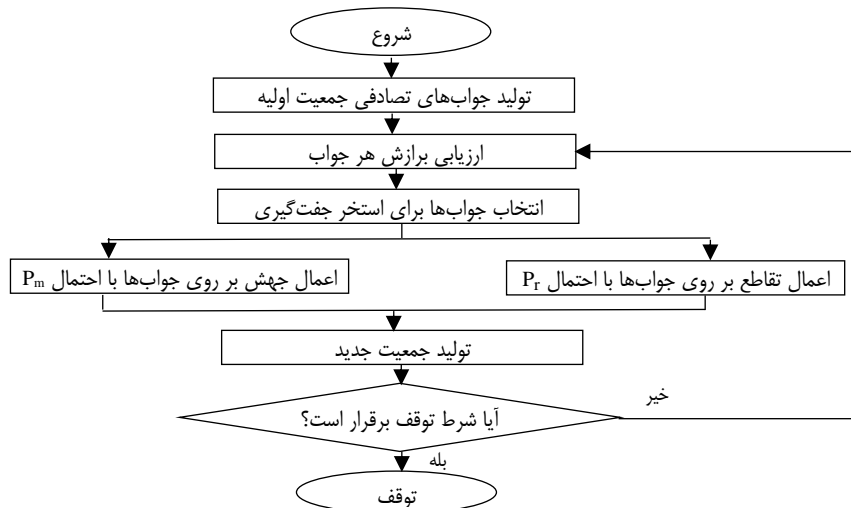
$$0 \leq \alpha_{zk} \leq (1 - \beta) A_{zk} \text{ and } \alpha_{zk} \in \mathbb{Z} \quad \text{رابطه (۶)}$$

تابع هدف ۲، حداقل کردن مجموع هزینه‌های ساخت رآکتور، تهیه انواع مواد اولیه از مراکز جمع‌آوری، حمل مواد اولیه از مراکز جمع‌آوری به رآکتور و به‌کارگیری کارگران است. مطابق محدودیت ۳، تعداد کارگران حمل انواع پسماند از مراکز جمع‌آوری به رآکتور، باید کمتر از تعداد کارگر در دسترس در رآکتور باشد. مطابق محدودیت ۴، مجموع مقادیر حمل شده از انواع پسماند به رآکتور باید بیش از تقاضای رآکتور به آن پسماند باشد. مطابق محدودیت ۵، مجموع مقدار پسماند تحویل داده شده به رآکتور محدود به میزان در دسترس از آن نوع پسماند است. مطابق محدودیت ۶، مقدار پسماند تحویل داده شده به رآکتور از هر مرکز جمع‌آوری محدود به میزان در دسترس از آن نوع پسماند در آن مرکز جمع‌آوری بوده و مقدار آن غیرمنفی و صحیح است.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

الگوریتم‌های حل پیشنهادی. مسائل مکان‌یابی تخصیص در حوزه مسائل دشوار قرار دارند [۲۴]؛ بنابراین در این مقاله برای حل مدل عدد صحیح مختلط غیرخطی مکان‌یابی تخصیص زنجیره تأمین زیست‌متان، الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی مطابقت داده می‌شوند.

الگوریتم ژنتیک. مراحل الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله بهینه‌یابی در شکل ۲ نشان داده شده است و تشریح مراحل الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده در ادامه ذکر می‌شود [۱۴].



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله بهینه‌یابی

رمزگذاری جواب. نوع رمزگذاری جواب‌ها، بسیار مهم و تعیین‌کننده نوع الگوریتم ژنتیک اعمال شده است. چانگ (۲۰۱۰)، تأکید می‌کند در صورتی که متغیرهای تصمیم در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین، متغیر عدد صحیح مثبت باشند، رمزگذاری جواب‌ها نیز باید به صورت عدد صحیح باشد [۶]؛ بنابراین برای رمزگذاری متغیرهای تصمیم مسئله از روش نمایش اعداد حقیقی استفاده شده است. شکل ۳، نحوه رمزگذاری جواب‌ها را نشان می‌دهد.

x_r	y_r	
α_{11}	\dots	α_{1K}
\vdots	\ddots	\vdots
α_{Z1}	\dots	α_{ZK}

شکل ۳. رمزگذاری جواب‌ها در الگوریتم ژنتیک

ایجاد جمعیت اولیه جواب‌ها. تولید جمعیت اولیه با مقداره‌ی مناسب به متغیرهای تصمیم مسئله در همگرایی سریع‌تر الگوریتم به جواب‌های نزدیک به بهینه کلی بسیار مؤثر است. مختصات مراکز جمع‌آوری $h_z = (x_z, y_z)$ که در هر منطقه احداث شده‌اند، از قبل مشخص است. بنابراین برای تعیین مکان احداث راکتور $r = (x_r, y_r)$ جواب اولیه از بازه‌های γ و δ به صورت تصادفی انتخاب شده است.

$$\min x_z \leq x_r \leq \max x_z \tag{۷}$$

$$\min y_z \leq y_r \leq \max y_z \quad \text{رابطه (۸)}$$

مقداردهی اولیه به متغیرهای تصمیم صحیح α_{zk} با توجه به محدودیت‌های ۳ و ۶ از بازه ۹ مطابق توزیع یکنواخت به صورت تصادفی انجام شده است.

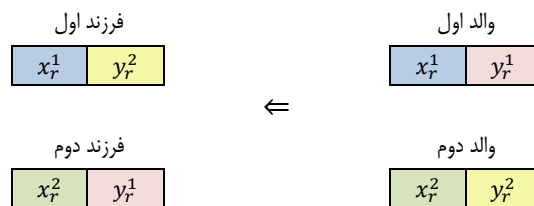
$$0 \leq \alpha_{zk} \leq \min\left(\frac{w}{w_k}, (1 - \beta)A_{zk}\right), \text{ for all } z, k \quad \text{رابطه (۹)}$$

محاسبه برآزش جواب‌ها. مقدار تابع هدف هر جواب به‌عنوان معیاری برای برآزش جواب‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به نوع تابع هدف که حداقل کردن مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین است، جواب‌هایی با مقدار تابع هدف کمتر، جواب‌های بهتری ارزیابی می‌شوند.

انتخاب. برای انتخاب کروموزوم‌های والد، از روش انتخاب مسابقه‌ای استفاده شده است. برآزش و مجموع تخطی از محدودیت‌های نرمالایزشده هر جواب در جمعیت فعلی محاسبه می‌شود، سپس دو جواب تصادفی برای انتخاب شدن به‌عنوان والد اول با یکدیگر مسابقه می‌دهند. سپس والد دوم مطابق همین فرایند انتخاب می‌شود. برنده مسابقه بر اساس اصول زیر تعیین می‌شود:

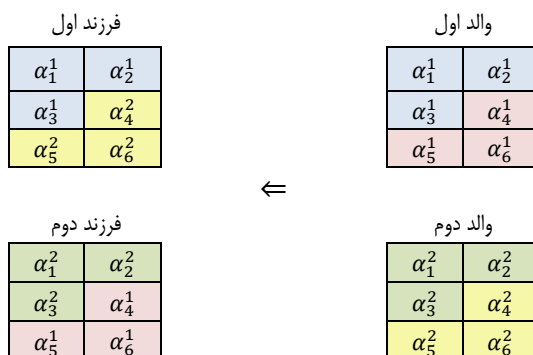
۱. اگر هر دو جواب موجه باشند، جوابی که برآزش بهتری دارد، انتخاب می‌شود؛
۲. اگر یکی از جواب‌ها موجه و دیگری غیرموجه باشد، جواب موجه انتخاب می‌شود؛
۳. اگر هر دو جواب غیرموجه باشند، جوابی که مجموع تخطی از محدودیت‌های نرمالایزشده کمتری دارد، انتخاب می‌شود [۹].

