

طراحی شبکه و برنامه‌ریزی زنجیره تامین پویای یکپارچه سوخت زیستی هیدروکربن پیشرفته و پالایشگاه‌های نفت با لحاظ کردن جریان‌های مالی

سمیرا بایرام‌زاده

دکتری رشته مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسنده مسئول)

Samira_bairamzadeh@yahoo.com

محمد سعیدی مهرآباد

استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

mehrabad@iust.ac.ir

یکی از چالش‌های اصلی توسعه صنعت انرژی زیستی هزینه زنجیره تامین زیست توده ناشی از تولید ناکارای انرژی زیستی از فیداستاک‌های زیست توده با محتوای انرژی پایین، هزینه‌های بالای لجستیک تولید، پردازش و حمل و نقل زیست توده است. نکته قابل توجه دیگر این است که پیکربندی زنجیره تامین سوخت زیستی می‌تواند ثابت نبوده و به مرور زمان تکامل یابد. با افزایش استقبال از سوخت‌های زیستی و مشوق‌ها، افزایش ظرفیت و ارتقای تکنولوژی در زنجیره تامین‌های موجود سوخت زیستی مطلوب خواهد بود. بر این اساس، در این پژوهش دو راهکار عمده برای تخفیف چالش‌های مذکور پیشنهاد می‌شود. از یک سو، براساس تکنولوژی ارائه شده توسط دپارتمان انرژی ایالات متحده، سوخت زیستی هیدروکربن پیشرفته را می‌توان با استفاده از ایجاد واحدهای ارتقادی در پالایشگاه‌های نفت موجود و از طریق ارتقای محصولات میانی به محصولات نهایی (مانند بنزین، دیزل و سوخت جت) تولید نمود و از زیرساخت‌های موجود پالایشگاه‌های نفت جهت توزیع آن استفاده نمود که با توجه به هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری مربوط به پالایشگاه‌های زیستی در زنجیره تامین سوخت زیستی و با توجه به حذف بخش بزرگی از هزینه حمل و نقل به این دلیل که حمل و نقل از طریق خطوط لوله موجود انجام می‌شود، صرفه‌جویی‌های قابل ملاحظه بزرگی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و کل هزینه‌های سالانه ایجاد می‌شود و در عین حال سودآوری بالاتری از فروش محصولات نهایی جدید حاصل می‌شود. از سوی دیگر، با اعمال نمودن طراحی شبکه زنجیره تامین پویا، دو دوره زمانی استراتژیک و تاکتیکی در مدلسازی در نظر گرفته شده که در آن امکان افزایش ظرفیت تسهیلات و فعال شدن تسهیلات در هر دوره زمانی استراتژیک وجود دارد. همچنین در پژوهش حاضر، علاوه بر جریان فیزیکی، بهینه‌سازی جریان مالی نیز لحاظ شده و ماکزیم‌سازی تابع هدف کارایی برای طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تامین سوخت زیستی پیشنهاد شده است. به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل توسعه داده شده، مدل پیشنهادی را برای طراحی یک مطالعه موردی در ایران به کار برده و نتایج محاسباتی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: زنجیره تامین سوخت زیستی، زیست توده لیگنوسلولزیک، سوخت زیستی هیدروکربن پیشرفته، برنامه‌ریزی

جریان مالی

۱. مقدمه

افزایش تقاضا برای انرژی و مشکلات مهم اقتصادی و محیط زیستی ایجاد شده توسط سوخت‌های فسیلی، زمینه‌های تحول در استفاده وسیع از منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ (RES) را فراهم نموده است. سوخت‌های زیستی به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر شامل سوخت‌های مایع، گاز و جامدی است که به طریقی از زیست توده به دست می‌آیند. سوخت‌های زیستی مایع و بخصوص بیواتانول که از مواد اولیه لیگنوسلولزیک به دست می‌آید به عنوان جایگزین یا افزودنی سوخت حمل و نقل قابل استفاده است (دمیرباش^۲، ۲۰۰۸؛ شارما و همکاران^۳، ۲۰۱۳؛ یو و همکاران^۴، ۲۰۱۲).

مهمترین مزایای استفاده از سوخت‌های زیستی عبارتند از کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، قابلیت حصول از منابع قابل دسترس زیست توده، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه روستایی و منطقه‌ای و زیست تخریب پذیر^۵ بودن (کازم‌زاده و هو^۶، ۲۰۱۳). زیست توده لیگنوسلولزی عمدتاً شامل پسماندهای کشاورزی^۷ (مانند استوور/ساقه و برگ ذرت^۸، کاه گندم^۹ و کاه برنج^{۱۰})، گیاهان انرژی‌ساز^{۱۱} (مانند سوییچ گراس) و زیست توده چوبی جنگل است (تونگ و

-
1. Renewable Energy Sources
 2. Demirbas
 3. Sharma et al.
 4. You et al.
 5. Biodegradable
 6. Kazemzadeh and Hu
 7. Agricultural residues
 8. Corn stover
 9. Wheat straw
 10. Rice straw
 11. Energy crops

همکاران^۱، (۲۰۱۴). پسماندهای لیگنوسلولزی نظیر پسماندهای صنایع چوبی و کاغذ، کشاورزی و زیست توده شهری به دلیل قابلیت دسترسی بالا و هزینه پایین می‌تواند برای تولید سوخت‌های زیستی مورد استفاده قرار گیرند. مواد لیگنوسلولزی از سه بخش اصلی سلولز، همی سلولز و لیگنین تشکیل شده که بخش هولوسلولزی این مواد منبع بالقوه تولید اتانول به حساب می‌آید.

یکی از چالش‌های اصلی توسعه صنعت انرژی زیستی هزینه زنجیره تامین زیست توده ناشی از تولید ناکارای انرژی زیستی از فیداستاک‌های زیست توده با محتوای انرژی پایین، هزینه‌های بالای لجستیک تولید، پردازش و حمل و نقل زیست توده است. به طور معمول پالایشگاه‌های زیستی^۲ مستقل از زنجیره تامین نفت طراحی و مدلسازی می‌شوند ولی با توسعه سوخت زیستی هیدروکربن پیشرفته^۳ شامل بنزین، دیزل و سوخت جت به دست آمده از بایومس سلولزی که از لحاظ کارکرد دقیقاً مشابه سوخت فسیلی متناظرشان هستند؛ فرصت‌های قابل توجهی برای بهره‌برداری از زیرساخت‌های موجود زنجیره تامین نفت، به خصوص واحدهای پالایشگاهی و خطوط لوله پدیدار شده است. در واقع، دپارتمان انرژی ایالات متحده تکنولوژی‌ای را مطرح می‌کند که از طریق آن سوخت زیستی هیدروکربن پیشرفته را می‌توان با استفاده از ایجاد واحدهای ارتقادی^۴ در پالایشگاه‌های نفت موجود و از طریق ارتقای^۵ محصولات میانی^۶ به محصولات نهایی (شامل بنزین، دیزل و سوخت جت) تولید نمود و از زیرساخت‌های موجود پالایشگاه نفت جهت توزیع آن استفاده نمود. در این راستا و با توجه به هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری مربوط به پالایشگاه‌های زیستی در زنجیره تامین سوخت زیستی و با توجه به حذف بخش بزرگی از هزینه حمل و نقل به این دلیل که حمل و نقل از طریق خطوط لوله موجود انجام

1. Tong et al.
2. Biorefineries
3. Advanced hydrocarbon biofuel
4. Upgrading unit
5. Upgrade
6. Bio-intermediates

می‌شود، صرفه‌جویی‌های قابل ملاحظه بزرگی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و کل هزینه‌های سالانه ایجاد می‌شود و در عین حال سودآوری بالاتری از فروش محصولات نهایی جدید حاصل می‌شود (دپارتمان انرژی ایالات متحده^۱، ۲۰۱۲؛ تُنگ و همکاران^۲، ۲۰۱۴، یو و همکاران^۳، ۲۰۱۴). بر اساس مطالب یادشده و با توجه به تناسب شرایط تکنولوژی مطرح شده با وضعیت زیرساخت‌های مربوط به پالایشگاه‌های نفت کشورمان، در این مقاله ساختار زنجیره تامین پیشنهادی براساس این تکنولوژی ارائه شده است.

