

ارائه مدل مکان‌یابی - تخصیص زنجیره تأمین چهارمرحله‌ای بیومتان (مورد مطالعه: طراحی زنجیره تأمین بیومتان در استان خراسان رضوی)

سهیلا خویشتن‌دار^{۱*}، مصطفی زندیه^۲، بهروز درّی^۳، سید امید رعنائی سیادت^۴

^۱ استادیار دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران

Skhishtandar@qiau.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

M_Zandieh@sbu.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

B-Dorri@sbu.ac.ir

^۴ دانشیار مرکز تحقیقات پروتئین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

O_ranaei@sbu.ac.ir

چکیده: بیومتان به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست، نقش مهمی در تأمین انرژی مطابق با معیارهای توسعه پایدار ایفا می‌کند. در این مقاله، مدل ریاضی زنجیره تأمین چهارمرحله‌ای بیومتان ارائه می‌شود که با استفاده از آن، مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری، رآکتورها و واحدهای تقطیر زنجیره تأمین بیومتان انجام شده و نیز مقدار زیست‌توده، گاز بیومتان و بیومتان مایع که از هریک از مراحل زنجیره تأمین به مرحله بعدی ارسال می‌شوند، با هدف حداقل نمودن مجموع هزینه‌های زنجیره تأمین بیومتان تعیین می‌شود. محدودیت‌های نیروی کار در دسترس، تقاضای رآکتورها به پسماند و میزان در دسترس از انواع پسماند، در مدل در نظر گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک برای حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی ارائه شده که مقایسه نتایج آن با نرم‌افزار لینگو نشان می‌دهد بدون در نظر گرفتن زمان حل مسئله، الگوریتم ژنتیک جواب‌های بهتری به دست می‌دهد. همچنین زنجیره تأمین بیومتان در استان خراسان رضوی با استفاده از مدل ریاضی و الگوریتم ژنتیک ارائه شده در مقاله، طراحی و حل شده است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین چهارمرحله‌ای، سیستم تولید بیومتان، مکان‌یابی، تخصیص، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی.

در سیستم تولید بیومتان، کنترل هزینه‌ها بسیار مهم است زیرا یک مدل سودآور، سرمایه‌گذاران را جذب نموده و نوید بخش توسعه صنعت تولید بیومتان خواهد بود. بهینه‌سازی زنجیره تأمین و مدیریت حمل‌ونقل، روش مؤثری در کاهش هزینه‌های راه‌اندازی سیستم تولید بیومتان است.

مطالعات بسیاری روی مدل‌سازی و طراحی زنجیره تأمین انواع بیوانرژی انجام شده است [۶]؛ اما مطالعات اندکی طراحی زنجیره تأمین بیومتان را به صورت خاص مورد مطالعه قرار داده‌اند. بالامن و سلیم [۷] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین تولید بیوگاز در ترکیه ارائه کرده‌اند. هان و همکاران [۸] برای بهینه‌یابی مکان کارخانجات تولید بیومتان در جنوب فنلاند، یک مطالعه موردی انجام داده‌اند. فرانکو و همکاران [۹] روشی فازی برای حل مدل چندمعیاره تعیین مکان مناسب کارخانه‌های بیوگاز به کار برده‌اند. میرله و فیگریدو [۱۰] به طراحی سیستم زنجیره تأمین بیوگاز از فضولات حیوانی از طریق هضم بی‌هوازی پرداخته‌اند. متدولوژی ارائه‌شده در پژوهش آن‌ها با اهداف حداکثر شدن مشارکت و حداقل نمودن اتلاف گاز، تصمیمات مربوط به مکان تجهیزات تولید بیوگاز، سیستم حمل‌ونقل و زمان‌بندی جمع‌آوری زیست‌توده از مزارع را اتخاذ می‌کند. برخی از مقالات از روش‌های هیوریستیک^۴ و متاهوریستیک^۵ برای حل مدل‌های مکان‌یابی-تخصیص^۶ بیوانرژی استفاده کرده‌اند. وو و همکاران [۱۱] زنجیره تأمین یک مرحله‌ای تولید بیومتان شامل یک رآکتور و تعدادی مراکز جمع‌آوری پسماند را با هدف حداقل نمودن هزینه کل سیستم مدل‌سازی نموده و با استفاده از الگوریتم‌های هیوریستیک بهینه‌یابی کرده‌اند. چلی و همکاران [۱۲] با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۷، تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات تولید ترکیبی حرارت و برق^۸ از زیست‌توده در ساردینیا (ایتالیا) را تعیین کرده‌اند. هدف مدل حداکثر نمودن سود اقتصادی سرمایه‌گذاران بوده و از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۹ و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌یابی مسئله استفاده شده است.

هرچند ساختار سیستم تولید بیومتان وجوه مشترکی با ساختار تولید سایر انواع بیوانرژی دارد اما برخی ویژگی‌های ساختاری، مختص تولید بیومتان است. مثلاً نیاز به خطوط لوله برای حمل گاز تولیدشده، فصلی بودن عرضه ماده اولیه، فصلی بودن تقاضا برای

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 منابعی هستند که با جایگزینی منابع سنتی انرژی، به توسعه پایدار کمک نموده، گازهای گلخانه‌ای کمتری منتشر کرده و از لحاظ اقتصادی به صرفه هستند. بین منابع متعدد انرژی‌های تجدیدپذیر، گاز بیومتان^۱ در سال‌های اخیر، مورد توجه قرار گرفته است [۱].

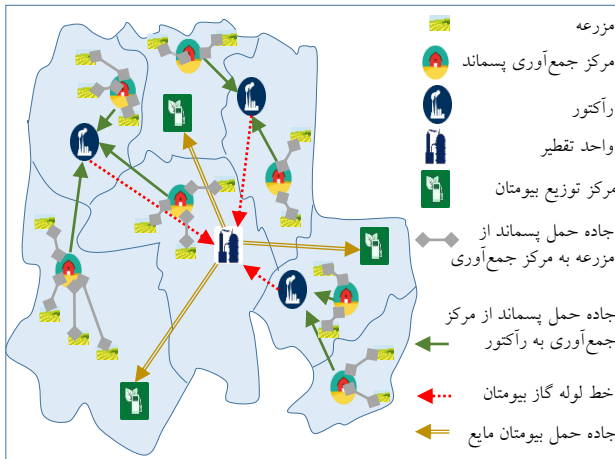
گاز متان، جزء اصلی گاز طبیعی بوده و به علت دارا بودن نسبت بالای حرارت احتراق به جرم مولکولی واحد، گازی شناخته شده است و از آن در تولید برق، گرمایش خانگی و نیز به عنوان سوخت وسایل نقلیه استفاده می‌شود. روش‌های سنتی استخراج گاز طبیعی از زمین، مطابق توسعه پایدار نبوده و هزینه زیادی دارند. گاز بیومتان همانگونه که از نامش پیداست از طریق مجموعه‌ای از واکنش‌های بیوشیمیایی به دست می‌آید. ماده اولیه تولید بیومتان پسماندهای بیولوژیک مانند فضولات حیوانی و بقایای کشاورزی هستند که در دامداری‌ها و مزارع به وفور یافت می‌شوند. تمام نشدنی بودن ماده اولیه تولید بیومتان، نشان می‌دهد که این گاز از منابع تجدیدپذیر انرژی بوده و استفاده از آن به توسعه پایدار کمک می‌کند. در تولید بیومتان از ضایعات و مواد دور ریختنی استفاده می‌شود، لذا نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر تولید آن ارزان‌تر است. کشورهایی مانند آلمان، ایتالیا، سوئیس، فرانسه، ژاپن، چین و آمریکا به صورت گسترده‌ای به استفاده از بیومتان به عنوان منبع جایگزین منابع سنتی انرژی روی آورده‌اند [۲].

روش‌های متنوعی برای تولید متان وجود دارد اما یکی از روش‌های کارا، فرایند هضم بی‌هوازی^۲ است. این فرایند، در یک رآکتور با استفاده از مواد اولیه متنوعی مانند فاضلاب صنعتی و شهری، فضولات حیوانی، بقایای کشاورزی و جنگلی و بخش‌های ارگانیک پسماندهای جامد شهری انجام می‌شود و محصول آن بیوگاز^۳ نامیده می‌شود که شامل ۵۰-۷۵ درصد متان و ۲۵-۵۰ درصد دی‌اکسید کربن است. به علت پایین بودن درصد متان تولید شده توسط این فرایند، استفاده از بیوگاز محدود بوده و نمی‌تواند جایگزین گاز طبیعی شود. اما متان خالص یا بیومتان که از ارتقا بیوگاز حاصل می‌شود، کاربردی مشابه گاز طبیعی دارد [۳].

4. Heuristic
5. Metaheuristic
6. Location Allocation
7. Genetic Algorithm
8. Combined Heat and Power
9. Geographic Information System

1. Biomethane
2. Anaerobic Digestion
3. Biogas

تأمین به مرحله بعدی ارسال می کنند، به نحوی تعیین می شود که مجموع هزینه های زنجیره تأمین بیومتان حداقل گردد. محدودیت های میزان تقاضای راکتور به هر نوع پسماند در مقابل میزان عرضه آن، در دسترس بودن نیروی کار و ضایعات پسماند در این مدل در نظر گرفته شده اند.



شکل (۱): مدل ترسیمی زنجیره تأمین چهار مرحله ای بیومتان

محصول نهایی، فصلی بودن نیروی کار در دسترس و فساد ماده اولیه از ویژگی های سیستم تولید بیومتان است که می بایست در طراحی زنجیره تأمین بیومتان لحاظ شوند. در مقالات مکان یابی-تخصیص زنجیره تأمین بیوانرژی مورد بررسی، زنجیره تأمین چهار مرحله ای که از تهیه ماده اولیه تا عرضه محصول نهایی به مشتریان را شامل شود، طراحی نشده است و فقط به مراحل تهیه ماده اولیه و تولید بیوانرژی در زنجیره تأمین پرداخته اند. لذا در این مقاله، مدل زنجیره تأمین چهار مرحله ای بیومتان شامل مراحل ۱. حمل پسماند از مزارع به مراکز جمع آوری مواد اولیه، ۲. حمل پسماند از مراکز جمع آوری مواد اولیه به راکتورها، ۳. حمل گاز بیومتان از راکتورها به واحد تقطیر، ۴. حمل بیومتان مایع از واحد تقطیر به مراکز توزیع ارائه شده و روش متاهوریستیک مناسب برای حل آن تبیین می شود.