تقاطع. برای تولید کروموزوم‌های نسل بعدی، کروموزوم‌های والد بخش‌هایی از خود را به اشتراک می‌گذارند و دو کروموزوم فرزند تولید می‌کنند [۱]. عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای برای تقاطع متغیر تصمیم مختصات راکتور استفاده شده است. طبق شکل ۴، در این روش تقاطع، فرزند اول مقدار x را از والد اول و مقدار y را از والد دوم و فرزند دوم برعکس، مقدار x را از والد دوم و مقدار y را از والد اول دریافت می‌کند.



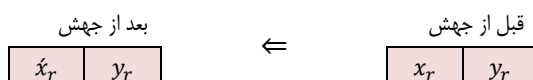
شکل ۴. تقاطع متغیر تصمیم مختصات راکتور در الگوریتم ژنتیک

برای متغیر تصمیم مقدار حمل پسماند، عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای استفاده شده است. طبق شکل ۵، در این روش تقاطع یک عدد تصادفی در بازه $[2, Z * K - 1]$ تولید می‌شود، علت کنارگذاشتن عضو اول و آخر از این بازه این است که از تولید فرزندان که کاملاً شبیه یکی از والدین هستند، جلوگیری شود. فرزند اول، عناصر α قبل از محل تقاطع را از والد اول و بعد از محل تقاطع را از والد دوم دریافت می‌کند. فرزند دوم برعکس، عناصر α قبل از محل تقاطع را از والد دوم و بعد از محل تقاطع را از والد اول دریافت می‌کند.



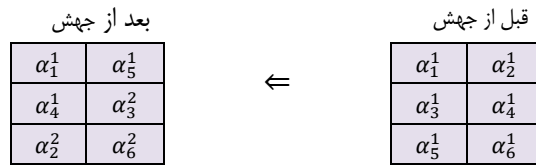
شکل ۵. تقاطع متغیر تصمیم مقدار حمل پسماند از مراکز جمع‌آوری به رآکتور در الگوریتم ژنتیک

جهش. عملگر جهش موجب انحراف جواب فرزند از جواب والد می‌شود [۲]. برای جهش متغیر تصمیم مختصات رآکتور عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ تولید شده، اگر عدد تصادفی کمتر از $0/5$ باشد، به جای x عدد دیگری در بازه تعریف شده برای متغیر x تولید و جای آن قرار داده می‌شود و مقدار y تغییری نمی‌کند. اگر عدد تصادفی بیشتر از $0/5$ باشد، به جای y عدد دیگری تولید و جای آن قرار داده می‌شود و مقدار x تغییری نمی‌کند (شکل ۶).



شکل ۶. جهش متغیر تصمیم مختصات رآکتور در الگوریتم ژنتیک

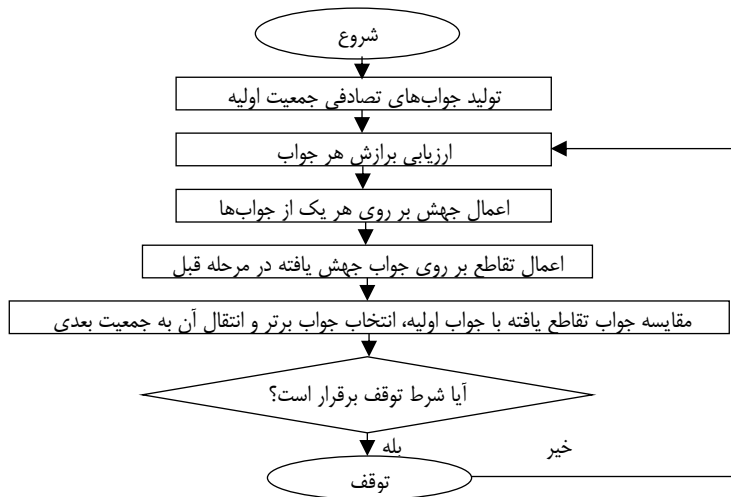
برای جهش متغیر تصمیم مقدار حمل پسماند، از عملگر وارونگی استفاده شده است؛ به این ترتیب که دو عدد در بازه $[1, Z * K]$ تولید می‌شود و عناصر بین این دو عدد در ماتریس به صورت وارونه از انتها به ابتدا به جای عناصر قبلی درج می‌شوند و مابقی عناصر بدون تغییر در جای قبلی خود قرار می‌گیرند (شکل ۷).



شکل ۷. جهش متغیر تصمیم مقدار حمل پسماند از مراکز جمع‌آوری به راکتور در الگوریتم ژنتیک

شرط توقف. شرط خاتمه فرایند الگوریتم، رسیدن به تعداد مشخصی از نسل‌ها در نظر گرفته شده است.

الگوریتم تکامل تفاضلی. مراحل الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل یک مسئله بهینه‌یابی در شکل ۸، نشان داده شده است. تشریح مراحل الگوریتم توسعه داده‌شده در ادامه ذکر می‌شود [۱۰، ۲۲].



شکل ۸. فلوجارت الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل یک مسأله بهینه‌یابی

ایجاد جمعیت اولیه جواب‌ها. تولید جمعیت اولیه جواب‌ها به صورت تصادفی از حدود تعیین شده برای متغیر تصمیم مکان احداث راکتور $r = (x_r, y_r)$ در رابطه‌های ۷ و ۸ و نیز حدود تعیین شده برای متغیر تصمیم مقدار حمل پسماند از مراکز جمع‌آوری به راکتور α_{zk} در رابطه ۹ بوده است. طبق شکل ۹، هر جواب در جمعیت اولیه از متغیرهای تصمیم مسئله تشکیل شده است که به صورت یک بردار با $ZK + 2$ عنصر است.

x_r	y_r	α_{11}	α_{12}	...	α_{ZK}
-------	-------	---------------	---------------	-----	---------------

شکل ۹. نمایش بردار جواب در الگوریتم تکامل تفاضلی

محاسبه برآزش جواب‌ها. مقدار تابع هدف هر جواب به‌عنوان معیاری برای برآزش جواب‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به نوع تابع هدف که حداقل نمودن مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین است، جواب‌هایی با مقدار تابع هدف کمتر، جواب‌های بهتری ارزیابی می‌شوند.