هدف از طراحی شبکه زنجیره تامین^۴ (SCND)، ارائه یک ساختار شبکه کارا برای موجودیت‌های جدید زنجیره یا مهندسی مجدد یک شبکه موجود برای افزایش ارزش آن است. در این گام، تصمیمات متفاوتی درباره تعداد رده‌های زنجیره^۵، مکان و ظرفیت تسهیلات در هر رده و جریان محصولات/مواد در شبکه اتخاذ می‌شود (فراهانی و همکاران^۶، ۲۰۱۴). سطوح تصمیم در مدیریت زنجیره تامین شامل سه سطح استراتژیک (تعداد، ظرفیت، مکان و تکنولوژی تسهیلات در هر رده زنجیره)، تاکتیکی (سیاست‌های مدیریت موجودی/حمل و نقل) و عملیاتی (تامین تقاضا) است (ملو و همکاران^۷، ۲۰۰۹؛ فراهانی و همکاران^۸، ۲۰۱۴).

به طور طبیعی انتظار می‌رود که به دلیل سرمایه‌گذاری‌های بالای مربوط به تصمیمات استراتژیک زنجیره تامین، این تصمیمات برای مدت زمان قابل توجهی ثابت بمانند. ولی در بعضی موارد، در نظر گرفتن امکان تغییراتی در پیکربندی شبکه که امکان تغییرات تدریجی در ساختار زنجیره تامین و/یا در ظرفیت‌های تسهیلات را ممکن می‌سازد، مهم است (ملو و

1. U.S. Department of Energy
2. Tong et al.
3. Yue et al.
4. Supply chain network design
5. Chain tiers
6. Farahani et al.
7. Melo et al.
8. Farahani et al.

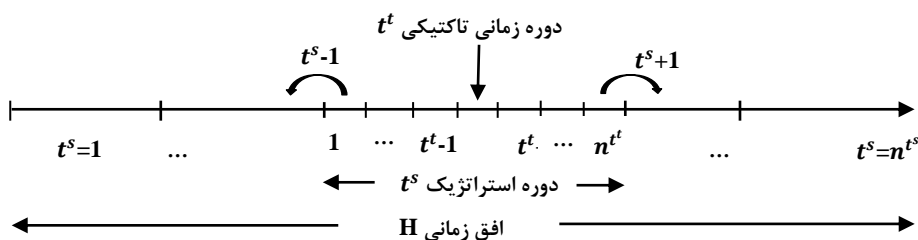
همکاران^۱، ۲۰۰۹). بسیاری از مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تامین چنددوره‌ای^۲ در ادبیات ایستا^۳ هستند، به این معنی که تصمیمات طراحی فقط در ابتدای افق برنامه‌ریزی تعیین می‌شوند ولی برای پیش‌بینی دقیق‌تر تصمیمات عملیاتی، دوره‌های زمانی در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تامین پویا^۴ اجازه تجدیدنظر^۵ در تصمیمات طراحی (تعداد، مکان، تکنولوژی و ظرفیت تسهیلات؛ سیاست‌های منبع‌یابی و بازاریابی) در ابتدای هر دوره برنامه‌ریزی را می‌دهد (کلیبی و همکاران^۶، ۲۰۱۰).

در طراحی زنجیره تامین سوخت زیستی موازنه اصلی^۷ بین هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری و عملیات تولید در تسهیلات تولیدی است؛ زیرا هزینه‌های حمل و نقل نقش زیادی در زنجیره تامین سوخت زیستی دارد، درحالی‌که ممکن است ساخت تسهیلات تولیدی لزوماً از لحاظ مقیاس اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد. یک نکته قابل توجه دیگر این است که پیکربندی زنجیره تامین سوخت زیستی می‌تواند ثابت نبوده و به مرور زمان تکامل یابد. با افزایش استقبال از سوخت‌های زیستی و مشوق‌ها، افزایش ظرفیت و ارتقای تکنولوژی در زنجیره تامین‌های موجود سوخت زیستی مطلوب خواهد بود (یو و همکاران^۸، ۲۰۱۴). برای این اساس، در این پژوهش طراحی شبکه زنجیره تامین سوخت زیستی با در نظر گرفتن امکان توسعه ظرفیت و فعال شدن تسهیلات در دوره‌های زمانی استراتژیک با هدف افزایش کارایی زنجیره تامین پیشنهاد شده است. به این منظور، برای تابع هدف کارایی نسبت مالی بازگشت سرمایه در نظر گرفته شده که از تقسیم درآمد خالص پس از کسر بهره و مالیات بر مجموع دارایی‌های

-
1. Melo et al.
 2. Multi-period SCN design models
 3. Static
 4. Dynamic SCND
 5. Revision
 6. Klibi et al.
 7. Major tradeoff
 8. Yue et al.

ثابت و جاری به‌دست می‌آید و یکی از شاخص‌های گروه نسبت‌های سودآوری^۱ است. نسبت‌های سودآوری که از اهمیت زیادی برخوردارند، نشان‌دهنده کارایی سازمان در استفاده از دارایی‌های خود و مدیریت فعالیت‌هایش است. در واقع این نسبت، به عنوان کارایی عملیاتی در ادبیات مالی عنوان شده است (لانگینیدیس و جورجیادیس^۲، ۲۰۱۱؛ راس^۳، ۲۰۱۰). براساس تابع هدف تعریف شده، محدودیت‌های مالی نیز به مدل توسعه داده شده اضافه شده است تا علاوه بر جریان فیزیکی، جریان مالی شبکه نیز بهینه گردد.

شایان ذکر است در این مقاله برای اعمال رویکرد طراحی شبکه زنجیره تامین پویا و با در نظر گرفتن تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی، در افق زمانی دو نوع دوره زمانی مرتبط با هم در نظر گرفته شده که ابتدا توسط سالما و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۰ پیشنهاد شده که در شکل ۱ نشان داده شده است. اگر H افق زمانی مساله باشد، t^s دوره زمانی استراتژیک و t^t دوره زمانی تاکتیکی است. تعداد، مکان و ظرفیت تسهیلات قابلیت تغییر در هر دوره زمانی استراتژیک را دارند. از سوی دیگر، تصمیمات مربوط به سطح برنامه‌ریزی میان‌مدت در دوره‌های زمانی تاکتیکی تعیین می‌شوند.



شکل ۱. ارتباط دوره‌های زمانی استراتژیک و تاکتیکی در افق برنامه‌ریزی مساله بهینه‌سازی

1. Profitability ratios
2. Longinidis and Georgiadis
3. Ross
4. Salema et al.

ادامه پژوهش حاضر به این صورت سازماندهی شده است: در بخش دوم مرور ادبیات مساله طراحی شبکه زنجیره تامین پویا مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم پس از بیان مساله و مفروضات مدل، مدل ریاضی توسعه داده شده ارائه شده است. در بخش چهارم، به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل توسعه داده شده، مدل پیشنهادی را برای طراحی یک مطالعه موردی در ایران به کار برده و نتایج محاسباتی ارائه شده است. در بخش پنجم نیز به جمع‌بندی و بررسی فرصت‌های پژوهشی آتی پرداخته شده است.

۲. پیشینه تحقیق

در این بخش مطالعات مربوط به مساله طراحی شبکه زنجیره تامین پویا مورد بررسی قرار می‌گیرد. فتاحی و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۵ مطالعات مربوط به طراحی شبکه زنجیره تامین پویا را براساس ساختار زنجیره‌تأمین، تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی، مدل‌سازی ریاضی، رویکرد حل، عدم قطعیت و ملاحظات مربوط به محدودیت بودجه طبقه‌بندی نمود. این نویسندگان خصوصیات عمومی طراحی شبکه زنجیره تامین پویا را برنامه‌ریزی ظرفیت شامل مکان‌یابی مجدد ظرفیت^۲، افزایش^۳، کاهش^۴ و انقباض^۵ و همچنین بازکردن، بستن و بازگشایی مجدد^۶ تسهیل در هر دوره زمانی در نظر گرفته‌اند.