۲. بیان مسئله

زنجیره تأمین بیومتان در این مقاله، از اجزای زیر تشکیل شده است: مناطقی که انواع پسماند از آن ها جمع آوری می شود، مراکز جمع آوری پسماند، راکتورهای تولید گاز بیومتان، واحد تقطیر و مراکز توزیع بیومتان مایع. راکتور با استفاده از پسماند حمل شده از مراکز جمع آوری، بیومتان تولید می کند. بیومتان تولید شده توسط خط لوله برای واحد تقطیر ارسال می شود تا پس از مایع شدن برای مراکز توزیع بیومتان مایع ارسال شود. ماده اولیه تولید بیومتان شامل انواع پسماند مانند بقایای کشاورزی، بقایای جنگلی، فضولات حیوانی و انسانی است. در هر منطقه، یک مرکز جمع آوری قرار دارد که فقط پسماندهای همان منطقه را جمع آوری می کند. مختصات مزارع و مراکز توزیع قبلاً توسط سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین شده است. شکل (۱) مدل ترسیمی زنجیره تأمین چهار مرحله ای بیومتان است.

هزینه های زنجیره تأمین بیومتان شامل هزینه های مواد اولیه، ساخت، حمل و تأسیسات حمل و نیز کارگر است. هزینه ماده اولیه، هزینه خرید پسماند از مراکز جمع آوری است؛ هزینه ساخت تأسیسات زنجیره تأمین، میانگین هزینه ساخت در مناطق مختلف است؛ هزینه حمل، هزینه حمل پسماندها، گاز بیومتان و متان مایع بین مراحل زنجیره تأمین از طریق جاده یا خط لوله است؛ هزینه تأسیسات حمل، هزینه ساخت خط لوله است؛ و هزینه کارگران، هزینه به کارگرفتن کارگران و ماشین آلات مربوط برای بارگیری و باربرداری از کامیون های حمل پسماند است.

در این مقاله، یک مدل غیرخطی مختلط عدد صحیح ارائه می شود که با استفاده از آن مکان تأسیسات زنجیره تأمین چهار مرحله ای بیومتان شامل مراکز جمع آوری پسماند، راکتورها و واحد تقطیر و نیز مقدار پسماند، گاز بیومتان و بیومتان مایع که هر یک از مراحل زنجیره

۳. تعریف مدل ریاضی

۱.۳. نمادهای مدل

پارامترهای مدل عبارت است از:

| | |
|-----------------------------|--|
| K | تعداد کل انواع پسماندهای مورد استفاده به عنوان ماده اولیه |
| Z | تعداد کل مناطق جمع آوری پسماند |
| N | تعداد کل راکتورهایی که قرار است ساخته شوند |
| L | تعداد کل مراکز توزیع بیومتان به مشتریان |
| k | اندیس نوع پسماند، $k = 1, 2, \dots, K$ |
| z | اندیس مناطق مراکز جمع آوری پسماند، $z = 1, 2, \dots, Z$ |
| n | اندیس راکتورها، $n = 1, 2, \dots, N$ |
| l | اندیس مراکز توزیع بیومتان به مشتریان، $l = 1, 2, \dots, L$ |
| Q_z | تعداد مزارع در منطقه z |
| q | اندیس مزارع، $q = 1, 2, \dots, Q_z, z = 1, \dots, Z$ |
| t | فصل ها، $t = 1, 2, \dots, 4$ که اعداد به ترتیب نمایانگر بهار، تابستان، پاییز و زمستان هستند. |
| C^f | هزینه ساخت مراکز جمع آوری، راکتورها و واحد تقطیر که بین سال های عمر پروژه تسهیم شده (دلار) |
| $C_{zqk}^{f \rightarrow h}$ | هزینه حمل پسماند k از مزرعه q به مرکز جمع آوری منطقه z (دلار/ بار کامیون/ کیلومتر) |
| S_{zqkt} | مقدار موجود از پسماند k در مزرعه q در منطقه z در فصل t (بار کامیون) |

۲. مقدار موجود از انواع پسماند در هر مزرعه در هر فصل متفاوت است.
۳. هر مرکز جمع‌آوری، ظرفیت نگهداری همه پسماند منطقه خود را دارد.
۴. بخشی از پسماند در مراکز جمع‌آوری از بین می‌رود.

۲.۲.۳. فرض‌های مرحله حمل پسماند از مراکز جمع‌آوری مواد اولیه به رآکتورها

۱. رآکتور با ترکیب انواع پسماند در هاضم‌های بیومتان تولید می‌کند.
۲. دسترسی به کارگر و ماشین‌آلات مربوط برای هر رآکتور در طول یک سال محدود است.
۳. هنگام حمل پسماندها به رآکتورها، ضایعاتی ایجاد نمی‌شود.
۴. مقدار تقاضای رآکتورها به انواع پسماند در هر فصل معلوم است.
۵. تعداد رآکتورهایی که باید احداث شوند معلوم است.

۳.۲.۳. فرض‌های مرحله حمل گازبیومتان از رآکتورها به واحد تقطیر

۱. رآکتورها به واحد تقطیر از طریق خط لوله مرتبط‌اند.
۲. واحد تقطیر توانایی پردازش همه بیومتان دریافتی را دارد.
۳. گازبیومتان حمل‌شده از رآکتورها، همه تقاضای واحد تقطیر را تأمین می‌کند.

۴.۲.۳. فرض‌های مرحله حمل بیومتان مایع از واحد تقطیر به مراکز توزیع

۱. تقاضای هر مرکز توزیع در هر فصل کاملاً برآورده می‌شود.
۲. همه مراکز توزیع به واحد تقطیر از راه جاده مرتبط‌اند.
۳. مختصات مراکز توزیع معلوم است.

۳.۳. مدل چهارمرحله‌ای مکان‌یابی تخصیص زنجیره تأمین بیومتان

هزینه کل ساخت و عملیات زنجیره تأمین بیومتان از سه بخش تشکیل شده است: الف. هزینه ساخت تأسیسات زنجیره تأمین؛ ب. هزینه حمل مواد و محصول که بستگی به فاصله تأسیسات از یکدیگر، موقعیت جغرافیایی آن‌ها، شرایط جاده و ظرفیت کامیون دارد؛ ج. هزینه به‌کارگرفتن کارگران و ماشین‌آلات.

C^w هزینه یک کارگر و ماشین‌آلات مربوطه (دلار/نفر/بار کامیون)
 $C_{zk}^{h \rightarrow r}$ هزینه حمل پسماند k از مرکز جمع‌آوری منطقه z به یک رآکتور (دلار/بار کامیون/کیلومتر)

C_{zk}^{raw} هزینه تهیه پسماند k از مرکز جمع‌آوری منطقه z برای یک رآکتور (دلار/بار کامیون)

$C_n^{r \rightarrow c}$ هزینه ساخت خط لوله انتقال گاز بیومتان از رآکتور n به واحد تقطیر که بین سال‌های عمر پروژه تسهیم‌شده (دلار/کیلومتر)

$C_l^{c \rightarrow d}$ هزینه حمل متان مایع از واحد تقطیر به مرکز توزیع l (دلار/بار کامیون/کیلومتر)

D_{knt}^r میزان تقاضای پسماند k در رآکتور n در فصل t (بار کامیون)

D_{lt}^d میزان تقاضای بیومتان مایع در مرکز توزیع l در فصل t (بار کامیون)

w_k تعداد کارگر و ماشین‌آلات موردنیاز برای بارگیری و باربرداری از کامیون‌های حمل پسماند k (نفر/بار کامیون)

W_{nt} تعداد کل کارگران و ماشین‌آلات در دسترس برای رآکتور n در فصل t (نفر)

β درصد ضایعات پسماندهای ذخیره‌شده در مراکز جمع‌آوری

f_{zq} $f_{zq} = (x_{zq}^f, y_{zq}^f)$ مختصات مزرعه q در منطقه z

p_l $p_l = (x_l^p, y_l^p)$ مختصات مرکز توزیع l

متغیرهای تصمیم مدل عبارت است از:

h_z $h_z = (x_z^h, y_z^h)$ مختصات مرکز جمع‌آوری منطقه z

r_n $r_n = (x_n^r, y_n^r)$ مختصات رآکتور n

s $s = (x^s, y^s)$ مختصات واحد تقطیر

α_{zkn} تعداد کامیون‌هایی که برای حمل پسماند k از مرکز جمع‌آوری منطقه z به رآکتور n در فصل t ارسال می‌شود.

معیار عملکرد مدل عبارت است از:

$TC(h_z, r_n, s, \alpha_{zkn})$ هزینه کل سیستم چهارمرحله‌ای تولید و توزیع

بیومتان مایع (دلار) که تابعی از مکان مراکز جمع‌آوری پسماند، رآکتورها، واحد تقطیر و نیز مقدار پسماند حمل‌شده از مراکز جمع‌آوری به رآکتورهاست.

۲.۳. فرض‌های مدل

۱.۲.۳. فرض‌های مرحله حمل پسماند از مزارع به مراکز جمع‌آوری

مواد اولیه

۱. مختصات مزارع در هر منطقه معلوم است.

فاصله اقلیدسی $d(a, b)$ نقطه $a = (x_a, y_a)$ از نقطه $b = (x_b, y_b)$ مطابق رابطه (۱) تعریف می شود:

$$d(a, b) = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (1)$$

مدل چهار مرحله ای زنجیره تأمین بیومتان به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \min TC(h_z, r_n, s, \alpha_{zkn}) = & C^f + \\ & \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^{Q_z} \sum_{t=1}^T d(f_{zq}, h_z) C_{zqk}^{f \rightarrow h} S_{zqkt} + \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T C_{zk}^{raw} \alpha_{zkn} + \\ & \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T d(h_z, r_n) C_{zk}^{h \rightarrow r} \alpha_{zkn} + C^w \sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T w_k \alpha_{zkn} + \\ & \sum_{n=1}^N d(s, r_n) C_n^{r \rightarrow c} + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T d(s, p_l) C_l^{c \rightarrow d} D_{lt}^d \end{aligned} \quad (2)$$

subject to :

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{k=1}^K w_k \alpha_{zkn} \leq W_{nt}, \quad \text{for } n = 1, \dots, N, t = 1, \dots, 4 \quad (3)$$

$$\sum_{z=1}^Z \alpha_{zkn} \geq D_{kt}^f, \quad (4)$$

$$\text{for } k = 1, \dots, K, n = 1, \dots, N, t = 1, \dots, 4$$

$$\sum_{n=1}^N \alpha_{zkn} \leq (1 - \beta) \sum_{q=1}^{Q_z} S_{zqkt}, \quad (5)$$

$$\text{for } k = 1, \dots, K, z = 1, \dots, Z, t = 1, \dots, 4$$

$$\alpha_{zkn} \geq 0 \quad \text{and} \quad \alpha_{zkn} \in \mathbb{Z} \quad (6)$$

تابع هدف در رابطه (۲) حداقل نمودن مجموع هزینه های زنجیره تأمین چهار مرحله ای بیومتان شامل هزینه ساخت مراکز جمع آوری، رآکتورها و واحد تقطیر (عبارت اول)، هزینه حمل انواع پسماند از مزارع به مراکز جمع آوری در فصل های مختلف (عبارت دوم)، هزینه تهیه انواع پسماند از مراکز جمع آوری برای رآکتورها در همه فصول (عبارت سوم)، هزینه حمل انواع پسماند از مراکز جمع آوری به رآکتورها در همه فصول (عبارت چهارم)، هزینه به کارگیری کارگران و ماشین آلات مربوط برای بارگیری و باربرداری انواع پسماند از مراکز جمع آوری به رآکتورها در همه فصول (عبارت پنجم)، هزینه ساخت خط لوله انتقال گاز بیومتان از رآکتورها به واحد تقطیر (عبارت ششم)، هزینه حمل بیومتان مایع از واحد تقطیر به مراکز توزیع (عبارت هفتم) است. روابط (۳-۶) بیانگر محدودیت های مدل هستند. مطابق رابطه

(۳) تعداد کل کارگران و ماشین آلات مربوطه برای بارگیری و باربرداری انواع پسماند از مراکز جمع آوری به رآکتورها در هر فصل باید کمتر از تعداد کارگر و ماشین آلات در دسترس در هر رآکتور باشد. مطابق رابطه (۴) مجموع پسماند حمل شده به هر رآکتور در هر فصل، باید بیش از تقاضای رآکتور به آن پسماند در فصل مورد نظر باشد. مطابق رابطه (۵) مجموع پسماند حمل شده به هر رآکتور در هر فصل، محدود به میزان در دسترس از آن نوع پسماند در فصل مورد نظر است. مطابق رابطه (۶) متغیرهای تصمیم مسئله غیرمنفی و صحیح هستند.