جهش. به ازای هر یک از جواب‌های حاضر در جمعیت $v_{i,G}, i = 1, 2, \dots, NP$ که در اینجا بردار اولیه نامیده می‌شود، بردار جواب جهش‌یافته مطابق رابطه ۱۰، ایجاد می‌شود:

$$mv_{i,G+1} = v_{i_1,G} + CF * (v_{i_2,G} - v_{i_3,G}) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

اندیس‌های $i_1, i_2, i_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ که متفاوت از اندیس جواب فعلی و دوه‌دو متفاوت هستند، به‌صورت تصادفی از جمعیت فعلی انتخاب شده‌اند. ضریب $CF \in [0, 2]$ است و برای کنترل و جلوگیری از تشدید تغییرپذیری تفاضل $(v_{i_2,G} - v_{i_3,G})$ در نظر گرفته شده است. در الگوریتم توسعه داده شده این ضریب عددی تصادفی با توزیع یکنواخت از بازه $[0.2, 0.8]$ در نظر گرفته شده است. $mv_{i,G+1}$ نیز بردار جهش‌یافته است.

پس از جهش بررسی می‌شود عنصر جهش‌یافته از حدود تعیین شده برای متغیر تصمیم خارج نشده باشد؛ در صورت خارج شدن، عدد دیگری در بازه متغیر تصمیم مربوطه تولید و جایگزین عنصر جهش‌یافته می‌شود.

تقاطع. برای افزایش تنوع در بردارهای جهش‌یافته، عملگر تقاطع مورد استفاده قرار می‌گیرد. بردار تقاطع‌یافته یا بردار آزمایشی به‌صورت رابطه ۱۱، نمایش داده می‌شود:

$$tv_{i,G+1} = (tv_{1i,G+1}, tv_{2i,G+1}, \dots, tv_{Di,G+1}) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

بردار آزمایشی، D عنصر دارد که تعداد متغیرهای تصمیم مسئله بوده و در مسئله حاضر برابر با $2 + ZK$ است. بردار آزمایشی مطابق رابطه ۱۲، به‌دست می‌آید:

$$tv_{ji,G+1} = \begin{cases} mv_{ji,G+1} & \text{if } (randb(j) \leq CR \text{ or } j = rnbr(i)) \\ v_{ji,G} & \text{if } (randb(j) > CR \text{ or } j \neq rnbr(i)) \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, D \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در رابطه ۱۲، $randb(j)$ عنصر j ام مولد عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ است. CR ، ضریب تقاطع و عددی در بازه $[0, 1]$ است که مقدار آن توسط کاربر تعیین می‌شود. $\{1, 2, \dots, D\}$ یکی از عناصر جواب مسئله است که به‌صورت تصادفی انتخاب شده

تا این اطمینان وجود داشته باشد که $tv_{i,G+1}$ حداقل یکی از عناصر خود را از $mv_{i,G+1}$ گرفته است؛ به عبارت دیگر می‌توان اطمینان داشت که جواب آزمایشی با جواب اولیه در همه عناصر یکسان نیست و حداقل در یک عنصر متفاوت هستند.

انتخاب. برای تصمیم‌گیری در مورد پذیرش یا نپذیرفتن جواب آزمایشی تولیدشده در جمعیت بعدی $G + 1$ باید جواب آزمایشی $tv_{i,G+1}$ و جواب اولیه $v_{i,G}$ مقایسه شوند. مطابق همان اصولی که در الگوریتم ژنتیک بیان شد تعیین می‌شود که کدام یک باید برای انتقال به جمعیت بعدی انتخاب شود.

شرط توقف. شرط خاتمه فرایند الگوریتم، رسیدن به تعداد مشخصی از نسل‌ها در نظر گرفته شده است.

تعیین اعتبار و مقایسه الگوریتم‌های حل

داده‌های مثال‌های عددی. برای تعیین اعتبار روش حل ارائه شده برای مدل زنجیره تأمین یک مرحله‌ای زیست‌متان، از داده‌های پژوهش وو و همکاران (۲۰۱۵)، استفاده شده است که در ادامه تشریح می‌شوند [۲۵].

پارامترهای مشترک در همه مثال‌های عددی عبارت‌اند از: $C^w = 10$ ، $C^f = 0$ و $\beta = 0.05$. هزینه ثابت ساخت رآکتور C^f مقداری ثابت در تابع هدف است؛ بنابراین با صفر در نظر گرفتن مقدار آن، عملکرد الگوریتم تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. مقدار C^w بر این اساس تعیین شده است که بارگیری و بارگذاری یک کامیون پسماند حدود یک ساعت زمان از یک کارگر وقت می‌گیرد و حداقل دستمزد چنین کارگری ۱۰ دلار است؛ همچنین تخمین زده می‌شود حدود ۵ درصد از انواع پسماند در مراکز جمع‌آوری از بین بروند.

سایر پارامترهای مثال‌های عددی، به صورت تصادفی، مطابق توزیع یکنواخت از بازه‌هایی که در ادامه مشخص می‌شود، انتخاب شده‌اند. مختصات مراکز جمع‌آوری $x = [x_z] \in \mathbb{R}^Z$ و $y = [y_z] \in \mathbb{R}^Z$ مقدار موجود از انواع پسماند $A = [A_{zk}] \in \mathbb{R}^{Z \times K}$ و همچنین هزینه‌های حمل $C^t = [C_{zk}^t] \in \mathbb{R}^{Z \times K}$ مطابق روابط ۱۳ تا ۱۵ مقداردهی شده‌اند:

$$x = 100\text{rand}(Z, 1) \text{ and } y = 100\text{rand}(Z, 1) \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$A = 2 + 3\text{rand}(Z, K) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$C^t = 3 + 2\text{rand}(Z, K) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در روابط بالا $rand(m, n)$ یک ماتریس $m \times n$ ایجاد می‌کند که عناصر آن مطابق توزیع یکنواخت به‌طور تصادفی در بازه صفر و ۱ تولید شده‌اند؛ به این ترتیب مختصات مراکز جمع‌آوری از ناحیه‌ای به مساحت ۱۰۰۰۰ مایل مربع به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. مقدار موجود پسماند در هر مرکز جمع‌آوری، بین ۲-۵ کامیون در روز و هزینه حمل هر کامیون حامل انواع پسماند در هر مایل بین ۳-۵ دلار است.

میزان تقاضای انواع پسماند در رآکتور $D = [D_k] \in \mathbb{R}^K$ ، هزینه تهیه پسماند $w = [w_k] \in \mathbb{R}^K$ و تعداد کارگر موردنیاز برای بارکردن انواع پسماند $C^r = [C_{zk}^r] \in \mathbb{R}^{Z \times K}$ مطابق روابط ۱۶ تا ۱۸ مقداردهی شده‌اند:

$$D = randi([1.5Z, 3Z], 1, K) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$C^r = randi([100, 150], Z, K) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$w = randi([3, 5], 1, K) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در روابط بالا $randi([UB, LB], m, n)$ یک ماتریس $m \times n$ ایجاد می‌کند که عناصر آن اعداد صحیحی هستند که مطابق توزیع یکنواخت به‌طور تصادفی در بازه $[UB, LB]$ تولید شده‌اند. مطابق رابطه ۱۶، مقدار تقاضای انواع پسماند در رآکتور مقادیری صحیح و تصادفی بین ۱.۵Z و 3Z بار کامیون است. در رابطه ۱۷، هزینه تهیه هر کامیون از انواع پسماند عددی صحیح و تصادفی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ دلار است. در رابطه ۱۸ فرض شده که نیروی کار موردنیاز برای بارگذاری هر کامیون، بین ۳ تا ۵ نفر است.