پژوهش خصوصیات اصلی مسائل طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پویا را به صورت زیر در نظر گرفته و براساس آن، در جدول ۱ مطالعات طراحی شبکه زنجیره‌تأمین که برخی از خصوصیات فوق‌الذکر را در طراحی ساختار شبکه داشته باشند طبقه‌بندی می‌کند. تغییرات ظرفیت شامل

1. Fattahi et al.
2. Capacity relocation
3. Expansion
4. Reduction
5. Contraction
6. Reopening

انتقال ظرفیت (از تسهیلات موجود به جدید)، افزایش، کاهش/انقباض به صورت مازولار (مقادیر گسسته ظرفیت) یا پیوسته در نظر گرفته شده است:

- برنامه‌ریزی ظرفیت شامل انتقال/مکان‌یابی مجدد ظرفیت (انتقال ظرفیت از تسهیلات موجود به تسهیلات جدید)، افزایش، کاهش/انقباض
- باز کردن، بستن، مکان‌یابی مجدد (انتقال از تسهیلات موجود به مکان‌های جدید) و بازگشایی مجدد تسهیلات
- تامین‌کننده‌های جدید/کنار گذاشتن تامین‌کننده‌های موجود

ملاچرینودیس و مین^۱ در سال ۲۰۰۰ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه برای مساله مکان‌یابی مجدد و متوقف کردن تسهیلات ساخت و انبارهای شبکه زنجیره‌تامین پیشنهاد نمودند. این نویسندگان کاهش ظرفیت برای تسهیلات موجود تا متوقف شدن کامل آن را به منظور انتقال به سایت‌های جدید در نظر گرفتند. بطور مشابه، ملو و همکاران^۲ در سال ۲۰۰۶ مساله مکان‌یابی مجدد تسهیلات موجود با در نظر گرفتن سناریوهای افزایش و کاهش ظرفیت بطوریکه ظرفیت در تسهیلات موجود جهت انتقال تدریجی به سایت‌های جدید می‌تواند کاهش یابد؛ درحالی‌که افزایش ظرفیت هم در تسهیلات جدید و هم در تسهیلات موجود ممکن است. یک مطالعه دیگر از کاهش سناریو مقاله ویلهلم و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۳ است که پیکربندی مجدد شبکه زنجیره تامین پویا را با لحاظ نمودن امکان افزایش و/یا کاهش ظرفیت‌ها و همچنین باز و بسته نمودن تسهیلات بررسی نمودند. در حالت بستن یک تسهیل یا کاهش ظرفیت، اگر نگهداری هزینه‌اش بیشتر از فروش تسهیل حذف شده باشد زیرساخت و تجهیزات مربوطه را می‌توان به فروش رساند.

1. Melachrinoudis and Min
2. Melo et al.
3. Wilhelm et al.

از سوی دیگر، مساله بازطراحی شبکه که به طراحی مجدد یک SC موجود می‌پردازد نیز با تصمیمات پیکربندی مجدد مانند مکان‌یابی مجدد^۱ تسهیل از سایت موجود به جدید، بازکردن تسهیلات جدید و بستن تسهیلات موجود سروکار دارد (حمامی و فرین^۲، ۲۰۱۴). در نتیجه، مسائل بازطراحی خصوصیات مختلف طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پویا را مطابق جدول ۱ دارا است. ملو و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۲ یک مدل MILP برای مساله بازطراحی شبکه زنجیره تامین با تعداد دلخواه سطوح و با در نظر گرفتن بازنمایی تسهیلات موجود به سایت‌های جدید از طریق انتقال ظرفیت و بستن تسهیلات موجود ارائه کردند. به‌طور مشابه، حمامی و فرین^۴ مساله بازطراحی شبکه یک زنجیره‌تأمین بین‌المللی را با لحاظ نمودن امکان احداث تسهیلات جدید، بستن تسهیلات موجود و انتقال ظرفیت بین تسهیلات بررسی کردند. این نویسندگان امکان انتخاب تأمین‌کنندگان جدید و همچنین کنار گذاشتن تأمین‌کنندگان موجود را در مساله لحاظ کردند.

-
1. Relocation
 2. Hammami and Frein
 3. Melo et al.
 4. Hammami and Frein

جدول ۱. طبقه‌بندی و مرور مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تامین پویا

| تسهیلات (کارخانه‌های تولیدی / انبارها) | | | | | | | تامین | | منبع | | |
|--|--------------|--------------|--------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|--|-----------------------------------|----------------------|
| ظرفیت تسهیلات | | | مکان تسهیلات | | | | | | | کنار گذاشتن تامین‌کننده‌های موجود | تامین‌کننده‌های جدید |
| تغییرات ظرفیت | | | | | | | | | | | |
| کاهش ظرفیت | افزایش ظرفیت | انتقال ظرفیت | نوع | باز نیامی / پیوسته (C) | باز گشایی تسهیلات موجود | باز گشایی تسهیلات بسته شده | بستن تسهیلات موجود | باز کردن تسهیلات جدید | | | |
| ✓ | | ✓ | C | ✓ | | | ✓ | | (ملاچرینودیس و مین ^۱ ، ۲۰۰۰) | | |
| | | | C | | | | ✓ | ✓ | (هینجوسا و همکاران ^۲ ، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸) | | |
| | | | C | | ✓ | | ✓ | ✓ | (کنل و همکاران ^۳ ، ۲۰۰۱) | | |
| | | | C | | | | ✓ | ✓ | (وئنگ و همکاران ^۴ ، ۲۰۱۳) | | |
| | | | | | | | | | (ملو و همکاران ^۵ ، ۲۰۰۶) | | |
| | ✓ | | C | | | | | ✓ | (آقازف ^۶ ، ۲۰۰۵) | | |
| | | | C | | ✓ | | ✓ | ✓ | (دایاس و همکاران ^۷ ، ۲۰۰۷) | | |
| ✓ | ✓ | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | (بهمدردی و لی ^۸ ، ۲۰۰۸) | | |
| | ✓ | | M | | | | | ✓ | (تنح و همکاران ^۹ ، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰) | | |
| | | | | | ✓ | | ✓ | ✓ | (تورس سوتو ^{۱۰} ، ۲۰۱۰) | | |
| | ✓ | | M | | | | | ✓ | (بشیری و همکاران ^{۱۱} ، ۲۰۱۲) | | |

1. Melachrinoudis and Min
2. Hinojosa et al.
3. Canel et al.
4. Wong et al.
5. Melo et al.
6. Aghezzaf
7. Dias et al.
8. Behmardi and Lee
9. Tanh et al.
10. Torres Soto
11. Bashiri et al.

| تسهیلات (کارخانه‌های تولیدی / انبارها) | | | | | | | تامین | | منبع | |
|--|--------------|--------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|------|--|
| ظرفیت تسهیلات | | | مکان تسهیلات | | | | | | | |
| تغییرات ظرفیت | | | نوع | بازنمایی مجدد تسهیلات موجود | بازگشایی تسهیلات بسته شده | بستن تسهیلات موجود | بازکردن تسهیلات جدید | کنار گذاشتن تامین کننده‌های موجود | | تامین کننده‌های جدید |
| کاهش ظرفیت | افزایش ظرفیت | انتقال ظرفیت | هاژولار (M) / پیوسته (C) | | | | | | | |
| | | ✓ | C | ✓ | | ✓ | ✓ | | | (ملو و همکاران ^۱ ، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴) |
| | | | C | | ✓ | ✓ | ✓ | | | (نیکل و همکاران ^۲ ، ۲۰۱۲) |
| | ✓ | | M | | | | ✓ | | | (کوریبا و همکاران ^۳ ، ۲۰۱۳) |
| | ✓ | | M | | | | ✓ | | | (بدری و همکاران ^۴ ، ۲۰۱۳) |
| | ✓ | | M | | ✓ | ✓ | ✓ | | | (پیمنتل و همکاران ^۵ ، ۲۰۱۳) |
| ✓ | ✓ | | M | | | ✓ | ✓ | | | (ویلهم و همکاران ^۶ ، ۲۰۱۳) |
| | | ✓ | M | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | (حمامی و فرین ^۷ ، ۲۰۱۴) |
| | | ✓ | C | ✓ | | | | | | (جبارزاده و همکاران ^۸ ، ۲۰۱۴) |
| | ✓ | | M | | | | ✓ | | | (فتاحی و همکاران ^۹ ، ۲۰۱۵) |
| | | ✓ | C | | | ✓ | ✓ | | | (رزم و همکاران ^{۱۰} ، ۲۰۱۹) |

مأخذ: نتایج تحقیق

1. Melo et al.
2. Nickel et al.
3. Correia et al.
4. Badri et al.
5. Pimentel et al.
6. Wilhelm et al.
7. Hammami and Frein
8. Jabbarzadeh et al.
9. Fattahi et al.
10. Razm et al.