۴. الگوریتم ژنتیک برای بهینه یابی مسئله مکان یابی

تخصیص زنجیره تأمین بیومتان

مسائل برنامه ریزی عدد صحیح غیرخطی، براساس تحدب تابع هدف به دو دسته مسائل برنامه ریزی عدد صحیح غیرخطی محدب^۲ و غیرمحدب^۳ تقسیم بندی می شوند. باتوجه به وجود تابع غیرخطی فاصله در تابع هدف و نیز وجود متغیرهای تصمیم عدد صحیح در محدودیت ها، مدل ارائه شده در این مقاله از نوع برنامه ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی^۴ غیرمحدب است. از آنجاکه نمی توان روش های مبتنی بر الگوریتم درخت جستجو^۵ مانند روش شاخه و کران^۶ را به راحتی برای حل این دسته از مسائل به کار برد و همچنین روش های محاسباتی که برای حل مسائل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی غیرمحدب ارائه شده اند، اغلب محدود به مسائل خاصی هستند. لذا در این مقاله از روش های متاهوریستیک که قابلیت کاربرد در طیف گسترده ای از مسائل را دارند، استفاده شده است [۱۳]. الگوریتم ژنتیک که روشی مبتنی بر جمعیت بوده و در بین روش های متاهوریستیک بسیار رایج است، برای دستیابی به جواب موجه نزدیک به بهینه کلی مناسب خواهد بود. مراحل الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله در شکل (۲) نشان داده شده است.

2. Convexity
3. Convex
4. Nonconvex
5. Mixed Integer Nonlinear Programming
6. Search Tree
7. Branch and Bound

1. Euclidean Distance

که (x_l^p, y_l^p) مختصات مرکز توزیع l است. مقادری اولیه به متغیرهای تصمیم صحیح α_{zkn} با توجه به روابط (۳) و (۵-۶) از بازه بیان شده در رابطه (۱۳) مطابق توزیع یکنواخت به صورت تصادفی انجام شده است.

$$0 \leq \alpha_{zkn} \leq \min \left(\frac{W_{nt}}{w_k}, (1-\beta) \sum_{q=1}^{Q_z} S_{zknq} \right), \text{ for all } z, k, n, t \quad (13)$$

۳.۴. 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.

۴.۴. انتخاب

برای انتخاب کروموزوم‌های والد جواب‌های نسل بعد از روش انتخاب مسابقه‌ای^۱ استفاده شده است. به این صورت که برای هر جواب در جمعیت فعلی مقدار تابع هدف و همچنین مجموع تخطی از محدودیت‌های نرمالایز شده محاسبه می‌شود، سپس دو جواب به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و برای انتخاب شدن به‌عنوان والد اول با یکدیگر مسابقه می‌دهند. پس از انتخاب والد اول، والد دوم نیز مطابق همین فرایند انتخاب می‌شود. برنده مسابقه براساس اصول زیر تعیین می‌شود:

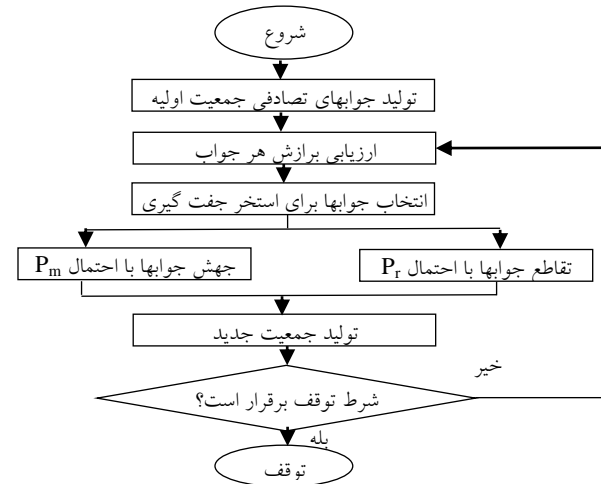
۱. اگر هر دو جواب موجه باشند، جوابی که برآزش بهتری دارد انتخاب می‌شود.
 ۲. اگر یکی از جواب‌ها موجه و دیگری غیرموجه باشد، جواب موجه انتخاب می‌شود.

۳. اگر هر دو جواب غیرموجه باشند، جوابی که مجموع تخطی از محدودیت‌های نرمالایز شده کمتری دارد، انتخاب می‌شود [۱۴].

۵.۴. تقاطع

برای تولید کروموزوم‌های نسل بعد، پس از انتخاب، کروموزوم‌های والد بخش‌هایی از خود را با یکدیگر به اشتراک گذاشته و دو کروموزوم فرزند را تولید می‌کنند. عملگر تقاطع لاپلاس^۲ [۱۵] برای تقاطع جواب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

اگر تعداد متغیرهای تصمیم مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی این مقاله را J در نظر گرفته و دو بردار جواب والد



شکل (۲): طرح‌واره الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله بهینه‌یابی

۱.۴. رمز گذاری جواب

برای رمزگذاری متغیرهای تصمیم مسئله از روش نمایش اعداد حقیقی استفاده شده است.

۲.۴. ایجاد جمعیت اولیه جواب‌ها

تولید جمعیت اولیه با مقادری اولیه مناسب به متغیرهای تصمیم مسئله، در همگرایی سریع‌تر الگوریتم به جواب‌های نزدیک به بهینه کلی، بسیار مؤثر است. مقادری اولیه به متغیرهای تصمیم غیرصحیح شامل h ، r و s مطابق توزیع یکنواخت به صورت تصادفی انجام شده است. در هر منطقه، یک مرکز جمع‌آوری احداث می‌شود که مختصات مزارع آن از قبل مشخص است. لذا برای تعیین مکان احداث هر مرکز جمع‌آوری $h_z = (x_z^h, y_z^h)$ جواب اولیه از بازه بیان شده در روابط (۷-۸) به صورت تصادفی انتخاب می‌شود:

$$\min_{q=1, \dots, Q_z} x_{zq}^f \leq x_z^h \leq \max_{q=1, \dots, Q_z} x_{zq}^f, \text{ for } z=1, \dots, Z \quad (7)$$

$$\min_{q=1, \dots, Q_z} y_{zq}^f \leq y_z^h \leq \max_{q=1, \dots, Q_z} y_{zq}^f, \text{ for } z=1, \dots, Z \quad (8)$$

که (x_{zq}^f, y_{zq}^f) مختصات مزرعه q در منطقه z است. مکان رآکتورها و واحد تقطیر باید جایی بین مزارع و مراکز توزیع باشد. لذا برای تعیین مکان احداث رآکتورها $r_n = (x_n^r, y_n^r)$ و نیز مکان احداث واحد تقطیر $s = (x^s, y^s)$ جواب‌های اولیه از بازه‌های بیان شده در روابط (۹-۱۲) به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند:

$$\min_{all z, q, l} (x_{zq}^f, x_l^p) \leq x_n^r \leq \max_{all z, q, l} (x_{zq}^f, x_l^p), \text{ for } n=1, \dots, N \quad (9)$$

$$\min_{all z, q, l} (y_{zq}^f, y_l^p) \leq y_n^r \leq \max_{all z, q, l} (y_{zq}^f, y_l^p), \text{ for } n=1, \dots, N \quad (10)$$

$$\min_{all z, q, l} (x_{zq}^f, x_l^p) \leq x^s \leq \max_{all z, q, l} (x_{zq}^f, x_l^p), \text{ for } m=1, \dots, M \quad (11)$$

$$\min_{all z, q, l} (y_{zq}^f, y_l^p) \leq y^s \leq \max_{all z, q, l} (y_{zq}^f, y_l^p), \text{ for } m=1, \dots, M \quad (12)$$

1. Tournament Selection
 2. Laplace Crossover

به دست می آیند، رابطه (۱۷) برای جهش جوابها استفاده می شود:

$$u_j = \begin{cases} v_j - \tau(v_j - v^{lb}), \delta < \theta \\ v_j - \tau(v_j - v^{ub}), \delta \geq \theta \end{cases} \quad (17)$$

که $\delta = \frac{v_j - v^{lb}}{v^{ub} - v^{lb}}$ و θ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت^۲ از بازه $[0,1]$ و τ عددی تصادفی با توزیع توانی^۳ از بازه $[0,1]$ می باشد. تابع توزیع و تابع چگالی توزیع توانی به ترتیب عبارت است از:

$$f(x) = \mu x^{\mu-1}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (18)$$

$$F(x) = x^\mu, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (19)$$

که μ شاخص توزیع بوده و قدرت جهش را تعیین می کند. مقادیر کوچک μ تغییر کمی در جواب والد ایجاد می کند، درحالی که با افزایش مقدار μ تنوع بیشتری در جوابهای جهش یافته ایجاد می شود. احتمال تولید جواب جهش یافته u_j در سمت چپ (راست) جواب والد v_j ، متناسب با فاصله جواب والد v_j از v^{lb} (v^{ub}) است. جواب جهش یافته اغلب در حدود تعیین شده برای متغیر تصمیم قرار می گیرد، در صورتی که جواب ایجاد شده پس از جهش غیر صحیح باشد، همانند آنچه در بخش تقاطع ذکر شد عمل می شود.

۵. مثالهای عددی

۱.۵. بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک در حل مسائل فرضی

با پارامترهای تصادفی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ژنتیک طراحی شده برای مسئله برنامه ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی این مقاله، آزمایشات عددی طراحی و اجرا شده اند. کدنویسی الگوریتم ژنتیک با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده و در کامپیوتری با پردازنده AMD Core i5-4750HQ@3.00 GHZ و حافظه داخلی RAM 4 GB اجرا شده است. برای اعتبارسنجی کیفیت جوابهای الگوریتم ژنتیک، مسئله برنامه ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی این مقاله یک بار نیز در برنامه لینگو^۴ برنامه نویسی و اجرا شده است.