تعداد کل کارگران در دسترس برای رآکتور W به‌صورت تجربی $8ZK$ در نظر گرفته شده است. مجموعه‌ای از ۳۰ مسئله با اندازه کوچک، متوسط و بزرگ برای تعیین اعتبار راه‌حل ارائه شده برای مدل، ایجاد شد؛ البته تمامی مسائلی که به‌صورت تصادفی از بازه‌های مشروح در بالا تولید شوند دارای جواب موجه نیستند؛ بنابراین مسائلی که فاقد جواب موجه بوده‌اند، کنار گذاشته شده‌اند. کلیه محاسبات مربوطه با استفاده از رایانه‌ای با پردازشگر AMD Core i5-4750HQ@3.00 GHz و حافظه داخلی RAM 4 GB در نرم‌افزار MATLAB 7.10.0 انجام شده است؛ همچنین به‌منظور مقایسه، مثال‌های عددی یک بار نیز با نرم‌افزار LINGO 11.0.0.20 حل شده‌اند.

تنظیم پارامتر الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی. طراحی پارامتر یک الگوریتم، اثر زیادی بر کارایی و اثربخشی آن خواهد داشت. در بسیاری از پژوهش‌ها، تنظیم پارامترها بر اساس آزمون و خطا یا مطالعات قبلی مشابه صورت می‌گیرد. روش‌های آماری متنوعی برای این منظور وجود دارد؛ اما با روش طرح فاکتوریل کسری، تعداد آزمایش‌های کمتری انجام می‌شود. با استفاده از این روش با انجام بخشی از کل ترکیبات ممکن فاکتورها، اثر اصلی فاکتورها و برخی تعاملاتشان تخمین زده می‌شود [۷]. تاگوچی (۱۹۸۶)، روشی از خانواده طرح فاکتوریل کسری ارائه کرد که در آن با استفاده از آرایه‌های متعامد، با انجام تعداد اندکی آزمایش، تعداد زیادی فاکتور مقداردهی می‌شوند. در روش تاگوچی، فاکتورها به دو دسته تقسیم می‌شوند: قابل کنترل و نویز. فاکتورهایی که کنترل مستقیم بر آن‌ها وجود ندارد، نویز هستند. از آنجاکه حذف این فاکتورها غیرعملی و غیرممکن است، تأثیر این فاکتورها برای تعیین سطح بهینه عوامل مهم قابل کنترل با بهره‌گیری از مفهوم طراحی استوار، حداقل می‌شود؛ همچنین در کنار تعیین سطوح بهینه فاکتورها، اهمیت نسبی هر فاکتور به صورت اثر اصلی فاکتور بر تابع هدف تبیین می‌شود [۱۷]. اندازه‌گیری تغییرپذیری فرایند و تشخیص طراحی پارامتر استوار با مقیاسی به نام نسبت سیگنال به نویز صورت می‌گیرد. در این شاخص، «سیگنال»، نشان‌دهنده مقدار مطلوب (متغیر پاسخ) و «نویز»، نمایانگر مقدار نامطلوب (انحراف معیار) است؛ بنابراین نسبت سیگنال به نویز میزان تغییر در متغیر پاسخ را نشان می‌دهد و حداکثر کردن آن همواره موردنظر است. تاگوچی، تابع هدف را سه نوع می‌داند: کمتر بهتر، بیشتر بهتر و بهترین مقدار مشخص که برای هر یک نحوه محاسبه نسبت سیگنال به نویز متفاوت است. در مدل مکان‌یابی تخصیص زیست‌متان، هدف حداقل کردن هزینه‌های زنجیره تأمین است؛ از این رو از رابطه ۱۹، برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود [۱۵]:

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TC_i^2 \right) \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

در این رابطه، n تعداد آزمایش‌ها برای هر ترکیب از پارامترها در الگوریتم موردنظر است. فاکتورهای قابل کنترل دو الگوریتم، شامل اندازه جمعیت، تعداد نسل‌ها و نرخ تقاطع است که سطوح آن‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. فاکتورهای (پارامترهای) الگوریتم ژنتیک و سطوح آن‌ها

فاکتور	نماد	تعداد سطوح	مسائل کوچک	مسائل متوسط	مسائل بزرگ
اندازه جمعیت	N_p	۳	$N_p(1): 6,000$ $N_p(2): 8,000$ $N_p(3): 10,000$	$N_p(1): 40,000$ $N_p(2): 60,000$ $N_p(3): 80,000$	$N_p(1): 200,000$ $N_p(2): 300,000$ $N_p(3): 400,000$
تعداد نسل‌ها	N_g	۳	$N_g(1): 40$ $N_g(2): 80$ $N_g(3): 120$	$N_g(1): 100$ $N_g(2): 300$ $N_g(3): 500$	$N_g(1): 500$ $N_g(2): 1,000$ $N_g(3): 1,500$
نرخ تقاطع	P_{cr}	۳	$P_{cr}(1): 0.75$ $P_{cr}(2): 0.85$ $P_{cr}(3): 0.95$	$P_{cr}(1): 0.75$ $P_{cr}(2): 0.85$ $P_{cr}(3): 0.95$	$P_{cr}(1): 0.75$ $P_{cr}(2): 0.85$ $P_{cr}(3): 0.95$

جدول ۲. فاکتورهای (پارامترهای) الگوریتم تکامل تفاضلی و سطوح آن‌ها

فاکتور	نماد	تعداد سطوح	مسائل کوچک	مسائل متوسط	مسائل بزرگ
اندازه جمعیت	N_p	۳	$N_p(1): 1,000$ $N_p(2): 2,000$ $N_p(3): 3,000$	$N_p(1): 500$ $N_p(2): 1,000$ $N_p(3): 1,500$	$N_p(1): 500$ $N_p(2): 1,000$ $N_p(3): 1,500$
تعداد نسل‌ها	N_g	۳	$N_g(1): 100$ $N_g(2): 300$ $N_g(3): 500$	$N_g(1): 10,000$ $N_g(2): 30,000$ $N_g(3): 50,000$	$N_g(1): 100,000$ $N_g(2): 200,000$ $N_g(3): 300,000$
نرخ تقاطع	P_{cr}	۳	$P_{cr}(1): 0.5$ $P_{cr}(2): 0.7$ $P_{cr}(3): 0.9$	$P_{cr}(1): 0.5$ $P_{cr}(2): 0.7$ $P_{cr}(3): 0.9$	$P_{cr}(1): 0.5$ $P_{cr}(2): 0.7$ $P_{cr}(3): 0.9$

با توجه به تعداد فاکتورها و تعداد سطوح آن‌ها، مطابق جدول استاندارد آرایه‌های متعامد در روش تاگوچی طرح L_9 برای تنظیم پارامترهای هر دو الگوریتم انتخاب می‌شود. این طرح در جدول ۳، نشان داده شده است.