۳. مدل ریاضی

در این بخش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط کسری خطی برای طراحی و برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تامین سوخت زیستی ارائه شده است که ساختار آن در شکل (۲) آورده شده است.

در شبکه زنجیره تامین سوخت زیستی پیشنهادی، همانطور که در شکل (۲) نمایش داده شده زیست توده برداشت شده از نواحی تامین؛ در تسهیلات آماده‌سازی^۱ به محصولات میانی متناسب تبدیل می‌شوند. در اینجا براساس مقاله تُنگک و همکاران در سال ۲۰۱۴^۲ دو نقطه ورودی ممکن برای ترکیب زنجیره تامین سوخت زیستی با پالایشگاه نفت در نظر گرفته شده است. این نقاط ورودی / محصولات میانی شامل روغن زیستی^۳ یا slurry زیستی^۴ است. در صورتیکه واحد ارتقادهای با نقطه ورودی یک در پالایشگاه نفت تجهیز / فعال شود، slurry زیستی ابتدا با نفت خام ترکیب شده سپس به واحدهای تقطیر خام^۵ (CDU) فرستاده شده و در نهایت به بنزین، دیزل و سوخت جت توسط تعدادی از واحدهای ارتقادهای تبدیل می‌شود. از سوی دیگر در صورتی که واحد ارتقادهای با نقطه ورودی دو تجهیز شود، روغن زیستی به واحدهای ارتقادهای جهت تولید محصولات فرستاده می‌شود. قابل ذکر است که در هر دو نقطه ورودی قبل از ارسال محصولات میانی به واحدهای ارتقادهای، پیش‌آماده‌سازی اضافی جهت حذف اکسیژن و سایر آلاینده‌ها^۶ لازم است. محصولات نهایی تولید شده در پالایشگاه نفت شامل بنزین، دیزل و سوخت جت به نواحی تقاضا ارسال می‌شوند. گره‌های شبکه شامل نواحی تامین زیست توده، مکان‌های بالقوه برای تسهیلات آماده‌سازی و واحدهای تجهیز پالایشگاه‌های نفت، و نواحی تقاضا است.

1. Pre conversion facilities
2. Tong et al.
3. Bio-oil
4. Bioslurry
5. crude distillation units
6. Contaminants

ماکزیمم‌سازی بازگشت سرمایه (ROA)^۱ به عنوان تابع هدف زنجیره تامین سوخت زیستی مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی علاوه بر جریان فیزیکی جریان مالی را بهینه کرده و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم استراتژیک و تاکتیکی را تعیین می‌کند.

تصمیمات استراتژیک شامل انتخاب مکان از بین مکان‌های بالقوه، ظرفیت تولید و انتخاب تکنولوژی برای تسهیلات آماده‌سازی و واحدهای ارتقادهی است. همچنین مقادیر مربوط به جریان مالی شامل دارایی‌های جاری، دارایی‌های ثابت، حقوق صاحبان سهام، بدهی‌های کوتاه‌مدت، بدهی‌های بلندمدت، سرمایه‌گذاری دارایی‌های ثابت، ارزش موجودی‌ها، کل دارایی‌ها، درآمد خالص فروش، هزینه کل، استهلاک، بهره پرداختی، درآمد خالص پس از کسر بهره و مالیات، درآمد مشمول مالیات، درآمد ناخالص پیش از کسر بهره و مالیات در هر دوره استراتژیک تعیین می‌شود. از سوی دیگر، متغیرهای تصمیم تاکتیکی زیر در هر دوره زمانی تاکتیکی بهینه می‌شوند:

- زمین تخصیص داده شده جهت کاشت زیست توده
- مقدار زیست توده برداشت شده که به تسهیلات آماده‌سازی ارسال می‌شود،
- مقدار زیست توده استفاده شده جهت تبدیل به محصولات میانی و مقدار محصولات میانی تولید شده در تسهیلات آماده‌سازی
- مقدار محصولات میانی ارسال شده از تسهیلات آماده‌سازی به واحدهای ارتقادهی در پالایشگاه‌های نفت
- مقدار محصولات نهایی تولید شده در پالایشگاه‌های نفت و مقدار ارسال شده از پالایشگاه‌های نفت به نواحی تقاضا

1. Return on assets

- مقدار موجودی محصولات میانی در تسهیلات آماده‌سازی و موجودی محصولات نهایی (بنزین، دیزل و سوخت جت) در پالایشگاه‌های نفت
 - مقدار کمبود مربوط به تقاضای محصولات نهایی
- ابتدا اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم به کار برده شده در مدل ریاضی و سپس محدودیت‌ها و تابع هدف مدل تشریح می‌شوند.

اندیس‌ها

| | |
|---|-------|
| مجموعه نواحی تامین زیست توده | SZ |
| مجموعه مکان‌های بالقوه برای تسهیلات آماده‌سازی | pc |
| مجموعه پالایشگاه‌های نفت | pr |
| مجموعه نواحی تقاضا | dz |
| مجموعه انواع فیداستاک‌های زیست توده | b |
| مجموعه تکنولوژی‌های موجود برای تسهیلات آماده‌سازی | qq |
| مجموعه محصولات نهایی | fp |
| مجموعه محصولات نهایی / نقاط ورودی | ip |
| مجموعه دوره‌های زمانی تکنیکی | t^t |
| مجموعه دوره‌های زمانی استراتژیک | t^s |

پارامترها

| | |
|--|------------------------|
| زمین تخصیص داده شده از ناحیه تامین SZ در وضعیت فعلی برای کاشت زیست توده نوع b (هکتار) | $la_{sz,b}^{existing}$ |
| نرخ افزایش تخصیص ناحیه تامین SZ برای کاشت زیست توده جدید نوع b در دوره زمانی استراتژیک t^s (هکتار) | $\Delta la_{sz,b,t^s}$ |
| بازدهی زیست توده نوع b در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (تن/هکتار) | yl_{b,t^s,t^t} |
| ماکزیمم نرخ برداشت مجاز زیست توده از نواحی تامین | μ_b |

| | |
|---|------------------------------|
| نسبت ضایعات برداشت زیست توده نوع b در ناحیه تامین SZ در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t | hs_{b,sz,t^s,t^t} |
| نرخ تبدیل زیست توده نوع b با تکنولوژی qq به محصول میانی ip | $\theta_{b,ip,qq}^{conv}$ |
| نرخ تبدیل محصول میانی نوع ip به محصول میانی ip | $\theta_{ip,fp}^{int,ipro}$ |
| حد بالای ظرفیت تسهیلات آماده‌سازی در یک دوره زمانی استراتژیک (تن/سال) | $up^{cap,pc}$ |
| حد پایین ظرفیت تسهیلات آماده‌سازی در یک دوره زمانی استراتژیک (تن/سال) | $low^{cap,pc}$ |
| حد بالای ظرفیت تجهیز نقطه ورودی ip در یک دوره زمانی استراتژیک (گیگاژول/سال) | $up_{ip}^{cap,pr}$ |
| حد پایین ظرفیت تجهیز نقطه ورودی ip در یک دوره زمانی استراتژیک (گیگاژول/سال) | $low_{ip}^{cap,pr}$ |
| مینیم درصد کارایی ظرفیت تسهیلات آماده‌سازی در یک دوره زمانی استراتژیک (درصد) | ω^{pc} |
| مینیم درصد کارایی ظرفیت واحدهای ارتقادهی در یک دوره زمانی استراتژیک (درصد) | $\omega_{ip}^{min,retrofit}$ |
| نرخ تبدیل حجم یک واحد محصول نهایی fp به معادل انرژی (گیگاژول/گالن) | φ_{fp} |
| درصد تامین تقاضای محصول نهایی fp در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t | bl_{t^s,t^t}^{fp} |
| مقدار تقاضای محصول نهایی نوع fp در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (گالن) | d_{fp,dz,t^s,t^t} |
| هزینه ثابت باز کردن مرکز جمع‌آوری در مکان pc با تکنولوژی نوع qq (دلار) | $FXC_{pc,qq}^{pccons}$ |
| هزینه ثابت تجهیز پالایشگاه نفت pr با نقطه ورودی ip (دلار) | $FXC_{ip,pr}^{retrofit}$ |