پانزده مسئله با اندازه های متفاوت طراحی و هریک ۵۰ بار اجرا شده اند. هزینه ساخت تأسیسات زنجیره تأمین C^f صفر در نظر گرفته شده است. از آنجاکه این هزینه در تابع هدف مسئله به عنوان عدد ثابت با سایر هزینه ها جمع شده، هر زمان که مقدار این هزینه در هنگام کاربرد محاسبه شد، به مقدار تابع هدف جواب نهایی مسئله

بر اساس انتخاب مسابقه ای $V^1 = [v_j^1] \in R^J, V^2 = [v_j^2] \in R^J$ برگزیده شده باشند. برای به دست آوردن فرزندان حاصل از آنها، $U^1 = [u_j^1] \in R^J, U^2 = [u_j^2] \in R^J$ از رابطه های (۱۴) و (۱۵) استفاده می شود:

$$u_j^1 = v_j^1 + \kappa |v_j^1 - v_j^2| \quad (14)$$

$$u_j^2 = v_j^2 + \kappa |v_j^1 - v_j^2| \quad (15)$$

که κ از معکوس تابع توزیع لاپلاس مطابق رابطه (۱۶) به دست می آید:

$$\kappa = \begin{cases} a - b \log_e(\varepsilon), \varepsilon \leq \frac{1}{2} \\ a + b \log_e(\varepsilon), \varepsilon > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (16)$$

در این رابطه، ε به صورت تصادفی مطابق توزیع یکنواخت از بازه $[0,1]$ انتخاب شده است. میزان فاصله والدین از فرزندان توسط b کنترل می شود، به طوری که هر چه مقدار b کمتر باشد، احتمال اینکه فرزندان نزدیک به والدین باشند، بیشتر است و اگر مقدار b زیاد در نظر گرفته شود، انتظار می رود فرزندان دور از والدین باشند. به ازای مقادیر ثابت a و b عملگر تقاطع لاپلاس به گونه ای عمل می کند که توزیع جوابهای فرزندان متناسب با گستردگی جوابهای والدین باشد؛ یعنی اگر والدین به یکدیگر نزدیک باشند، انتظار می رود فرزندان نیز به یکدیگر نزدیک باشند و اگر والدین از هم دور باشند احتمال می رود فرزندان نیز از یکدیگر دور باشند.

در صورتی که بر اثر عملگر تقاطع جوابی ایجاد شود که از حدود در نظر گرفته شده برای متغیرهای تصمیم تخطی نماید؛ یعنی مثلاً $u_j < u_j^{lb}$ یا $u_j > u_j^{ub}$ باشد، در این موارد یک عدد تصادفی در بازه $[u_j^{lb}, u_j^{ub}]$ تولید شده و به جای جواب قبلی قرار داده می شود. متغیرهای تصمیم عدد صحیح نیز در صورتی که پس از تقاطع غیر صحیح باشند، به نزدیک ترین عدد صحیح رند می شوند.

۶.۴. جهش

عملگر جهش موجب انحراف جواب فرزند از جواب والد می شود. عملگر جهش توانی^۱ [۱۶] برای جهش جوابها مورد استفاده قرار گرفته است.

اگر جواب والد $V = [v_j] \in R^J$ و جواب فرزند جهش یافته $U = [u_j] \in R^J$ باشد و v^{lb} و v^{ub} به ترتیب حد پایین و بالای بردار V باشند که برای متغیرهای تصمیم مسئله از روابط (۹) تا (۱۵)

2. Uniform Distribution
3. Power Distribution
4. Lingo

1. Power Mutation

شاخص برتری PL ، درصد اجراهایی که در آن جواب الگوریتم ژنتیک کمتر از جواب لینگو بوده را محاسبه می‌کند. مثلاً اگر $PL = 10\%$ باشد به این معنی است که در ۵ اجرا، الگوریتم ژنتیک به جوابی با مقدار تابع هدف کمتر نسبت به لینگو دست یافته است. متوسط زمان اجرای هر مسئله در ۵۰ بار اجرا نیز ثبت و گزارش شده است.

لینگو از روش دقیق شاخه و کران برای حل مسئله استفاده می‌کند اما الگوریتم ژنتیک ماهیتی تصادفی داشته و در هر اجرا جواب بهینه محلی متفاوتی ارائه می‌دهد. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که بهترین هزینه الگوریتم ژنتیک کمتر از حداقل هزینه لینگوست. لذا طی تکرارهای مختلف، الگوریتم ژنتیک به جواب بهینه محلی بهتری نسبت به لینگو دست می‌یابد.

در ۸ مسئله اول شاخص برتری به زیر ۳۰ درصد نمی‌رسد، ولی در مسائل بعدی همواره زیر ۳۰ درصد است. این موضوع نشان می‌دهد که در مسائل کوچک‌تر، احتمال اینکه الگوریتم ژنتیک به جواب بهینه محلی خوب دست پیدا کند، بیشتر است. علت این موضوع نیز در این نکته نهفته است که الگوریتم ژنتیک تمایل به جستجوی گستره زیادی از نقاط را دارد و مسائل بزرگ‌تر گستره جستجوی بزرگ‌تری را می‌طلبند، لذا عملکرد الگوریتم ژنتیک در مسائل بزرگ‌تر کاهش می‌یابد و برای به دست آوردن جواب رضایت‌بخش در این دسته از مسائل، نیاز به اجراهای آزمایشی بیشتری است.

۲.۵. مورد مطالعه: طراحی زنجیره تأمین تولید بیومتان از

انواع پسماند در استان خراسان رضوی

استان خراسان رضوی با وسعت زیاد و تنوع اقلیمی، یکی از قطب‌های مهم در تولید انواع محصولات باغی، کشاورزی و دامداری در کشور است [۱۷]. به طوری که این استان در تولید گندم و گوجه‌فرنگی، رتبه سوم و در تولید جو، چغندر قند و پنبه رتبه اول را در بین سایر استان‌ها دارد. همچنین جایگاه این استان از نظر تعداد گاو و گوساله ششم، از نظر تعداد گوسفند و بره اول، از نظر تعداد بز و بزغاله سوم و از نظر تعداد مرغ گوشتی و تخم‌گذار به ترتیب چهارم و سوم است [۱۹] و [۱۸].

اضافه می‌شود. درصد ضایع شدن انواع پسماند بر اثر ذخیره‌سازی در مراکز جمع‌آوری $\beta = 0.05$ ، هزینه کارگر و ماشین‌آلات مربوط $C^w = 10$ ، تعداد کل کارگران و ماشین‌آلات در دسترس برای هر رآکتور در هر فصل $W_{mt} = 48ZK$ است که این عدد به صورت تجربی برای جلوگیری از تولید جواب‌های غیرموجه قرار داده شده است.

برای جلوگیری از سوگیری پارامترهای مدل، بقیه پارامترها مطابق توزیع یکنواخت، در بازه‌های مشخص به صورت تصادفی تولید شده‌اند. فهرست پارامترهای تصادفی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): پارامترهای تصادفی مورداستفاده در آزمایش‌های عددی

| پارامتر | نوع پارامتر | بازه پارامتر | پارامتر | نوع پارامتر | بازه پارامتر |
|----------------------------|-------------|--------------|-------------------------|-------------|--------------|
| Q_z | صحیح | [5 10] | $C_l^{c \rightarrow d}$ | غیر صحیح | [3 5] |
| D_{knt}^r | صحیح | [10 20] | D_{lt}^d | غیر صحیح | [5 10] |
| S_{zkt} | صحیح | [40 50] | w_k | صحیح | [3 5] |
| $C_{zq}^{f \rightarrow h}$ | غیر صحیح | [3 5] | x_{zq}^f | غیر صحیح | [0 200] |
| $C_{zk}^{h \rightarrow r}$ | غیر صحیح | [3 5] | y_{zq}^f | غیر صحیح | [0 200] |
| C_{kz}^{raw} | صحیح | [100 150] | x_l^p | غیر صحیح | [0 200] |
| $C_n^{r \rightarrow c}$ | غیر صحیح | [2 4] | y_l^p | غیر صحیح | [0 200] |

البته پارامترهای تصادفی مورداستفاده در جدول (۱) همواره وجود جواب موجه برای مسئله را تضمین نمی‌کنند. لذا در مثال‌های عددی مقاله فقط پارامترهایی مورداستفاده قرار گرفته که از جدول (۱) تولید شده و جواب موجه برای مسئله ارائه دهند.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک براساس آزمون و خطا و انجام تکرارهای مختلف با مقادیر متفاوت پارامترها به شرح زیر تعیین شده‌اند: احتمال تقاطع $p_r = 0.9$ ، احتمال جهش $p_m = 0.1$ و پارامترهای مورداستفاده در رابطه (۱۸) $a = 0.4$ و $b = 6$ در نظر گرفته شده‌اند. نتایج عددی مسائل طراحی شده در جدول (۲) نشان داده شده است. مسائل از کوچک به بزرگ مرتب شده‌اند و اندازه مسائل با مقادیر $Z \times K \times N \times L$ تعیین می‌شود. ستون حداقل هزینه، مقدار بهینه محلی تابع هدف است که توسط نرم‌افزار لینگو به دست آمده است. زمان حل مسئله (ثانیه) نیز، زمان پردازش مورد نیاز برای رسیدن به جواب بهینه محلی است. نتایج حاصل از ۵۰ بار اجرای هر مسئله با الگوریتم ژنتیک در سه ستون شامل ستون‌های بدترین هزینه، بهترین هزینه و میانگین هزینه، نمایش داده شده است. ستون مربوط به