جدول ۳. آرایه‌های متعامد طرح L_9

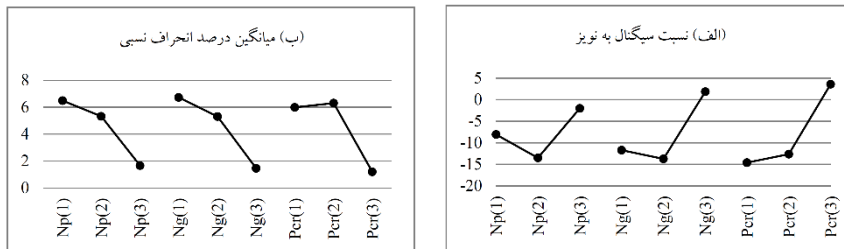
سناریو (آزمایش)	فاکتورها		
	اندازه جمعیت	تعداد نسل‌ها	نرخ تقاطع
۱	$N_p(1)$	$N_g(1)$	$P_{cr}(1)$
۲	$N_p(1)$	$N_g(2)$	$P_{cr}(2)$
۳	$N_p(1)$	$N_g(3)$	$P_{cr}(3)$
۴	$N_p(2)$	$N_g(1)$	$P_{cr}(2)$
۵	$N_p(2)$	$N_g(2)$	$P_{cr}(3)$
۶	$N_p(2)$	$N_g(3)$	$P_{cr}(1)$
۷	$N_p(3)$	$N_g(1)$	$P_{cr}(3)$
۸	$N_p(3)$	$N_g(2)$	$P_{cr}(1)$
۹	$N_p(3)$	$N_g(3)$	$P_{cr}(2)$

برای هر سناریوی ترکیب پارامترها، ۵ تکرار از مسائل کوچک، ۳ تکرار از مسائل متوسط و ۲ تکرار از مسائل بزرگ اجرا شده و درصد انحراف نسبی (RPD) که از رابطه ۲۰، محاسبه شده، معیار عملکرد الگوریتم‌ها در هر سناریوی ترکیب پارامترها بوده است [۱۲].

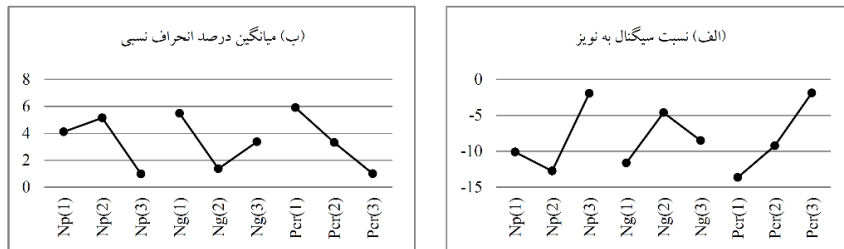
$$RPD = \frac{TC_{Alg} - TC_{best}}{TC_{best}} \times 100 \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

در رابطه ۲۰، TC_{Alg} مقدار تابع هدف مسئله در هر اجرا و TC_{best} بهترین جواب به دست آمده از اجراهای مختلف مسئله است. هرچه مقدار درصد انحراف نسبی کمتر باشد، بهتر است.

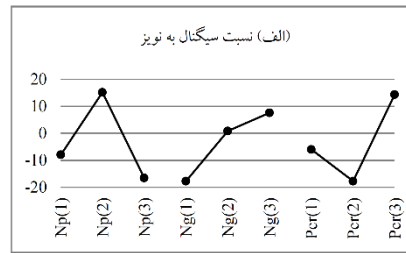
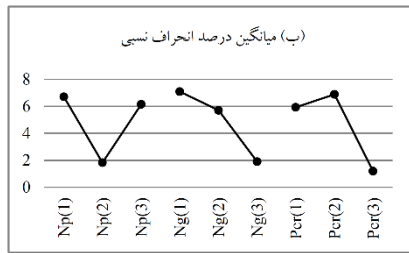
بعد از اجرای همه سناریوها، سطح بهینه فاکتورها در هر الگوریتم با توجه به میانگین درصد انحراف نسبی و نسبت سیگنال به نویز در هر سطح از فاکتور (شکل‌های ۱۰ تا ۱۵) تعیین شد؛ سطح بهینه پارامترهای الگوریتم‌های تکاملی در جدول ۴، نشان داده شده است.



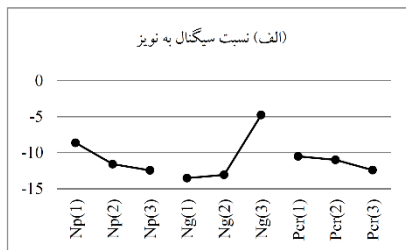
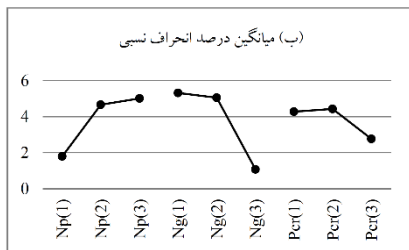
شکل ۱۰. نسبت سیگنال به نویز و میانگین درصد انحراف نسبی در الگوریتم ژنتیک (مسائل کوچک)



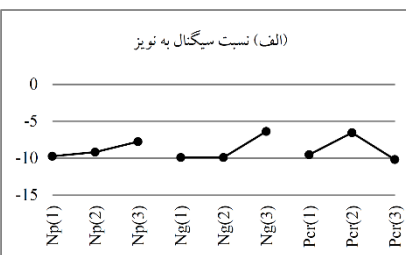
شکل ۱۱. نسبت سیگنال به نویز و میانگین درصد انحراف نسبی در الگوریتم تکامل تفاضلی (مسائل کوچک)



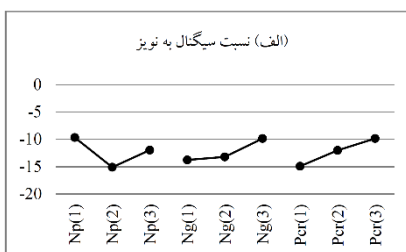
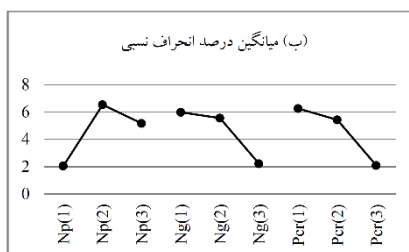
شکل ۱۲. نسبت سیگنال به نویز و میانگین درصد انحراف نسبی در الگوریتم ژنتیک (مسائل متوسط)



شکل ۱۳. نسبت سیگنال به نویز و میانگین درصد انحراف نسبی در الگوریتم تکامل تفاضلی (مسائل متوسط)



شکل ۱۴. نسبت سیگنال به نویز و میانگین درصد انحراف نسبی در الگوریتم ژنتیک (مسائل بزرگ)



شکل ۱۵. نسبت سیگنال به نویز و میانگین درصد انحراف نسبی در الگوریتم تکامل تفاضلی (مسائل بزرگ)

جدول ۴. سطح بهینه فاکتورها در الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی

فاکتورها	الگوریتم ژنتیک			الگوریتم تکامل تفاضلی		
	کوچک	متوسط	بزرگ	کوچک	متوسط	بزرگ
اندازه جمعیت	۱۰۰۰۰	۶۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۳۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰
تعداد نسل‌ها	۱۲۰	۵۰۰	۱۵۰۰	۳۰۰	۵۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰
نرخ تقاطع	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۹	۰/۹	۰/۹

برای تعیین اهمیت نسبی هر فاکتور، به شکل اثر اصلی فاکتور بر مقدار تابع هدف، تحلیل واریانس صورت گرفت که نتایج آن در جدول‌های ۵ تا ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۵. تحلیل واریانس برای نسبت سیگنال به نویز در الگوریتم ژنتیک (مسائل کوچک)

منبع تغییرات	df	SS	MS	F	P-value
اندازه جمعیت	۲	۱۹۹/۰۲	۹۹/۵۱	۶/۱۲	۰/۱۴۰
تعداد نسل‌ها	۲	۴۳۱/۰۶	۲۱۵/۵۳	۱۳/۲۶	۰/۰۷۰
نرخ تقاطع	۲	۵۹۷/۹۲	۲۹۸/۹۶	۱۸/۳۹	۰/۰۵۲
خطا	۲	۳۲/۵۱	۱۶/۲۶		
کل	۸	۱۲۶۰/۵۲			

جدول ۶. تحلیل واریانس برای نسبت سیگنال به نویز در الگوریتم تکامل تفاضلی (مسائل کوچک)

منبع تغییرات	df	SS	MS	F	P-value
اندازه جمعیت	۲	۱۸۹/۵۵۴	۹۴/۷۷۷	۲۰۹/۳۲	۰/۰۰۵
تعداد نسل‌ها	۲	۷۳/۶۹۸	۳۶/۸۴۹	۸۱/۳۸	۰/۰۱۲
نرخ تقاطع	۲	۲۱۰/۹۷۴	۱۰۵/۴۸۷	۲۳۲/۹۸	۰/۰۰۴
خطا	۲	۰/۹۰۶	۰/۴۵۳		
کل	۸	۴۷۵/۱۳۲			

جدول ۷. تحلیل واریانس برای نسبت سیگنال به نویز در الگوریتم ژنتیک (مسائل متوسط)

منبع تغییرات	df	SS	MS	F	P-value
اندازه جمعیت	۲	۱۶۱۱/۴۹	۸۰۵/۷۴	۱۹/۴۶	۰/۰۴۹
تعداد نسل‌ها	۲	۱۰۳۱/۲۳	۵۱۵/۶۲	۱۲/۴۵	۰/۰۷۴
نرخ تقاطع	۲	۱۵۷۶/۰۷	۷۸۸/۰۳	۱۹/۰۳	۰/۰۵۰
خطا	۲	۸۲/۸۳	۴۱/۴۲		
کل	۸	۴۳۰۱/۶۲			

جدول ۸. تحلیل واریانس برای نسبت سیگنال به نویز در الگوریتم تکامل تفاضلی (مسائل متوسط)

منبع تغییرات	df	SS	MS	F	P-value
اندازه جمعیت	۲	۱۸/۱۳۰	۵۲/۶۳۸	۱۲۶/۶۵	۰/۰۶۳
تعداد نسل‌ها	۲	۱۵۷/۸۴۷	۹۹/۳۴۰	۲۳۹/۰۲	۰/۰۴۶
نرخ تقاطع	۲	۴۱/۷۱۷	۲۰/۸۵۸	۵۰/۱۹	۰/۰۹۹
خطا	۱	۰/۴۱۶	۰/۴۱۵		
کل	۷	۲۱۸/۱۰۹			

جدول ۹. تحلیل واریانس برای نسبت سیگنال به نویز در الگوریتم ژنتیک (مسائل بزرگ)

منبع تغییرات	df	SS	MS	F	P-value
اندازه جمعیت	۲	۴/۷۹۰	۲۹/۸۱۱	۲۳۴/۹۶	۰/۰۴۶
تعداد نسل‌ها	۲	۲۸/۴۰۹	۴۱/۱۱۳	۳۲۴/۰۳	۰/۰۳۹
نرخ تقاطع	۲	۷۹/۹۰۷	۳۹/۹۵۳	۳۱۴/۸۹	۰/۰۴۰
خطا	۱	۰/۱۲۷	۰/۱۲۶		
کل	۷	۱۱۳/۲۳۲			

جدول ۱۰. تحلیل واریانس برای نسبت سیگنال به نویز در الگوریتم تکامل تفاضلی (مسائل بزرگ)

منبع تغییرات	df	SS	MS	F	P-value
اندازه جمعیت	۲	۳۷/۳۱۸	۷۰/۹۲۸	۳۱۵/۲۰	۰/۰۴۰
تعداد نسل‌ها	۲	۴۱/۶۸۸	۶۱/۷۶۲	۲۷۴/۴۷	۰/۰۴۳
نرخ تقاطع	۲	۱۳۵/۲۷۵	۶۷/۶۳۷	۳۰۰/۵۷	۰/۰۴۱
خطا	۱	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵		
کل	۷	۲۱۴/۵۰۶			

مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی. در این بخش، دو الگوریتم تکاملی، الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. هر دو الگوریتم با جمعیت تصادفی جواب‌ها فرایند حل را آغاز می‌کنند و طی نسل‌های مختلف با اعمال عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش، این جواب‌ها را بهبود می‌دهند. تفاوت اصلی دو الگوریتم در عملگر انتخاب است. در الگوریتم ژنتیک، احتمال انتخاب یک جواب به عنوان یکی از والدین وابسته به مقدار شایستگی آن است؛ اما در الگوریتم تکامل تفاضلی، احتمال انتخاب شدن وابسته به مقدار شایستگی نیست و همه جواب‌ها دارای احتمال مساوی برای انتخاب شدن هستند؛ به این صورت که پس از اینکه جواب جدید با استفاده از عملگرهای جهش و تقاطع تولید شد، جواب جدید با مقدار قبلی مقایسه و در صورت بهتر بودن برای جایگزینی انتخاب می‌شود. برای مقایسه و ارزیابی کیفیت جواب‌های دو الگوریتم، ۳۰ مسئله حل و ۱۰ بار اجرا شدند.

این مسائل با استفاده از نرم‌افزار لینگو نیز حل شدند و نرخ خطا مطابق رابطه ۲۱ محاسبه شد:

$$ER = \frac{TC_{Algorithm} - TC_{best}}{TC_{best}} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

در رابطه ۲۱، TC_{best} بهترین نتیجه اجراهای مختلف هر دو الگوریتم و نرم‌افزار لینگو در هر مسئله است. بهترین پاسخ هر الگوریتم و نرم‌افزار لینگو در هر مسئله در جدول ۱۱، آورده شده است. در ۹۰ درصد از مسائل هر دو یا یکی از دو الگوریتم عملکرد بهتری از لینگو دارند؛ در ۶۶ درصد از مسائل نیز الگوریتم تکامل تفاضلی از الگوریتم ژنتیک، جواب بهتری ارائه کرده است.