| | |
|---|-------------------------------|
| هزینه متغیر تولید در تسهیلات آماده‌سازی با تکنولوژی qq (دلار/تن) | VC_{qq}^{pconv} |
| هزینه متغیر تولید در پالایشگاه نفت با نقطه ورودی نوع ip (دلار/گیگاژول.سال) | $VPC_{ip}^{retrofit}$ |
| هزینه خرید و برداشت زیست توده نوع b (دلار/تن) | HVC_b |
| میزان رطوبت زیست توده نوع b | ms_b |
| مسافت بین ناحیه تامین SZ و تسهیل آماده‌سازی PC توسط وسیله حمل و نقل m (کیلومتر) | $DC_{sz,pc,m}^{sup,conv}$ |
| هزینه حمل و نقل زیست توده نوع b توسط وسیله حمل و نقل m به‌ازای هر واحد مسافت از ناحیه تامین SZ به تسهیل آماده‌سازی PC (دلار/کیلومتر) | $TC_{b,sz,pc,m}^{sup,conv}$ |
| مسافت بین مرکز جمع‌آوری PC و پالایشگاه نفت PR توسط وسیله حمل و نقل m (کیلومتر) | $DC_{pc,pr,m}^{conv,pr}$ |
| هزینه حمل و نقل محصول میانی ip توسط وسیله حمل و نقل m به‌ازای هر واحد مسافت از تسهیل آماده‌سازی PC به پالایشگاه نفت PR (دلار/کیلومتر) | $TC_{ip,pc,pr,m}^{conv,pr}$ |
| مسافت بین پالایشگاه نفت PR و ناحیه تقاضا dz توسط وسیله حمل و نقل m (کیلومتر) | $DC_{pr,dz,m}^{pr,dem}$ |
| هزینه حمل و نقل محصول نهایی fp توسط وسیله حمل و نقل m به‌ازای هر واحد مسافت از پالایشگاه نفت PR به ناحیه تقاضا dz (دلار/کیلومتر) | $TC_{fp,pr,dz,m}^{pr,dem}$ |
| هزینه بارگذاری و تخلیه وسیله حمل و نقل نوع m برای زیست توده نوع b از ناحیه تامین SZ به تسهیل آماده‌سازی PC (دلار) | $TRLC_{b,sz,pc,m}^{sup,conv}$ |
| هزینه بارگذاری و تخلیه وسیله حمل و نقل نوع m برای محصول میانی نوع ip از تسهیل آماده‌سازی PC به پالایشگاه نفت PR (دلار) | $TRLC_{ip,pc,pr,m}^{conv,pr}$ |
| هزینه بارگذاری و تخلیه وسیله حمل و نقل نوع m برای محصول نهایی | $TRLC_{fp,pr,dz,m}^{pr,dem}$ |

| | |
|--|-------------------------------------|
| نوع fp از پالایشگاه نفت pr به ناحیه تامین dz (دلار) | |
| ظرفیت کامیون نوع m (تن یا گالن) | $TRCA_m$ |
| هزینه نگهداری زیست توده نوع b در مرکز جمع‌آوری در یک دوره زمانی تاکتیکی (دلار/تن.فصل) | $HC_b^{bms,col}$ |
| هزینه نگهداری زیست توده پردازش شده نوع b در بیوپالایشگاه در یک دوره زمانی تاکتیکی (دلار/تن.فصل) | $HC_b^{prebms,ref}$ |
| هزینه نگهداری بیواتانول در بیوپالایشگاه در دوره زمانی t (دلار/گالن.فصل) | $HC_{bel,br}$ |
| هزینه نگهداری زیست توده نوع b در تسهیل آماده‌سازی در یک دوره زمانی تاکتیکی (دلار/تن.فصل) | $HC_b^{bms,conv}$ |
| هزینه نگهداری محصول میانی نوع ip در تسهیل آماده‌سازی در یک دوره زمانی تاکتیکی (دلار/گالن.فصل) | $HC_{ip}^{int,conv}$ |
| هزینه نگهداری محصول میانی نوع ip در پالایشگاه نفت در یک دوره زمانی تاکتیکی (دلار/گالن.فصل) | $HC_{ip}^{int,pr}$ |
| هزینه نگهداری محصول نهایی نوع fp در پالایشگاه نفت در یک دوره زمانی تاکتیکی (دلار/گالن.فصل) | $HC_{fp}^{fpro,pr}$ |
| قیمت فروش محصول نهایی نوع fp در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (دلار/گالن) | pr_{fp,t^s,t^t}^{fpro} |
| قیمت خرید بیواتانول از بیوپالایشگاه‌های موجود در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (دلار/گالن) | $price_{t^s,t^t}^{bel}$ |
| هزینه جریمه کمبود تقاضای واحد محصول نهایی در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (دلار/گالن) | $penalty_{t^s,t^t}^{fpro,shortage}$ |
| نرخ استهلاك در دوره زمانی استراتژیک t^s | DR_{t^s} |
| نرخ سود کوتاه‌مدت در دوره زمانی استراتژیک t^s | STR_{t^s} |
| نرخ سود بلندمدت در دوره زمانی استراتژیک t^s | LTR_{t^s} |

| | |
|----------------------------------|--|
| TR_{t^S} | نرخ مالیات در دوره زمانی استراتژیک t^S |
| | متغیرهای باینری |
| Z_{pc,qq,t^S} | ۱ اگر تسهیل آماده‌سازی با تکنولوژی qq در دوره زمانی استراتژیک t^S و مکان pc احداث شود و در غیر این صورت ۰ |
| δ_{ip,pr,t^S} | ۱ اگر پالایشگاه نفت pr با نقطه ورودی ip در دوره زمانی استراتژیک t^S تجهیز شود و در غیر این صورت ۰ |
| | متغیرهای پیوسته |
| l_{sz,b,t^S} | مقدار زمین تخصیص داده شده از ناحیه تامین sz برای کاشت زیست توده نوع b (هکتار) |
| $hrvbms_{b,sz,t^S,t^t}$ | زیست توده برداشت شده نوع b از ناحیه تامین sz در دوره زمانی استراتژیک t^S و دوره زمانی تاکتیکی t^t (تن) |
| $F_{b,sz,pc,m,t^S,t^t}^{hrvbms}$ | زیست توده نوع b حمل شده از ناحیه تامین sz به تسهیل آماده‌سازی pc توسط وسیله حمل و نقل m در دوره زمانی استراتژیک t^S و دوره زمانی تاکتیکی t^t (تن) |
| $F_{ip,pc,pr,m,t^S,t^t}^{int}$ | مقدار محصول میانی ip حمل شده از تسهیل آماده‌سازی pc به پالایشگاه نفت pr توسط وسیله حمل و نقل m در دوره زمانی استراتژیک t^S و دوره زمانی تاکتیکی t^t (گالن) |
| $F_{fp,pr,dz,m,t^S,t^t}^{fpro}$ | مقدار محصول نهایی حمل شده از پالایشگاه نفت pr به ناحیه تقاضا dz توسط وسیله حمل و نقل m در دوره زمانی استراتژیک t^S و دوره زمانی تاکتیکی t^t (گالن) |
| $bms_{b,pc,qq,t^S,t^t}^{conv}$ | مقدار زیست توده نوع b که برای تولید محصول میانی در تسهیل آماده‌سازی pc توسط تکنولوژی نوع qq در دوره زمانی استراتژیک t^S و دوره زمانی تاکتیکی t^t (تن) |