جدول (۲): مقایسه نتایج عددی الگوریتم ژنتیک و لینگو

| شماره مسئله | اندازه مسئله $Z \times K \times N \times L$ | لینگو | | الگوریتم ژنتیک | | |
|-------------|--|-------------|-----------------|----------------|--------------|---------------|
| | | حداقل هزینه | زمان حل (ثانیه) | بدترین هزینه | بهترین هزینه | میانگین هزینه |
| ۱ | $3 \times 1 \times 1 \times 3$ | ۶۶۶۰۰۷ | ۲ | ۶۶۷۵۱۱ | ۵۴۸۷۱۰ | ۶۰۲۳۷۱ |
| ۲ | $3 \times 2 \times 1 \times 5$ | ۱۱۹۸۹۲۱ | ۳ | ۱۲۰۶۵۳۲ | ۱۰۱۹۰۲۰ | ۱۱۱۴۵۶۰ |
| ۳ | $5 \times 3 \times 2 \times 3$ | ۲۸۰۲۲۴۵ | ۲ | ۲۸۱۲۳۸۷ | ۲۳۰۸۵۰۰ | ۲۴۷۶۴۶۹ |
| ۴ | $8 \times 2 \times 3 \times 5$ | ۳۷۱۰۴۰۹ | ۷ | ۴۰۵۲۱۸۴ | ۳۲۰۷۷۰۰ | ۳۵۶۷۱۹۴ |
| ۵ | $5 \times 5 \times 3 \times 8$ | ۵۶۲۱۸۰۶ | ۴ | ۵۶۳۲۵۶۱ | ۴۳۱۵۱۲۰ | ۴۵۱۸۰۳۷ |
| ۶ | $10 \times 5 \times 3 \times 8$ | ۷۸۹۸۶۱۴ | ۳۳ | ۸۳۳۶۳۷۹ | ۷۶۷۶۳۰۰ | ۸۱۹۷۳۰۱ |
| ۷ | $8 \times 5 \times 3 \times 15$ | ۷۱۱۸۳۹۶ | ۱۵ | ۷۳۶۵۸۹۱ | ۶۸۳۶۵۲۰ | ۷۱۱۲۴۱۸ |
| ۸ | $15 \times 5 \times 3 \times 15$ | ۱۲۵۷۲۲۴۰ | ۴۲ | ۱۳۴۶۷۹۱۵ | ۱۱۶۱۳۸۰۰ | ۱۲۱۶۵۴۹۱ |
| ۹ | $15 \times 8 \times 3 \times 15$ | ۱۹۰۴۲۳۶۰ | ۱۴۸ | ۲۴۸۶۱۱۶۰ | ۱۹۰۳۶۲۰۰ | ۲۰۷۱۰۴۹۱ |
| ۱۰ | $20 \times 5 \times 5 \times 15$ | ۱۵۸۲۲۳۱۰ | ۱۹۲ | ۲۳۸۲۵۶۷۹ | ۱۵۸۲۱۲۰۰ | ۲۲۸۲۸۳۴۰ |
| ۱۱ | $20 \times 8 \times 5 \times 25$ | ۲۵۱۴۶۸۰ | ۲۲۳۶ | ۳۱۱۸۷۹۰۱ | ۲۵۱۴۵۱۲۸ | ۲۷۱۸۹۹۳۴ |
| ۱۲ | $25 \times 8 \times 5 \times 25$ | ۳۶۹۶۰۸۵۰ | ۳۵۴ | ۴۶۹۸۴۱۲۶ | ۳۶۹۶۰۲۱۳ | ۴۴۱۹۱۹۰۲ |
| ۱۳ | $20 \times 8 \times 10 \times 30$ | ۴۲۶۴۱۹۰۰ | ۵۶۳ | ۵۸۲۱۵۶۰۱ | ۴۲۶۱۷۹۳۸ | ۵۷۷۸۹۳۴۵ |
| ۱۴ | $30 \times 8 \times 8 \times 30$ | ۵۵۱۲۰۷۶ | ۱۹۷۲ | ۸۴۸۷۲۳۵۴ | ۵۵۰۷۸۴۵۱ | ۸۴۶۷۸۴۷۳ |
| ۱۵ | $30 \times 8 \times 10 \times 30$ | ۷۷۲۳۶۲۴ | ۱۴۸۳ | ۸۱۹۴۶۵۲۳ | ۷۷۱۵۶۹۳۲ | ۸۰۵۶۲۳۱۸ |

تولید انواع بیوانرژی باتوجه به بالغ نبودن تکنولوژی‌های تولید، هزینه هنگفتی تحمیل می‌کند و چنین طرح‌هایی سودآوری طرح‌های تولید سوخت‌های فسیلی را ندارند. اما دولت‌ها باتوجه به نقش بیوانرژی‌ها در بهبود وضعیت کشور در رسیدن به توسعه پایدار، از چنین طرح‌هایی حمایت می‌کنند. خویشتن دار و همکاران [۲۶] تولید بیوگاز در ایران را بهترین گزینه تولید بیوانرژی باتوجه به شاخص‌های زیست‌محیطی، اقتصادی، تکنولوژیکی و اجتماعی ارزیابی کرده‌اند.

استان خراسان رضوی دارای ۲۵ شهرستان است که هریک به‌عنوان مراکز تولید و جمع‌آوری انواع پسماند در نظر گرفته شده‌اند. ماده اولیه تولید بیومتان، باتوجه به میزان تولید سالانه انواع پسماند به تفکیک هر شهرستان، پسماند محصولات زراعی شاخص شامل گندم، جو، چغندر قند، پنبه، خربزه و گوجه‌فرنگی و پسماند دام سنگین شامل گاوشیری، تلیسه^۱ و نر، پسماند دام سبک شامل گوسفند و بز و همچنین پسماند طیور شامل مرغ تخم‌گذار و گوشتی در نظر گرفته شده است [۲۷]. به دلیل نبودن اطلاعات تولید انواع پسماند در فصل‌های مختلف سال، یک فصل در این مطالعه وجود دارد. مختصات، جمعیت و میزان تولید سالانه انواع پسماندها به تفکیک هر شهرستان در جدول (۳) ارائه شده است.

1. Heifer Cattle

باتوجه به رونق کشاورزی و وفور انواع پسماندهای کشاورزی و دارا بودن مواد اولیه کافی، درجه حرارت مناسب و شرایط فنی لازم برای احداث واحدهای بیوگاز همچنین بالا بودن جمعیت دامی و وجود فضولات دامی کافی به‌عنوان ماده اولیه [۲۰]، خراسان رضوی مکانی مناسب برای احداث زنجیره تأمین بیومتان است. احداث زنجیره تأمین علاوه بر منافع اقتصادی و ایجاد اشتغال برای ساکنان، منجر به بهبود کشاورزی از طریق تولید کود غنی شده و نیز تغذیه منابع و سفره‌های آب‌زیرزمینی با پساب خروجی واحدهای بیوگاز می‌شود [۲۱ و ۲۲].

شفیعی و همکاران [۲۳] پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی را در استان خراسان رضوی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد کود دامی حاصل از واحدهای دام و طیور استان خراسان رضوی، قابلیت تأمین حدود ۱۳ درصد از کل گاز مصرفی در بخش کشاورزی کشور را دارا بوده و با مدیریت ۷۵ درصد از فضولات دام و طیور این استان می‌توان بیوگاز را جایگزین گاز مصرفی در بخش کشاورزی استان خراسان رضوی کرد. در سال‌های اخیر پروژه‌های تولید بیوگاز در استان خراسان رضوی مورد توجه سازمان‌های مختلف دولتی و خصوصی بوده است. احداث نیروگاه بیوگازسوز از دنگاه زباله شهر مشهد که با سرمایه‌گذاری سازمان بازیافت شهر مشهد انجام شده [۲۴] و نیز اجرای پروژه تولید بیوگاز از کود حیوانی در نیشابور توسط شرکت سامان انرژی شرق [۲۵]، از نمونه طرح‌های اجرا شده است.

۴۲۰ ریال همچنین هزینه احداث هر کیلومتر خطلوله ۲۰ میلیارد ریال [۳۱] در نظر گرفته شده که باید در طول عمر پروژه تسهیم شود. هزینه تهیه پسماند محصولات زراعی شاخص، دام‌سنگین، دام‌سبک و طیور به ترتیب ۳۰۰ هزار ریال، ۲۵۰ هزار ریال، ۸۰۰ هزار ریال و ۱ میلیون ریال برآورد شده است.

مطابق محاسبات مربوط به میزان بیوگاز قابل استحصال از انواع پسماندها [۲۷] و ظرفیت تولید بیومتان هر راکتور، میزان تقاضای هر راکتور به پسماند محصولات زراعی شاخص، دام‌سنگین، دام‌سبک و طیور به ترتیب ۱۵۷۰۱۳، ۱۶۶۱۲۰، ۵۵۴۷۳ و ۱۲۱۰۳ تن در سال در نظر گرفته شده است. حمل هر ۱۰ تن پسماند توسط یک راننده کامیون انجام می‌شود و تعداد رانندگان در دسترس برای زنجیره تأمین ۷ نفر از هر صد نفر جمعیت استان تخمین زده شده است. درصد ضایعات انواع پسماند بر اثر ذخیره‌سازی نیز ۵ درصد می‌باشد.

در صورتی که بازار هدف زنجیره تأمین بیومتان را بخش حمل‌ونقل بدانیم، با در نظر گرفتن ۶۲۳ میلیارد مترمکعب مصرف گاز طبیعی در بخش حمل‌ونقل استان خراسان رضوی [۲۸] با هدف برآورده کردن تقاضای گاز طبیعی در بخش حمل‌ونقل، تعداد راکتورهای با متوسط ظرفیت تولید ۱۰۰ میلیون مترمکعب بیوگاز و ۶۰ میلیون مترمکعب بیومتان در سال [۲۹] ۱۰ عدد در نظر گرفته شده است. مراکز توزیع بیومتان به مشتریان به منظور پوشش کامل استان، مراکز شهرستان‌ها هستند و میزان تقاضای این مراکز توزیع به نسبت جمعیت هر استان درصدی از کل بیومتان تولید شده است.

هزینه ساخت تأسیسات تولید بیومتان عددی ثابت در تابع هدف است و می‌توان آن را صفر در نظر گرفت بدون آنکه تأثیری در بهینه‌یابی مسئله داشته باشد. به طور متوسط هر تن کیلومتر حمل‌ونقل جاده‌ای ۰/۰۷ لیتر گازوئیل مصرف می‌کند [۳۰] با فرض قیمت هر لیتر گازوئیل ۶۰۰۰ ریال، هزینه حمل هر تن کیلومتر پسماند و متان مایع

جدول (۳): مختصات، جمعیت و میزان تولید سالانه انواع پسماند شهرستان‌های استان خراسان رضوی