جدول ۱۱. بهترین پاسخ مسائل با الگوریتم ژنتیک، تکامل تفاضلی و لینگو

مسئله	ابعاد ($Z \times K$)	بهترین مقدار تابع هدف		
		لینگو	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم تکامل تفاضلی
S11		۲۰۸۲	۲۰۸۳	۲۰۹۱
S12	۳×۲	۳۸۳۷	۳۵۰۰	۳۴۹۵
S13		۳۵۵۷	۳۴۸۱	۳۴۸۱
S21		۳۵۹۵	۳۳۷۰	۳۳۸۷
S22	۳×۳	۳۴۷۹	۳۰۸۳	۳۱۱۹
S23		۴۹۳۶	۴۴۹۴	۴۵۰۱
S31		۷۴۳۷	۷۴۳۲	۷۴۱۰
S32	۵×۲	۴۵۳۸	۴۵۶۹	۴۵۴۲
S33		۳۵۸۷	۳۶۰۱	۳۵۸۸
S41		۷۹۰۳	۶۹۷۸	۶۹۵۰
S42	۵×۳	۷۵۴۶	۷۰۷۳	۷۰۸۰
S43		۸۳۱۲	۷۹۸۷	۷۸۸۹
S51		۵۴۲۴	۵۴۰۸	۵۰۹۱
S52	۷×۲	۶۹۱۱	۶۸۳۳	۶۸۲۷
S53		۵۸۴۲	۵۸۴۲	۵۸۴۲
S61		۱۲۱۵۷	۱۱۷۷۰	۱۱۵۶۹
S62	۷×۳	۱۰۱۲۷	۱۰۰۳۳	۹۸۳۳
S63		۹۲۹۳	۹۲۹۴	۹۲۲۸
M11		۲۶۸۷۴	۲۵۳۴۷	۲۵۳۳۵
M12	۱۰×۵	۳۶۰۷۰	۳۵۲۵۳	۳۵۲۹۴
M13		۲۹۹۰۳	۲۹۱۳۹	۲۹۰۴۷
M21		۳۹۲۵۶	۳۷۳۱۶	۳۷۱۸۶
M22	۱۵×۵	۴۰۱۴۳	۳۸۴۲۱	۳۸۳۷۰

۳۷۷۸۵	۳۷۸۸۳	۳۹۲۷۱		M23
۵۶۱۰۷	۵۶۳۳۴	۵۷۶۴۰		M31
۵۲۶۴۷	۵۲۴۶۴	۵۳۰۱۴	۲۰×۵	M32
۵۶۲۰۴	۵۶۷۴۵	۵۷۷۰۵		M33
۲۸۴۴۳۵	۲۸۵۵۱۲	۲۹۲۳۶۰		L11
۲۸۴۱۱۱	۲۸۵۱۳۴	۲۹۰۱۰۴	۵۰×۱۰	L12
۲۹۹۷۳۸	۲۹۹۹۴۱	۳۰۶۹۹۵		L13

برای مقایسه نتایج الگوریتم‌ها نمی‌توان بر اساس ۱۰ بار اجرا نتیجه‌گیری کرد؛ بنابراین باید با استفاده از تحلیل آماری به مقایسه الگوریتم‌ها پرداخت. تصمیم‌گیری در مورد استفاده از روش‌های پارامتریک یا ناپارامتریک برای مقایسه الگوریتم‌ها نیازمند بررسی شروطی است. برای استفاده از آزمون‌های پارامتریک باید وجود الزاماتی بررسی شوند که عبارت‌اند از: ۱. تصادفی بودن و استقلال؛ ۲. نرمال بودن و ۳. برابری واریانس‌ها. با توجه به اینکه در اجراهای مختلف، دو الگوریتم، با جواب‌های اولیه تصادفی محاسبات را آغاز می‌کنند، می‌توان مستقل بودن را پذیرفت؛ اما به‌منظور بررسی نرمال بودن از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و برای بررسی برابری واریانس‌ها، از آزمون لویین استفاده می‌شود [۲۶، ۳].

نتایج آزمون‌های بررسی نرمال بودن داده‌ها، در جدول ۱۲ نشان داده شده است. در هر آزمون مقدار P-value نشان‌دهنده میزان مطابقت توزیع داده‌ها با توزیع نرمال است. نتایج نشان می‌دهد، در سطح $\alpha = 0.05$ در الگوریتم ژنتیک در ۸۰ درصد و در الگوریتم تکامل تفاضلی در ۹۴ درصد از مسائل فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها رد می‌شود. نتایج آزمون برابری واریانس‌ها لویین در جدول ۱۳ آورده شده است. در سطح $\alpha = 0.05$ در ۵۰ درصد از مسائل، فرض برابری واریانس‌های دو الگوریتم رد می‌شود.

جدول ۱۲. نتایج آزمون نرمال بودن کولموگروف اسمیرنوف

S41	S33	S32	S31	S23	S22	S21	S13	S12	S11	مسئله
۰/۰۱۷	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۵	>۰/۱۵	<۰/۰۱	>۰/۱۵	<۰/۰۱	<۰/۰۱	>۰/۱۵	ژنتیک
<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۸۱	تکامل تفاضلی
M12	M11	S63	S62	S61	S53	S52	S51	S43	S42	مسئله
<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۶۶	۰/۱۱۰	۰/۰۱۸	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	ژنتیک
<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	تکامل تفاضلی
L13	L12	L11	M33	M32	M31	M23	M22	M21	M13	مسئله
<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۴۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۳۱	۰/۰۳۵	<۰/۰۱	<۰/۰۱	ژنتیک
<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۶۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۴۱	تکامل تفاضلی

جدول ۱۳. نتایج آزمون برابری واریانس‌ها لوین

مسئله	S11	S12	S13	S21	S22	S23	S31	S32	S33	S41
P-value	۰/۰۲۰	۰/۱۸۹	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۱۴۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۵۵	۰/۴۰۱
مسئله	S42	S43	S51	S52	S53	S61	S62	S63	M11	M12
P-value	۰/۲۹۷	۰/۰۰۰	۰/۰۹۹	۰/۰۶۳	۰/۰۵۸	۰/۰۰۰	۰/۰۵۳	۰/۰۱۱	۰/۲۳۷	۰/۲۵۷
مسئله	M13	M21	M22	M23	M31	M32	M33	L11	L12	L13
P-value	۰/۰۳۳	۰/۳۴۹	۰/۰۷۲	۰/۰۰۱	۰/۱۹۷	۰/۰۰۹	۰/۰۱۵	۰/۰۴۷	۰/۲۳۴	۰/۰۳۶

به علت نرمال نبودن و عدم برابری واریانس‌ها، استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک نسبت به پارامتریک قابل‌اتکاتر است؛ بنابراین برای مقایسه نتایج دو الگوریتم از «آزمون من‌ویتنی» استفاده می‌شود. در جدول ۱۴، فرض مقابل ادعا (H_1) در مورد میانه نرخ خطای دو الگوریتم و همچنین مقدار P-value آزمون من‌ویتنی نشان داده شده است. کم‌تر بودن P-value از سطح معناداری در نظر گرفته شده $\alpha = 0.05$ ، نشان‌دهنده برتری الگوریتم بیان شده در فرض مقابل ادعا است. در ۸ مسئله برتری الگوریتم ژنتیک در فرض مقابل ادعا قرار دارد که در ۶ مسئله فرض برابری دو الگوریتم رد می‌شود؛ همچنین در ۲۲ مسئله برتری الگوریتم تکامل تفاضلی در فرض مقابل ادعا قرار دارد که در ۲۱ مسئله فرض برابری دو الگوریتم رد می‌شود؛ بنابراین الگوریتم تکامل تفاضلی عملکرد بهتری برای حل مسئله مورد بررسی دارد.