| | |
|---|----------------------------------|
| مقدار محصول میانی تولید شده نوع ip در تسهیل آماده‌سازی pc توسط تکنولوژی qq در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (گالن) | $Int_{ip,pc,qq,t^s,t^t}^{conv}$ |
| مقدار محصول میانی تولید شده نوع ip در پالایشگاه نفت pr که در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t تبدیل به محصولات نهایی می‌شود (گالن) | Int_{ip,pr,t^s,t^t}^{pr} |
| مقدار محصول نهایی تولید شده نوع fp که در پالایشگاه نفت pr در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (گالن) | $Fpro_{fp,pr,t^s,t^t}$ |
| سطح موجودی زیست توده نوع b در تسهیل آماده‌سازی pc در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (تن) | $I_{b,pc,t^s,t^t}^{bms,conv}$ |
| سطح موجودی محصول میانی نوع ip در تسهیل آماده‌سازی pc در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (تن) | $I_{ip,pc,t^s,t^t}^{int,conv}$ |
| سطح موجودی زیست توده پردازش شده نوع b در بیوپالایشگاه br در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (تن) | $I_{b,br,t^s,t^t}^{prebms,ref}$ |
| سطح موجودی محصول نهایی در پالایشگاه نفت pr در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (گالن) | I_{fp,pr,t^s,t^t}^{fpro} |
| ظرفیت تسهیل آماده‌سازی pc در دوره زمانی استراتژیک t^s (تن/سال) | cap_{pc,t^s}^{pconv} |
| مقدار افزایش ظرفیت تسهیل آماده‌سازی pc در دوره زمانی استراتژیک t^s (تن/سال) | $cap_{pc,t^s}^{exp,pconv}$ |
| ظرفیت تجهیز نقطه ورودی ip در پالایشگاه نفت pr در دوره زمانی استراتژیک t^s (گیگاژول/سال) | $cap_{pr,ip,t^s}^{retrofit}$ |
| مقدار افزایش ظرفیت تجهیز نقطه ورودی ip در پالایشگاه نفت pr در دوره زمانی استراتژیک t^s (گیگاژول/سال) | $cap_{pr,ip,t^s}^{exp,retrofit}$ |
| کمبود تقاضای محصول نهایی در دوره زمانی استراتژیک t^s و دوره زمانی تاکتیکی t^t (گالن) | $fp_{t^s,t^t}^{shortage}$ |

| | |
|--|-----------------|
| درآمد خالص فروش در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | NTS_{t^S} |
| مجموع هزینه‌ها در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | TC_{t^S} |
| دارایی‌های ثابت در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | FA_{t^S} |
| دارایی‌های جاری در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | CA_{t^S} |
| حقوق صاحبان سهام در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | E_{t^S} |
| سرمایه‌گذاری بر دارایی‌های ثابت در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | FAI_{t^S} |
| استهلاک در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | $DPR_{t^S,t}$ |
| درآمد ناخالص پیش از کسر بهره و مالیات استهلاک در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | $EBIT_{t^S}$ |
| بهره پرداختی در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | ITP_{t^S} |
| وام بلندمدت در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | LTL_{t^S} |
| وام کوتاه‌مدت در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | STL_{t^S} |
| درآمد مشمول مالیات در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | TI_{t^S} |
| درآمد خالص پس از کسر بهره و مالیات در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | $NOPAT_{t^S,t}$ |
| پول نقد در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | $CASH_{t^S}$ |
| حساب‌های دریافتی در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | RA_{t^S} |
| ارزش موجودی در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | INR_{t^S} |
| درآمد انتشار سهام جدید در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | NIS_{t^S} |
| کل دارایی‌ها در دوره زمانی استراتژیک t^S (دلار) | TIC_{t^S} |

○ محدودیت مقدار زیست توده برداشت شده

محدودیت میزان قابل برداشت زیست توده از هر ناحیه تامین در هر دوره زمانی تاکتیکی با توجه به ضایعات برداشت و همچنین ماکزیمم مقدار زیست توده‌ای که می‌توان از آن ناحیه برداشت نمود، در محدودیت (۱) آورده شده است.

$$hrvbms_{b,sz,t^s,t^t} \leq \mu_b \cdot \gamma l_{b,t^s,t^t} \cdot l_{sz,b,t^s}, \quad \forall sz, b \in B, t^t, t^s \quad (1)$$

مساحت قابل تخصیص به کاشت زیست توده در هر دوره زمانی استراتژیک با توجه به مساحت فعلی تخصیص یافته و مقدار قابل افزایش مساحت تعیین می‌شود که در محدودیت‌های (۲) و (۳) آورده شده است.

$$la_{sz,b}^{existing} - \Delta la_{sz,b,t^s} \cdot la_{sz,b}^{existing} \leq l_{sz,b,t^s} \leq la_{sz,b}^{existing} + \Delta la_{sz,b,t^s} \cdot la_{sz,b}^{existing},$$

$$\forall sz, b \in B^{existing}, t^s = 1, \quad (2)$$

$$l_{sz,b,t^s-1} - \Delta la_{sz,b,t^s} \cdot l_{sz,b,t^s-1} \leq l_{sz,b,t^s} \leq l_{sz,b,t^s-1} + \Delta la_{sz,b,t^s} \cdot l_{sz,b,t^s-1},$$

$$\forall sz, b \in B^{existing}, t^s \geq 2, \quad (3)$$

○ تعادل جریان^۱

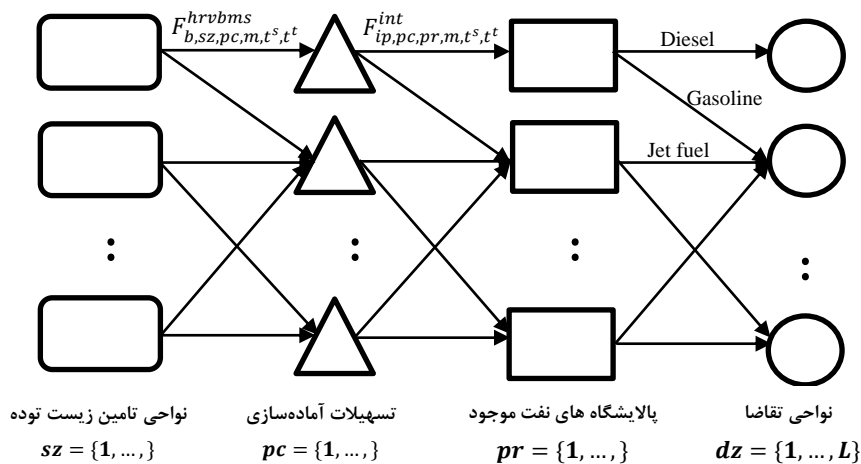
○ نواحی تامین^۲

محدودیت (۴) مربوط به نواحی تامین است که تعادل جریان زیست توده برداشت شده از هر ناحیه تامین در هر دوره تاکتیکی را با زیست توده ارسال شده از آن ناحیه به تسهیلات آماده‌سازی و با در نظر گرفتن ضایعات برداشت تضمین می‌کند.

1. Equilibrium of flows
2. Supply zones

$$hrvbms_{b,sz,ts,tt} \cdot (1 - hs_{b,sz,t^s,t^t}) = \sum_{pc} \sum_m F_{b,sz,pc,m,t^s,t^t}^{hrvbms} \quad (۴)$$

$$\forall sz, b \in B, t^t, t^s$$



شکل ۲. ساختار شبکه زنجیره‌تامین سوخت زیستی پیشنهادی

○ تسهیلات آماده‌سازی^۱

محدودیت‌های (۵) و (۶)، محدودیت‌های تعادل جریان زیست‌توده در تسهیلات آماده‌سازی هستند که تضمین می‌کنند، مقدار زیست‌توده دریافت شده از نواحی تامین به اضافه موجودی دوره زمانی تاکتیکی قبلی و با در نظر گرفتن نرخ زوال در هنگام انبارش مساوی است با زیست‌توده‌ای که تبدیل به محصولات میانی^۲ می‌شود به اضافه موجودی زیست‌توده دوره زمانی تاکتیکی حاضر.