| شهرستان | مختصات | | جمعیت [۳۴] | پسماند محصولات زراعی شاخص (تن) [۲۶] | پسماند دام سنگین (تن) [۲۶] | پسماند دام سبک (تن) [۲۶] | پسماند طیور (تن) [۲۶] |
|--------------|--------|-----|------------|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | y | x | | | | | |
| بجستان | ۱۶۵ | ۹۰ | ۳۰،۶۶۴ | ۲۳،۷۰۱ | ۴۰،۱۹۶ | ۱۸،۰۸۸ | ۲،۹۹۶ |
| بردسکن | ۱۰۵ | ۱۶۵ | ۷۲،۶۲۶ | ۶۵،۸۴۷ | ۲۲،۸۰۴ | ۵۸،۹۳۵ | ۲،۲۸۰ |
| بینالود | ۲۵۵ | ۲۷۰ | ۵۸،۴۸۳ | ۸،۲۳۷ | ۶۷،۴۲۲ | ۹،۱۰۲ | ۴۳،۹۸۰ |
| تایباد | ۳۶۰ | ۱۲۰ | ۱۶۲،۰۰۶ | ۱۹۶،۶۷۹ | ۱۷۷،۶۹۵ | ۶۱،۸۱۸ | ۲،۹۸۷ |
| تخت‌جلگه | ۱۸۰ | ۲۷۰ | ۴۲،۷۳۹ | ۸۹،۱۶۹ | ۱۲۱،۳۹۷ | ۲۴،۶۸۲ | ۱،۶۷۳ |
| ترتیب‌جام | ۳۷۵ | ۱۹۵ | ۲۶۲،۷۱۲ | ۴۷۰،۷۲۱ | ۲۰۸،۱۷۵ | ۱۰۹،۶۹۴ | ۳،۰۹۷ |
| ترتیب‌حیدریه | ۲۴۰ | ۱۸۰ | ۲۱۰،۳۹۰ | ۲۰۵،۶۰۵ | ۱۹۵،۹۵۸ | ۵۳،۲۲۶ | ۶،۳۸۳ |
| جغتای | ۷۵ | ۳۱۵ | ۴۷،۹۲۰ | ۱۲۸،۴۹۷ | ۱۲۷،۴۸۵ | ۲۰،۰۵۸ | ۳۲۶ |
| جوین | ۱۰۵ | ۳۰۰ | ۵۴،۱۳۹ | ۱۹۹،۶۳۹ | ۱۱۵،۴۴۹ | ۲۷،۲۵۹ | ۲،۷۴۴ |
| چناران | ۲۴۰ | ۳۱۵ | ۱۲۵،۶۰۱ | ۲۴۲،۹۲۱ | ۱۹۰،۷۳۵ | ۳۷،۸۷۰ | ۲۲،۱۹۹ |
| خلیل‌آباد | ۱۶۵ | ۱۵۰ | ۴۹،۱۱۱ | ۲۲،۸۳۲ | ۳۶،۷۴۶ | ۲۵،۰۹۵ | ۶۳۹ |
| خواف | ۳۳۰ | ۶۰ | ۱۲۱،۸۵۹ | ۸۴،۲۱۷ | ۴۸،۱۵۲ | ۵۴،۸۳۵ | ۲،۵۵۵ |
| درگز | ۲۲۵ | ۳۹۰ | ۷۴،۳۲۶ | ۸۴،۷۴۸ | ۹۶،۶۸۲ | ۴۴،۱۱۱ | ۶۸۰ |
| رشتخوار | ۲۷۰ | ۱۲۰ | ۶۰،۶۳۲ | ۱۶۸،۰۷۷ | ۶۴،۰۰۰ | ۵۰،۰۰۶ | ۳۲۴ |
| زاوه | ۳۰۰ | ۱۶۵ | ۷۱،۶۷۷ | ۹۸،۷۶۸ | ۴۴،۹۶۷ | ۳۳،۶۳۵ | ۲،۰۸۶ |
| سبزوار | ۱۰۵ | ۲۵۵ | ۳۵۷،۸۰۷ | ۲۷۴،۵۶۹ | ۲۰۴،۳۸۷ | ۹۸،۹۷۱ | ۴۱،۹۶۶ |
| سرخس | ۳۷۵ | ۲۷۰ | ۸۹،۹۵۶ | ۱۱۸،۱۳۸ | ۶۲،۷۱۲ | ۶۸،۵۹۴ | ۳۲۴ |
| فریمان | ۳۱۵ | ۲۱۰ | ۹۳،۹۳۰ | ۱۴۲،۱۳۳ | ۱۲۰،۶۳۹ | ۵۶،۴۲۹ | ۴،۸۸۵ |
| قوچان | ۱۹۵ | ۳۶۰ | ۱۷۹،۷۱۴ | ۱۴۳،۴۲۵ | ۱۶۸،۵۹۲ | ۶۶،۲۶۷ | ۲۴،۵۵۲ |
| کاشمر | ۱۹۵ | ۱۸۰ | ۱۵۷،۱۴۹ | ۳۷،۷۱۳ | ۱۲۲،۲۹۸ | ۴۲،۲۵۴ | ۴،۲۳۳ |
| کلات | ۳۱۵ | ۳۳۰ | ۳۸،۲۳۲ | ۷۷،۲۷۲ | ۷۴،۶۸۰ | ۶۵،۷۱۳ | ۸۴۱ |
| گناباد | ۲۲۵ | ۷۵ | ۸۰،۷۸۳ | ۲۷،۷۲۸ | ۱۸۴،۰۲۶ | ۲۳،۸۵۰ | ۹،۵۵۲ |
| مشهد | ۳۰۰ | ۲۸۵ | ۳،۰۶۹،۹۴۱ | ۳۹۵،۶۵۱ | ۶۵۸،۲۰۰ | ۱۱۴،۲۷۱ | ۹۳،۷۰۲ |
| مه‌ولات | ۲۱۰ | ۱۳۵ | ۴۸،۹۰۰ | ۵۳،۵۲۸ | ۱۸،۱۰۸ | ۲۶،۴۹۸ | ۱،۹۵۷ |
| نیشابور | ۲۱۰ | ۲۵۵ | ۴۳۳،۱۰۵ | ۳۸۰،۰۴۵ | ۷۵۳،۳۳۶ | ۱۲۰،۰۸۵ | ۸،۲۴۰ |

جدول (۵): فاصله مراکز جمع آوری از رآکتورها

| مراکز جمع آوری | رآکتورها | | | | | | | | | |
|----------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | ۱۰ | ۹ | ۸ | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ |
| ۱ | ۱۵۲ | ۱۸۱ | ۱۱۷ | ۱۷۶ | ۱۷۱ | ۶۲ | ۱۰۹ | ۹۵ | ۱۷۱ | ۲۱۸ |
| ۲ | ۱۳۶ | ۱۲۹ | ۱۳۶ | ۹۰ | ۱۳۸ | ۱۵۰ | ۱۷۱ | ۹۱ | ۱۳۸ | ۱۳۵ |
| ۳ | ۵۰ | ۷۵ | ۹۱ | ۱۵۱ | ۴۷ | ۱۹۷ | ۱۵۱ | ۱۰۸ | ۴۷ | ۱۵۳ |
| ۴ | ۱۷۴ | ۲۳۴ | ۱۳۴ | ۲۸۹ | ۲۰۲ | ۱۴۲ | ۹۰ | ۱۷۶ | ۲۰۲ | ۳۱۲ |
| ۵ | ۶۰ | ۰ | ۱۰۸ | ۷۶ | ۳۴ | ۲۰۰ | ۱۷۵ | ۹۱ | ۳۴ | ۸۱ |
| ۶ | ۱۵۴ | ۲۰۹ | ۱۳۶ | ۲۷۷ | ۱۷۶ | ۱۹۲ | ۱۲۹ | ۱۸۱ | ۱۷۶ | ۲۹۰ |
| ۷ | ۵۲ | ۱۰۸ | ۰ | ۱۵۴ | ۸۱ | ۱۰۶ | ۶۷ | ۴۵ | ۸۱ | ۱۸۱ |
| ۸ | ۱۷۲ | ۱۱۴ | ۲۱۳ | ۶۷ | ۱۴۸ | ۲۸۳ | ۲۷۶ | ۱۸۱ | ۱۴۸ | ۳۴ |
| ۹ | ۱۳۹ | ۸۱ | ۱۸۱ | ۴۵ | ۱۱۴ | ۲۵۵ | ۲۴۴ | ۱۵۰ | ۱۱۴ | ۰ |
| ۱۰ | ۸۶ | ۷۵ | ۱۳۵ | ۱۴۸ | ۶۷ | ۲۴۰ | ۱۹۷ | ۱۴۲ | ۶۷ | ۱۳۶ |
| ۱۱ | ۱۰۰ | ۱۲۱ | ۸۱ | ۱۲۱ | ۱۱۴ | ۹۶ | ۱۰۹ | ۴۲ | ۱۱۴ | ۱۶۲ |
| ۱۲ | ۲۰۰ | ۲۵۱ | ۱۵۰ | ۲۹۸ | ۲۲۹ | ۱۰۶ | ۸۵ | ۱۸۱ | ۲۲۹ | ۳۲۹ |
| ۱۳ | ۱۶۰ | ۱۲۸ | ۲۱۱ | ۱۸۱ | ۱۳۶ | ۳۱۵ | ۲۷۴ | ۲۱۲ | ۱۳۶ | ۱۵۰ |
| ۱۴ | ۱۱۹ | ۱۷۵ | ۶۷ | ۲۱۳ | ۱۴۸ | ۶۴ | ۰ | ۹۶ | ۱۴۸ | ۲۴۴ |
| ۱۵ | ۹۹ | ۱۵۹ | ۶۲ | ۲۱۵ | ۱۲۷ | ۱۱۷ | ۵۴ | ۱۰۶ | ۱۲۷ | ۲۳۷ |
| ۱۶ | ۱۲۳ | ۷۶ | ۱۵۴ | ۰ | ۱۰۵ | ۲۱۶ | ۲۱۳ | ۱۱۷ | ۱۰۵ | ۴۵ |
| ۱۷ | ۱۵۵ | ۱۹۵ | ۱۶۲ | ۲۷۰ | ۱۶۶ | ۲۴۶ | ۱۸۳ | ۲۰۱ | ۱۶۶ | ۲۷۲ |
| ۱۸ | ۹۲ | ۱۴۸ | ۸۱ | ۲۱۵ | ۱۱۴ | ۱۶۲ | ۱۰۱ | ۱۲۴ | ۱۱۴ | ۲۲۸ |
| ۱۹ | ۱۳۳ | ۹۱ | ۱۸۶ | ۱۳۸ | ۱۰۶ | ۲۸۷ | ۲۵۱ | ۱۸۰ | ۱۰۶ | ۱۰۸ |
| ۲۰ | ۵۸ | ۹۱ | ۴۵ | ۱۱۷ | ۷۶ | ۱۰۹ | ۹۶ | ۰ | ۷۶ | ۱۵۰ |
| ۲۱ | ۱۳۵ | ۱۴۸ | ۱۶۸ | ۲۲۳ | ۱۲۹ | ۲۷۰ | ۲۱۵ | ۱۹۲ | ۱۲۹ | ۲۱۲ |
| ۲۲ | ۱۵۵ | ۲۰۰ | ۱۰۶ | ۲۱۶ | ۱۸۱ | ۰ | ۶۴ | ۱۰۹ | ۱۸۱ | ۲۵۵ |
| ۲۳ | ۹۳ | ۱۲۱ | ۱۲۱ | ۱۹۷ | ۹۵ | ۲۲۳ | ۱۶۸ | ۱۴۸ | ۹۵ | ۱۹۶ |
| ۲۴ | ۹۶ | ۱۳۸ | ۵۴ | ۱۵۹ | ۱۲۰ | ۶۲ | ۶۲ | ۴۷ | ۱۲۰ | ۱۹۶ |
| ۲۵ | ۲۹ | ۳۴ | ۸۱ | ۱۰۵ | ۰ | ۱۸۱ | ۱۴۸ | ۷۶ | ۰ | ۱۱۴ |