جدول ۱۴. فرض مقابل ادعا در مورد میانه نرخ خطای دو الگوریتم و P-value آزمون من‌ویتنی

مسئله	S11	S12	S13	S21	S22	S23	S31	S32	S33	S41
فرض H_1	$> DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$> DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$
P-value	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۹۲	۰/۰۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
مسئله	S42	S43	S51	S52	S53	S61	S62	S63	M11	M12
فرض H_1	$> DE$	$< DE$	$< DE$	$> DE$	$> DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$> DE$
P-value	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۱	۰/۲۳۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
مسئله	M13	M21	M22	M23	M31	M32	M33	L11	L12	L13
فرض H_1	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$> DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$	$< DE$
P-value	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش کنترل هزینه‌های زنجیره تأمین سیستم تولید زیست‌متان و بهینه‌یابی مکان تأسیسات زنجیره تأمین و طراحی شبکه حمل‌ونقل مطالعه شده است. مدل برنامه‌ریزی عدد

صحیح مختلط غیرخطی برای اندازه‌گیری هزینه کل زنجیره تأمین زیست‌متان شامل هزینه ساخت رآکتور، هزینه حمل و هزینه به‌کارگرفتن کارگران، تشریح شده است. متغیرهای تصمیم مسئله عبارت‌اند از: مختصات مکانی رآکتور و تعداد کامیون‌هایی که برای حمل انواع پسماند از هر مرکز جمع‌آوری به رآکتور ارسال می‌شوند. محدودیت‌های مدل شامل محدودیت نیروی کار دردسترس در رآکتور، تقاضای رآکتور و دردسترس بودن ماده اولیه به علت فساد پسماند هستند. الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی با روش نمایش اعداد حقیقی برای حل مسئله موردنظر طراحی شدند. مثال‌های عددی حل‌شده برتری الگوریتم تکامل تفاضلی نسبت به الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی پژوهش را تأیید کردند. هر دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ژنتیک در اغلب مسائل نسبت به لینگو به جواب‌های بهینه محلی بهتری ارائه می‌کنند. پیشنهاد می‌شود زنجیره تأمین زیست‌متان چندمرحله‌ای که دربرگیرنده مراکز تقطیر گاز متان و عرضه‌کنندگان متان مایع نیز باشد، طراحی شود. برخی پارامترهای مدل مانند قیمت انواع پسماند، مقدار پسماند دردسترس، تعداد نیروی کار دردسترس با توجه به شرایط آب‌وهوایی یا شرایط اقتصادی و اجتماعی جامعه، دست‌خوش تغییر هستند؛ می‌توان برای لحاظ عدم قطعیت پارامترها از برنامه‌ریزی احتمالی و فازی استفاده کرد؛ لحاظ کردن اهداف اجتماعی یا زیست-محیطی و مدل‌سازی و حل مدل با برنامه‌ریزی چندهدفه، هم‌راستایی با اهداف توسعه پایدار را تضمین می‌کند.

منابع

1. Akbari, M., Dorri, B., & Zandieh, M. (2012). Scheduling working shifts for multi-skilled workforces with genetic algorithm approach, *Journal of industrial management perspective*, 7, 87-102, In Persian
2. Alem Tabriz, A., Roghanian, E., & Hosseinzadeh, M. (2011). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment using genetic algorithm, *Journal of industrial management perspective*, 1, 61-89, In Persian
3. Berenson, M., Levine, D., Szabat, K. A., & Krehbiel, T. C. (2012). *Basic business statistics: Concepts and applications*: Pearson Higher Education AU.
4. Biogas/Biomethane for use as a transport fuel. (2016, May 4). Accessed in May 13, 2016, European Biofuels Technology Platform, Available from: <http://biofuelstp.eu/biogas.html>
5. Celli, G., Ghiani, E., Loddo, M., Pilo, F., & Pani, S. (2008). Optimal location of biogas and biomass generation plants. Paper presented at the *Universities Power Engineering Conference*.
6. Chang, Y.-H. (2010). Adopting co-evolution and constraint-satisfaction concept on genetic algorithms to solve supply chain network design problems. *Expert Systems with Applications*, 37(10), 6919-6930.
7. Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1957). *Experimental designs*, 2, Oxford, England: John Wiley & Sons.
8. De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmäki, J., & Van Orshoven, J. (2014). Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 657-670.
9. Deb, K. (2000). An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186(2-4), 311-338.
10. Feoktistov, V. (2006). *Differential evolution*, 5. New York: Springer.
11. Franco, C., Bojesen, M., Hougaard, J. L., & Nielsen, K. (2015). A fuzzy approach to a multiple criteria and Geographical Information System for decision support on suitable locations for biogas plants. *Applied Energy*, 140, 304-315.
12. Ghojavand, H., Zandieh, M., & Dorri, B. (2011). Meta-heuristic algorithms for integrated logistics network model, *Journal of industrial management perspective*, 3, 99-119, In Persian
13. Höhn, J., Lehtonen, E., Rasi, S., & Rintala, J. (2014). A Geographical Information System (GIS) based methodology for determination of potential biomasses and sites for biogas plants in southern Finland. *Applied Energy*, 113, 1-10.
14. Kannan, G., Sasikumar, P., & Devika, K. (2010). A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling. *Applied Mathematical Modelling*, 34(3), 655-670.
15. Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2), 128-149.
16. Kwietniewska, E., & Tys, J. (2014). Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 491-500.

17. Majumdar, A., & Ghosh, D. (2015). Genetic Algorithm Parameter Optimization using Taguchi Robust Design for Multi-response Optimization of Experimental and Historical Data. *International Journal of Computer Applications*, 127(5), 26-32.
18. Mayerle, S. F., & Neiva de Figueiredo, J. (2016). Designing optimal supply chains for anaerobic bio-digestion/energy generation complexes with distributed small farm feedstock sourcing. *Renewable Energy*, 90, 46-54.
19. Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Takara, D., Oechsner, H., & Khanal, S. K. (2015). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 178, 178-186.
20. Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., & Khanchi, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 608-627.
21. Sheskin, D. J. (2003). *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. Boca raton: crc Press.
22. Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359.
23. Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*. Tokyo, Japan: White Plains: Asian Productivity Organization/UNIPUB.
24. Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*, 74: John Wiley & Sons.
25. Wu, B., Sarker, B. R., & Paudel, K. P. (2015). Sustainable energy from biomass: Biomethane manufacturing plant location and distribution problem. *Applied Energy*, 158, 597-608.
26. Yilmaz Balaman, Ş., & Selim, H. (2014). A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems. *Applied Energy*, 130, 289-304.
27. Yue, D., You, F., & Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 36-56.