1. Pre conversion facilities
2. Intermediate products

$$\sum_{sz} \sum_m F_{b,sz,pc,m,t^s,t^t}^{hrvbms} + (1 - dr_{b,t^s,t^t-1}^{bms}) I_{b,pc,t^s,t^t-1}^{bms,conv} = \sum_{qq} bms_{b,pc,qq,t^s,t^t}^{conv} + I_{b,pc,t^s,t^t}^{bms,conv},$$

$$\forall pc, b, t^s, t^t \setminus \{1\} \quad (5)$$

$$\sum_{sz} \sum_m F_{b,sz,pc,m,t^s,t^t}^{hrvbms} + (1 - dr_{b,t^s-1,t^t}^{bms}) I_{b,pc,t^s-1,t^t=n}^{bms,conv} = \sum_{qq} bms_{b,pc,qq,t^s,t^t}^{conv} + I_{b,pc,t^s,t^t}^{bms,conv},$$

$$\forall pc, b, t^s, t^t = \{1\} \quad (6)$$

محدودیت‌های (۷) و (۸) محدودیت‌های تعادل جریان محصولات میانی در تسهیلات آماده‌سازی هستند که تضمین می‌کنند مقدار محصول میانی تولید شده به اضافه موجودی دوره زمانی تاکتیکی قبل مساوی است با مقدار محصول میانی ارسال شده به پالایشگاه‌های نفت به اضافه موجودی دوره زمانی تاکتیکی حاضر.

$$\sum_{qq} Int_{ip,pc,qq,t^s,t^t}^{conv} + I_{ip,pc,t^s,t^t-1}^{int,conv} = \sum_{pr} \sum_m F_{ip,pc,pr,m,t^s,t^t}^{int} + I_{ip,pc,t^s,t^t}^{int,conv},$$

$$\forall pc, ip, t^s, t^t \setminus \{1\} \quad (7)$$

$$\sum_{qq} Int_{ip,pc,qq,t^s,t^t}^{conv} + I_{ip,pc,t^s-1,t^t=n}^{int,conv} = \sum_{pr} \sum_m F_{ip,pc,pr,m,t^s,t^t}^{int} + I_{ip,pc,t^s,t^t}^{int,conv},$$

$$\forall pc, ip, t^s, t^t = \{1\} \quad (8)$$

○ پالایشگاه‌های نفت^۱

محدودیت‌های (۹) و (۱۰) محدودیت‌های تعادل جریان در پالایشگاه‌های نفت هستند که تضمین می‌کنند در هر پالایشگاه مقدار محصول میانی دریافت شده از تسهیلات آماده‌سازی در هر نقطه ورودی^۲ به اضافه موجودی دوره تاکتیکی قبلی با محصول میانی مربوطه که تبدیل به محصولات نهایی می‌شود به اضافه موجودی دوره زمانی تاکتیکی حاضر مساوی است.

1. Petroleum refineries
2. Insertion point

$$\sum_{pc} \sum_m F_{ip,pc,pr,m,t^s,t^t}^{int} + I_{ip,pr,t^s,t^t-1}^{int,pr} = Int_{ip,pr,t^s,t^t}^{pr} + I_{ip,pr,t^s,t^t}^{int} \quad \forall ip, pr, t^s, t^t / \{1\} \quad (9)$$

$$\sum_{pc} \sum_m F_{ip,pc,pr,m,t^s,t^t}^{int} + I_{ip,pr,t^s-1,t^t=n^t}^{int,pr} = Int_{ip,pr,t^s,t^t}^{pr} + I_{ip,pr,t^s,t^t}^{int} \quad \forall ip, pr, t^s, t^t = \{1\} \quad (10)$$

محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) محدودیت‌های تعادل جریان در پالایشگاه‌های نفت هستند که تضمین می‌کنند در هر پالایشگاه نفت مقدار محصول نهایی تولید شده به اضافه موجودی دوره زمانی تاکتیکی قبلی با مقدار محصول نهایی ارسال شده به نواحی تقاضا به اضافه موجودی دوره زمانی تاکتیکی حاضر مساوی است.

$$\sum_{ip} F_{fp,ip,pr,t^s,t^t}^{pro} + I_{fp,pr,t^s,t^t-1}^{fpro} = \sum_{dz} \sum_m F_{fp,pr,dz,m,t^s,t^t}^{fpro} + I_{fp,pr,t^s,t^t}^{fpro} \quad \forall pr, fp, t^s, t^t / \{1\} \quad (11)$$

$$\sum_{ip} F_{fp,ip,pr,t^s,t^t}^{pro} + I_{fp,pr,t^s-1,t^t=n^t}^{fpro} = \sum_{dz} \sum_m F_{fp,pr,dz,m,t^s,t^t}^{fpro} + I_{fp,pr,t^s,t^t}^{fpro} \quad \forall pr, fp, t^s, t^t = \{1\} \quad (12)$$

○ محدودیت‌های تبدیل

بر اساس محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴)، در هر ییوپالایشگاه همه فیداستاک‌های زیست توده به سوخت زیستی و محصولات فرعی تبدیل می‌شوند.

$$Int_{ip,pc,qq,t^s,t^t}^{conv} = \sum_b \theta_{b,ip,qq}^{conv} \cdot bms_{b,pc,qq,t^s,t^t}^{conv} \quad \forall ip, pc, qq, t^s, t^t \quad (13)$$

$$Fpro_{fp,ip,pr,t^s,t^t} = \theta_{ip,fp}^{int,fpro} \cdot Int_{ip,pr,qq,t^s,t^t}^{pr} \quad \forall fp, ip, pr, t^s, t^t \quad (14)$$

○ ظرفیت تسهیلات آماده‌سازی

براساس محدودیت (۱۵)، ظرفیت هر تسهیل آماده‌سازی در هر دوره زمانی استراتژیک می‌بایست بین حدود پایین و بالا باشد.

$$low^{cap,pc} \cdot z_{pc,qq,t^s} \leq cap_{pc,qq,t^s}^{pconv} \leq up^{cap,pc} \cdot z_{pc,qq,t^s}, \quad \forall pc, qq, t^s, \quad (15)$$

محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند که در هر تسهیل آماده‌سازی کل مقدار زیست توده دریافت شده از نواحی تامین در هر دوره زمانی استراتژیک می‌بایست کمتر از ظرفیت آن تسهیل و بیشتر از مینیمم درصد کارایی ظرفیت باشد.

$$\omega^{pc} \cdot cap_{pc,qq,t^s}^{pconv} \leq \sum_b \sum_{t^t} bms_{b,pc,qq,t^s,t^t}^{conv} \leq cap_{pc,qq,t^s}^{pconv}, \quad \forall pc, qq, t^s, \quad (16)$$

محدودیت (۱۷) بیان می‌کند که ظرفیت هر تسهیل آماده‌سازی در هر دوره زمانی استراتژیک مساوی است با ظرفیت دوره قبلی به اضافه ظرفیت افزایش یافته در دوره زمانی استراتژیک حاضر.

$$cap_{pc,qq,t^s}^{pconv} = cap_{pc,qq,t^s-1}^{pconv} + cap_{pc,qq,t^s}^{exp,pconv}, \quad \forall pc, qq, t^s \setminus \{1\}, \quad (17)$$

○ ظرفیت واحدهای ارتقادهی^۱ در پالایشگاه‌های نفت

براساس محدودیت (۱۸)، ظرفیت تجهیز^۲ اختصاص یافته به هر نقطه ورودی در هر پالایشگاه نفت می‌بایست بین حدود پایین و بالا باشد.

$$low_{ip}^{cap,pr} \cdot \delta_{ip,pr,t^s} \leq cap_{pr,ip,t^s}^{retrofit} \leq up_{ip}^{cap,pr} \cdot \delta_{ip,pr,t^s}, \quad \forall pr, ip, t^s \quad (18)$$

محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند که ظرفیت هر واحد ارتقادهی در هر دوره زمانی استراتژیک مساوی است با ظرفیت دوره قبلی به اضافه ظرفیت افزایش یافته در دوره زمانی استراتژیک حاضر.

$$cap_{pr,ip,t^s}^{retrofit} = cap_{pr,ip,t^s-1}^{retrofit} + cap_{pr,ip,t^s}^{exp,retrofit}, \quad \forall pr, ip, t^s \setminus \{1\} \quad (19)$$

-
1. Upgrading units
 2. Retrofit capacity

○ ظرفیت عملیاتی واحدهای ارتقادهای در پالایشگاه‌های نفت

بر اساس محدودیت (۲۰) مقدار محصول نهایی تولید شده در یک دوره زمانی استراتژیک در هر پالایشگاه نفت بایستی کمتر از ظرفیت تجهیز و بزرگتر از مینیمم درصد کارایی ظرفیت تجهیز است.