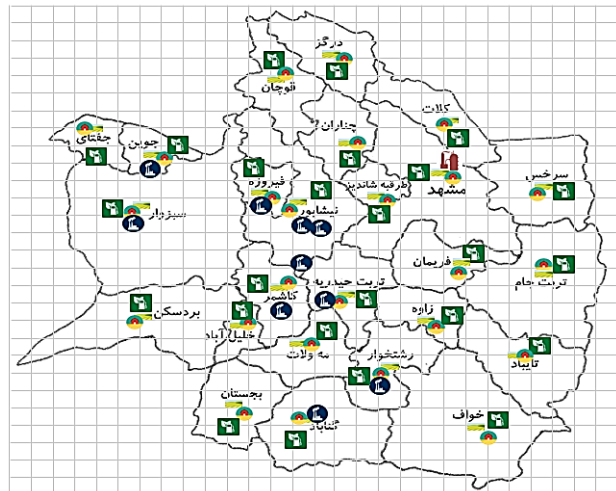
جدول (۶): فاصله رآکتورها از واحد تقطیر

| رآکتورها | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|----------|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|
| فاصله | ۱۹۶ | ۹۵ | ۱۴۸ | ۱۶۸ | ۲۲۳ | ۹۵ | ۱۹۷ | ۱۲۱ | ۱۲۱ | ۹۳ |

جدول (۷): فاصله واحد تقطیر از مراکز توزیع

| مراکز | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| فاصله | ۲۳۷ | ۲۲۹ | ۴۷ | ۱۷۶ | ۱۲۱ | ۱۱۷ | ۱۲۱ | ۲۲۷ | ۱۹۶ | ۶۷ |
| مراکز | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ |
| فاصله | ۱۹۱ | ۲۲۷ | ۱۲۹ | ۱۶۸ | ۱۲۰ | ۱۹۷ | ۷۶ | ۷۶ | ۱۲۹ | ۱۴۸ |
| مراکز | ۲۱ | ۲۲ | ۲۳ | ۲۴ | ۲۵ | | | | | |
| فاصله | ۴۷ | ۲۲۳ | ۰ | ۱۷۵ | ۹۵ | | | | | |

مسئله مکان یابی تخصیص زنجیره تأمین بیومتان در استان خراسان رضوی توسط الگوریتم ژنتیک، حل و بهترین جواب در ۵۰ اجرا ارائه شده است. شکل (۳) و جدول (۴) مختصات رآکتورها و واحد تقطیر و جداول (۵-۷) فاصله هر یک از عناصر زنجیره تأمین از عناصر مرحله بعدی و جدول (۸) مقادیر حمل پسماند از هر یک از مراکز جمع آوری به هر رآکتور را نشان می دهند. مقدار تابع هدف ۱۶۰۶۵۹۵ میلیون ریال و زمان حل مسئله ۱۲۵۲۱ ثانیه بوده است.



شکل (۳): مختصات عناصر زنجیره تأمین بیومتان در استان خراسان رضوی

جدول (۴): مختصات رآکتورها و واحد تقطیر

| رآکتورها و واحد تقطیر | x | y |
|-----------------------|-----|-----|
| رآکتور ۱ | ۱۰۵ | ۳۰۰ |
| رآکتور ۲ | ۲۱۰ | ۲۵۵ |
| رآکتور ۳ | ۱۹۵ | ۱۸۰ |
| رآکتور ۴ | ۲۷۰ | ۱۲۰ |
| رآکتور ۵ | ۲۲۵ | ۷۵ |
| رآکتور ۶ | ۲۱۰ | ۲۵۵ |
| رآکتور ۷ | ۱۰۵ | ۲۵۵ |
| رآکتور ۸ | ۲۴۰ | ۱۸۰ |
| رآکتور ۹ | ۱۸۰ | ۲۷۰ |
| رآکتور ۱۰ | ۲۲۵ | ۲۳۰ |
| واحد تقطیر | ۳۰۰ | ۲۸۵ |

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی این مقاله برای اندازه‌گیری هزینه کل زنجیره تأمین چهار مرحله‌ای بیومتان شامل مراحل جمع‌آوری پسماند، توزیع پسماند، حمل گاز بیومتان و تحویل بیومتان مایع ارائه شده است. متغیرهای تصمیم مسئله عبارت است از: مختصات مکانی مراکز جمع‌آوری، راکتورها و واحدهای تقطیر؛ شبکه حمل‌جاده‌ای بین مراکز جمع‌آوری و راکتورها، واحدهای تقطیر و مراکز توزیع؛ و نیز شبکه حمل خطوط لوله بین راکتورها و واحدهای تقطیرند. محدودیت‌هایی نیز در مدل در نظر گرفته شده که شامل محدودیت نیروی کار در راکتورها، تقاضای راکتور و در دسترس بودن ماده اولیه به علت فساد بخشی از پسماندها هستند.

الگوریتم ژنتیک با روش نمایش اعداد حقیقی و عملگرهای تقاطع لاپلاس و جهش توانی برای مسئله مورد نظر به کار گرفته شد. مثال‌های عددی حل شده، عملکرد الگوریتم ژنتیک را برای حل مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی مقاله تأیید کردند. هنگامی که زمان حل مسئله اهمیت نداشته باشد، الگوریتم ژنتیک نسبت به لینگو جواب‌های بهتری ارائه می‌کند.

باتوجه به اینکه عدم اطمینان از مشخصه‌های زنجیره تأمین بیوانرژی به خصوص در عرضه ماده اولیه محسوب می‌شود، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی پارامتر مربوط به مقادیر عرضه ماده اولیه در فصول مختلف سال باتوجه به تأثیری که مقادیر عرضه پسماندهای کشاورزی از وضعیت آب‌وهوایی می‌گیرند، به صورت فازی یا احتمالی در نظر گرفته شود. استفاده از سایر الگوریتم‌های متاهوریستیک مانند الگوریتم تکامل تقاضی که برای مسائلی با متغیرهای عدد صحیح مناسب‌اند، نیز برای حل این مسئله و مقایسه آن با نتایج الگوریتم ژنتیک توصیه می‌شود.

بخش اعظم زباله‌های شهری ایران را مواد فسادپذیر تشکیل می‌دهد. رطوبت زیاد زباله‌های شهری باعث می‌شود زباله‌های شهری ماده اولیه مناسبی برای تولید بیومتان به روش هضم بی‌هوازی محسوب شوند [۳۲]. در صورت ایجاد بستر مناسب تولید بیوگاز، استان خراسان رضوی پتانسیل خوبی برای استحصال انرژی از فاضلاب‌های شهری دارد [۳۳]. پیشنهاد می‌شود این نوع پسماند نیز در طراحی زنجیره تأمین در تحقیقات آتی و نیز در اجرای نتایج مدل در نظر گرفته شود. همچنین استفاده از داده‌های مکانی سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تعیین مکان‌های مزارع و مراکز توزیع بیومتان در تحقیقات آتی توصیه می‌شود.

جدول (۸): مقادیر حمل انواع پسماند از مراکز جمع‌آوری به راکتورها در زنجیره تأمین طراحی شده برای استان خراسان رضوی

| از | نوع | به | مقدار | از | نوع | به | مقدار |
|----|-----|----|--------|----|-----|----|--------|
| ۱ | ۱ | ۵ | ۲۱۳۳۰ | ۱۴ | ۲ | ۴ | ۵۷۶۰۰ |
| ۱ | ۲ | ۴ | ۳۶۱۷۶ | ۱۴ | ۳ | ۴ | ۲۷۲۷۵ |
| ۱ | ۳ | ۵ | ۱۶۲۷۹ | ۱۴ | ۳ | ۵ | ۱۷۷۳۰ |
| ۱ | ۴ | ۵ | ۲۶۹۶ | ۱۴ | ۴ | ۴ | ۲۹۱ |
| ۲ | ۱ | ۳ | ۱۹۵۶۱ | ۱۵ | ۱ | ۳ | ۸۸۱۹۰ |
| ۲ | ۱ | ۸ | ۲۶۰۶۹ | ۱۵ | ۳ | ۴ | ۲۸۱۹۸ |
| ۲ | ۲ | ۳ | ۲۰۵۲۳ | ۱۵ | ۴ | ۴ | ۱۸۷۷ |
| ۲ | ۳ | ۸ | ۴۹۸۱۴ | ۱۶ | ۱ | ۷ | ۱۵۷۰۱۳ |
| ۲ | ۴ | ۱ | ۲۰۵۲ | ۱۶ | ۲ | ۷ | ۱۲۱۶۶۱ |
| ۳ | ۴ | ۱ | ۸۲۵۳ | ۱۶ | ۲ | ۹ | ۶۲۲۸۷ |
| ۳ | ۴ | ۳ | ۷۷۲۰ | ۱۶ | ۳ | ۷ | ۵۵۴۷۳ |
| ۳ | ۴ | ۴ | ۸۵۴ | ۱۶ | ۳ | ۹ | ۳۳۲۶۰ |
| ۳ | ۴ | ۶ | ۱۰۶۵۲ | ۱۶ | ۴ | ۶ | ۱۴۵۱ |
| ۳ | ۴ | ۱۰ | ۱۲۱۰۳ | ۱۶ | ۴ | ۷ | ۱۲۱۰۳ |
| ۴ | ۱ | ۱۰ | ۱۲۸۸۱۶ | ۱۶ | ۴ | ۸ | ۱۲۱۰۳ |
| ۴ | ۴ | ۴ | ۲۶۸۸ | ۱۶ | ۴ | ۹ | ۱۲۱۰۳ |
| ۵ | ۱ | ۹ | ۸۰۲۵۲ | ۱۷ | ۴ | ۴ | ۲۹۱ |
| ۵ | ۲ | ۳ | ۵۴۲۴ | ۱۸ | ۴ | ۴ | ۴۳۹۶ |
| ۵ | ۲ | ۹ | ۱۰۳۸۳۳ | ۱۹ | ۴ | ۲ | ۱۲۱۰۳ |
| ۵ | ۳ | ۹ | ۲۲۲۱۳ | ۲۰ | ۱ | ۴ | ۵۷۴۴ |
| ۵ | ۴ | ۱ | ۱۵۰۵ | ۲۰ | ۱ | ۱۰ | ۲۸۱۹۷ |
| ۷ | ۱ | ۸ | ۱۳۰۹۴۴ | ۲۰ | ۲ | ۳ | ۱۱۰۰۶۷ |
| ۷ | ۱ | ۹ | ۵۴۱۰۰ | ۲۰ | ۳ | ۱ | ۱۲۸۸۹ |
| ۷ | ۲ | ۵ | ۱۰۲۴۲ | ۲۰ | ۳ | ۱۰ | ۲۵۱۳۹ |
| ۷ | ۲ | ۸ | ۱۶۶۱۲۰ | ۲۰ | ۴ | ۳ | ۳۸۰۹ |
| ۷ | ۳ | ۳ | ۱۴۶۹۹ | ۲۱ | ۴ | ۴ | ۷۵۶ |
| ۷ | ۳ | ۶ | ۲۸۷۰ | ۲۲ | ۱ | ۵ | ۲۴۹۵۵ |
| ۷ | ۳ | ۱۰ | ۳۰۳۳۴ | ۲۲ | ۲ | ۴ | ۹۷۴۵ |
| ۸ | ۲ | ۱ | ۶۲۲۱۶ | ۲۲ | ۲ | ۵ | ۱۵۵۸۷۸ |
| ۸ | ۲ | ۷ | ۴۴۴۵۹ | ۲۲ | ۳ | ۵ | ۲۱۴۶۴ |
| ۸ | ۳ | ۱ | ۱۸۰۵۲ | ۲۲ | ۴ | ۵ | ۸۵۹۶ |
| ۸ | ۴ | ۱ | ۲۹۳ | ۲۴ | ۱ | ۵ | ۴۸۱۷۴ |
| ۹ | ۱ | ۱ | ۱۵۷۰۱۳ | ۲۴ | ۲ | ۴ | ۱۶۲۹۷ |
| ۹ | ۱ | ۹ | ۲۲۶۶۱ | ۲۴ | ۳ | ۳ | ۲۳۸۴۸ |
| ۹ | ۲ | ۱ | ۱۰۳۹۰۴ | ۲۴ | ۴ | ۴ | ۹۵۰ |
| ۹ | ۳ | ۱ | ۲۴۵۳۲ | ۲۴ | ۴ | ۵ | ۸۱۱ |
| ۱۱ | ۱ | ۳ | ۲۰۵۴۸ | ۲۵ | ۱ | ۲ | ۱۵۷۰۱۳ |
| ۱۱ | ۲ | ۳ | ۳۰۱۰۶ | ۲۵ | ۱ | ۳ | ۲۸۰۱۴ |
| ۱۱ | ۲ | ۴ | ۲۹۶۵ | ۲۵ | ۱ | ۶ | ۱۵۷۰۱۳ |
| ۱۱ | ۳ | ۳ | ۱۶۹۲۶ | ۲۵ | ۲ | ۲ | ۱۶۶۱۲۰ |
| ۱۱ | ۳ | ۸ | ۵۶۵۹ | ۲۵ | ۲ | ۶ | ۱۶۶۱۲۰ |
| ۱۱ | ۴ | ۳ | ۵۷۴ | ۲۵ | ۲ | ۱۰ | ۱۶۶۱۲۰ |
| ۱۲ | ۱ | ۵ | ۶۲۵۵۴ | ۲۵ | ۳ | ۲ | ۵۵۴۷۳ |
| ۱۲ | ۲ | ۴ | ۴۳۳۳۷ | ۲۵ | ۳ | ۶ | ۵۲۶۰۳ |
| ۱۴ | ۱ | ۴ | ۱۵۱۲۶۹ | | | | |

- [1] Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Takara, D., Oechsner, H., Khanal, S. K., "Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass: Challenges and Opportunities", *Bioresource Technology*, Vol. 178, pp. 178-186, 2015.
- [2] Biogas/Biomethane for Use as a Transport Fuel, Accessed in May 13, 2016 «European Biofuels Technology Platform, Available from: <http://biofuelstp.eu/biogas.html>, 4 May 2016.
- [3] Kwietniewska, E., Tys, J., "Process Characteristics, Inhibition Factors and Methane Yields of Anaerobic Digestion Process, with Particular Focus on Microalgal Biomass Fermentation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 34, pp. 491-500, 2014.
- [4] Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C., Khanchi, A., "Biomass Supply Chain Design and Analysis: Basis, Overview, Modeling, Challenges, and Future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 24, pp. 608-627, 2013.
- [5] Yue, D., You, F., Snyder, S. W., "Biomass-To-Bioenergy and Biofuel Supply Chain Optimization: Overview, Key Issues and Challenges", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 66, pp. 36-56, 2014.
- [6] Meyer, A. D., Cattrysse, D., Rasinmäki, J., Orshoven, J. V., "Methods To Optimise The Design and Management of Biomass-for-Bioenergy Supply Chains: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, pp. 657-670, 2014.
- [7] Balaman, Ş. Y., Selim, H., "A Network Design Model for Biomass to Energy Supply Chains with Anaerobic Digestion Systems", *Applied Energy*, Vol. 130, pp. 289-304, 2014.
- [8] Höhn, J., Lehtonen, E., Rasi, S., Rintala, J., "A Geographical Information System (GIS) Based Methodology for Determination of Potential Biomasses and Sites for Biogas Plants in Southern Finland", *Applied Energy*, Vol. 113, pp.1-10, 2014.
- [9] Franco, C., Bojesen, M., Hougaard, J. L., Nielsen, K., "A Fuzzy Approach to a Multiple Criteria and Geographical Information System for Decision Support on Suitable Locations for Biogas Plants", *Applied Energy*, Vol. 140, pp. 304-315, 2015.
- [10] Mayerle, S. F., Figueiredo, J. N., "Designing Optimal Supply Chains for Anaerobic Bio-Digestion/Energy Generation Complexes with Distributed Small Farm Feedstock Sourcing", *Renewable Energy*, Vol. 90, pp. 46-54, 2016.
- [11] Wu, B., Sarker, B. R., Paudel, K. P., "Sustainable Energy from Biomass: Biomethane Manufacturing Plant Location and Distribution Problem", *Applied Energy*, Vol. 158, pp. 597-608, 2015.
- [12] Celli, G., Ghiani, E., Loddo, M., Pilo, F., Pani, S., "Optimal Location of Biogas and Biomass Generation Plants", *International Universities Power Engineering Conference*, Padova, Italy, 2008.
- [13] Gantovnik, V. B., Gurdal, Z., Watson, L. T., Anderson-Cook, C. M., "Genetic Algorithm for Mixed Integer Nonlinear Programming Problems Using Separate Constraint Approximations", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 43, No.8, pp. 1844-1849, 2005.
- [14] Deb, K., "An Efficient Constraint Handling Method for Genetic Algorithms", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 186, pp. 311-338, 2000.
- [15] Deep, K., Thakur, M., "A New Crossover Operator for Real Coded Genetic Algorithms", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 188, pp. 895-912, 2007.
- [16] Deep, K., Thakur, M., "A New Mutation Operator for Real Coded Genetic Algorithms", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 193, pp. 211-230, 2007.
- [۱۷] مزروعی، مجتبی، «استان خراسان رضوی مهم ترین و بزرگ ترین قطب تولید کشـور»، بازیـابی در ۳ خرداد ۱۳۹۵. <http://www.iranagrimagazine.com/fa/contents/1365> .۱۳۹۴
- [۱۸] نوراللهی، یونس؛ قلم چی، مهران؛ خیرروز، مهدی؛ انصافی، بهاره، «پتانسیل سنجی و ارزیابی توان تولید بیوگاز از منابع انرژی زیست توده (فضولات دامی) در ایران» سومین کنفرانس انرژی های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران. اصفهان: دانشگاه اصفهان، ۱۳۹۲.
- [۱۹] گروه مطالعات اقتصادی، «رتبه بندی استان های کشور بر حسب تولید و عملکرد محصولات کشاورزی»، تهران: اداره کل مطالعات و بررسی های اقتصادی بانک کشاورزی، صفحه ۱-۸۲، بازیابی در ۱۸ خرداد ۱۳۹۵.
- [۲۰] آقا علی نژاد، علیرضا، «ارزیابی مالی و اقتصادی احداث واحدهای بیوگاز در مناطق مساعد روستایی: مطالعه موردی روستای هلی باغ شهرستان بابلسر» فصلنامه روستا و توسعه، سال ۴، شماره ۲، صفحه ۵۷-۷۹، ۱۳۷۷.
- [۲۱] عادل گیلانی، الهیار؛ سوری، فیروزه، «فناوری بیوگاز گامی در راستای توسعه پایدار روستایی»، ماهنامه نفت و انرژی، شماره ۵۱، صفحه ۱۲-۲۸، ۱۳۸۹.
- [۲۲] امیری، لیلی؛ عبدلی، محمدعلی؛ رضانیانپور، محمد، «پتانسیل سنجی استحصال بیوگاز از پسماند روستایی (مطالعه موردی روستاهای استان یزد)»، پنجمین همایش ملی مدیریت پسماند، مشهد، صفحه ۷-۱، ۱۳۸۹.
- [۲۳] شفیع، ملیحه؛ ابراهیمی نیک، محمدعلی؛ راشکی، علیرضا، «ارزیابی پتانسیل تولید بیوگاز از کود دامی در خراسان رضوی بر پایه مدلی از GIS»، هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۲.
- [۲۴] سانا، «افتتاح اولین نیروگاه بیوگازسوز از دفن گاه زباله شهر مشهد در کشـور»، بازیـابی در ۲۶ مه ۱۳۹۵، www.sun.org.ir/fa/news/136 .۱۳۸۸
- [۲۵] ایرنا، «تولید بیوگاز از کود حیوانی در خراسان رضوی» بازیابی در ۲۶ مهر ۱۳۹۵، www.irna.ir/rkhorasan/fa/News/82172987
- [26] Khishtandar, S., Zandieh, M., Dorri, B., "A Multi Criteria Decision Making Framework for Sustainability Assessment of Bioenergy Production Technologies with Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets: The Case of Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, pp. 1130-1145, 2017.

- احداث خطوط جدید» هفتمین همایش حمل و نقل ریلی. تهران: دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳.
- [۳۱] خبرگزاری مهر، «دو میلیارد تومان هزینه ساخت یک کیلومتر خط لوله انتقال گاز»، بازیابی در ۱۳۹۵، <http://www.mehrnews.com/news/865496>، ۲ اردیبهشت ۱۳۸۸.
- [۳۲] نصیری، جواد، «امکان‌سنجی نیروگاه بیوگازی ساوه»، مدیریت پسماند شماره ۱۱، صفحه ۱۴۳-۱۵۲، ۱۳۸۷.
- [۳۳] بخشی، مریم؛ خانکشی‌زاده، محرم؛ سیدزاده، فریبا؛ قاسمی قوچقار، سعید، «اطلس پتانسیل تئوری تولید برق و انرژی از فاضلاب شهری در کشور»، سومین همایش ملی آب و فاضلاب (با رویکرد اصلاح الگوی مصرف)، تهران: دانشگاه صنعت آب و برق، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، ۱۳۸۸.
- [۳۴] پورتال استان خراسان رضوی <http://amar.khorasan.ir> بازیابی در ۳ خرداد ۱۳۹۵.
- [۲۷] امینیان، افسانه؛ عباسپور فرد، محمدحسین؛ آق‌خانی، محمدحسین، عدالت، محمدحسین، «ارزیابی پتانسیل منابع زیست‌توده در استان خراسان رضوی به منظور تولید زیست انرژی»، محیط‌شناسی، دوره ۳۹، شماره ۲، صفحه ۷۳-۸۲، ۱۳۹۲.
- [۲۸] معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه ریزی کلان برق، «ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۱» تهران: وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، صفحه ۱-۵۱۸، بازیابی در ۳ خرداد ۱۳۹۵، www.saba.org.ir/saba_content/media/image/2014/05/6522_1393_orig.pdf
- [29] Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J., Benemann, J., Rutledge, B., & Salour, D., "Biomethane from Dairy Waste: A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California", Available from: <http://suscon.org/cowpower/biomethaneSourcebook/biomethanesourcebook.php>, 2005.
- [۳۰] سادات حسینی، سید محمد، «لزوم توجه به ظرفیت‌های خالی راه آهن در حمل بار و مسافر برای تشخیص توجیه اقتصادی طرح‌های