$$\omega_{ip}^{min,retrofit} \cdot cap_{pr,ip,t^s}^{retrofit} \leq \sum_t \sum_{fp} \varphi_{fp} \cdot F_{pro_{fp,ip,pr,t^s,t}} \leq cap_{pr,ip,t^s}^{retrofit}, \quad \forall pr, ip, t^s \quad (20)$$

○ انتخاب تکنولوژی تبدیل

محدودیت (۲۱) و (۲۲) تضمین می‌کنند که صورتی که یک تسهیل فعال شود یک تکنولوژی برای آن انتخاب می‌شود.

$$\sum_{qq} z_{pc,qq,t^s} \leq 1, \quad \forall pc, t^s \quad (21)$$

$$\sum_{ip} \delta_{ip,pr,t^s} \leq 1, \quad \forall pr, t^s \quad (22)$$

○ برآورده نمودن تقاضا

محدودیت (۲۳) مربوط به نواحی تقاضا است که بیان می‌کند در برآورده نمودن تقاضای هر ناحیه توسط محصولات نهایی ارسال شده از پالایشگاه‌های نفت کمبود مجاز است.

$$\sum_{pr} \sum_m F_{fp,pr,dz,m,t^s,t^t}^{fpro} + fp_{dz,fp,t^s,t^t}^{shortage} \geq bl_{t^s,t^t}^{fp} * d_{fp,dz,t^s,t^t}, \quad \forall dz, fp, t^s, t^t \quad (23)$$

○ محدودیت‌های منطقی

بر اساس محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) مراکز آماده‌سازی و واحدهای ارتقادهای فعال شوند، تا آخر فعال می‌مانند.

$$z_{pc,qq,t^s-1} \leq z_{pc,qq,t^s}, \quad \forall pc, qq, t^s \quad (24)$$

$$\delta_{ip,pr,t^s-1} \leq \delta_{ip,pr,t^s}, \quad \forall ip, pr, t^s \quad (25)$$

○ نسبت‌های مالی

محدودیت (۲۶) معادله پایه ترازنامه است که تساوی مجموع دارایی‌های ثابت و جاری را با مجموع حقوق صاحبان سهام، بدهی‌های بلندمدت و بدهی‌های کوتاه‌مدت بیان می‌کند.

$$FA_{t^s} + CA_{t^s} = E_{t^s} + STL_{t^s} + LTL_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (26)$$

بر اساس محدودیت (۲۷) دارایی‌های ثابت در هر دوره زمانی استراتژیک از طریق کسر استهلاک از مجموع دارایی‌های ثابت قدیم و سرمایه‌گذاری بر دارایی‌های ثابت محاسبه می‌گردد.

$$FA_{t^s} = FA_{t^s-1} + FAI_{t^s} - DPR_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (27)$$

محدودیت (۲۸) دارایی‌های جاری را در هر دوره زمانی استراتژیک تعریف می‌نماید که برابر است با مجموع پول نقد، حساب‌های دریافتی، ارزش موجودی و دارایی‌های جاری دوره قبل.

$$CA_{t^s} = CASH_{t^s} + RA_{t^s} + INR_{t^s} + CA_{t^s-1}, \quad \forall t^s \quad (28)$$

محدودیت (۲۹) حقوق صاحبان سهام در هر دوره زمانی استراتژیک را بر اساس حقوق صاحبان سهام دوره قبل، درآمد خالص پس از کسر مالیات، استهلاک، انتشار سهام و ارزش موجودی محاسبه می‌کند.

$$E_{t^s} = E_{t^s-1} + NOPAT_{t^s} - DPR_{t^s} + NIS_{t^s} + INR_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (29)$$

محدودیت (۳۰) درآمد ناخالص پیش از کسر بهره و مالیات را تبیین می‌کند که از طریق کسر مجموع هزینه‌ها از مجموع فروش به دست می‌آید.

$$EBIT_{t^s} = NTS_{t^s} - TC_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (30)$$

محدودیت (۳۱) درآمد مشمول مالیات را با کسر بهره پرداختی از درآمد پیش از کسر بهره و مالیات محاسبه می‌کند.

$$TI_{t^s} = EBIT_{t^s} - ITP_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (31)$$

درآمد خالص پس از کسر بهره و مالیات از ضرب درآمد مشمول مالیات و جمله $(1 - TR_{t^s})$ به دست می‌آید که TR_{t^s} نرخ مالیات است.

$$NOPAT_{t^s} = (1 - TR_{t^s}).TI_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (32)$$

بر اساس محدودیت (۳۳) بهره پرداختی در هر دوره برابر است با مجموع بهره‌های بلندمدت و کوتاه مدت.

$$ITP_{t^s} = LTR_{t^s} \cdot LTL_{t^s} + STR_{t^s} \cdot STL_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (33)$$

استهلاک از طریق ضرب نرخ استهلاک در دارایی ثابت به دست می‌آید که در محدودیت (۳۴) بیان شده است.

$$DPR_{t^s} = DR_{t^s} \cdot FA_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (34)$$

محدودیت (۳۵) هزینه کل ناشی از عملیات زنجیره تامین را به منظور تدارک فیداستاک‌ها، تبدیل فیداستاک‌ها به محصولات میانی / پایانی و تحویل آنها به مشتریان را محاسبه می‌کند. این هزینه‌ها شامل هزینه عملیات تسهیلات تبدیل و پالایشگاه‌های نفت (VC_{t^s})، هزینه‌های برداشت و خرید زیست توده (HPC_{t^s})، هزینه‌های حمل و نقل ($TC1_{t^s}$ و $TC2_{t^s}$)، هزینه‌های نگهداری موجودی (IHC_{t^s})، و هزینه‌های کمبود محصولات نهایی (IPC_{t^s}). محدودیت‌های (۳۶) تا (۴۱) این هزینه‌ها را محاسبه می‌کنند.

$$TC_{t^s} = VC_{t^s} + HPC_{t^s} + TC1_{t^s} + TC2_{t^s} + IHC_{t^s} + IPC_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (35)$$

$$VC_{t^s} = \sum_{qq} \sum_b \sum_{sz} \sum_{pc} \sum_m \sum_{t^t} VC_{qq}^{pconv} \cdot F_{b,sz,pc,m,t^s,t^t}^{hrvbms} + \sum_{ip} \sum_{fp} \sum_{pr} \sum_{t^t} VPC_{ip} \cdot \phi_{fp} \cdot F_{pro_{fp,ip,pr,t^s,t^t}}, \quad \forall t^s \quad (36)$$

$$HPC1_{t^s} = \sum_{sz} \sum_{b \in B} \sum_{t^t} \sum_{pc} \sum_m HVC_b \cdot F_{b,sz,pc,m,t^s,t^t}^{hrvbms}, \quad \forall t^s \quad (37)$$

$$TC1_{t^s} = \sum_{b \in B} \sum_{sz} \sum_{pc} \sum_m \sum_{t^t} F_{b,sz,pc,m,t^s,t^t}^{hrvbms} \cdot \left(\frac{DC_{sz,pc,m}^{sup,conv} \cdot TC_{b,sz,l,m}^{sup,conv} + TRLC_{b,sz,pc,m}^{sup,conv}}{TRCA_m} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - ms_b} \right) \quad \forall t^s \quad (38)$$

$$\begin{aligned}
 TC2_{t^s} = & \\
 & + \sum_{ip} \sum_{pc} \sum_{pr} \sum_m \sum_{t^t} F_{ip,pc,pr,m,t^s,t^t}^{int} \cdot \left(\frac{DC_{pc,pr,m}^{conv,pr} \cdot TC_{ip,pc,pr,m}^{conv,pr} + TRLC_{pc,pr,m}^{conv,pr}}{TRCA_m} \right) \\
 & + \sum_{fp} \sum_{pr} \sum_{dz} \sum_m \sum_{t^t} F_{fp,pr,dz,m,t^s,t^t}^{fpro} \cdot \left(\frac{DC_{pr,dz,m}^{pr,dem} \cdot TC_{fp,pr,dz,m}^{pr,dem} + TRLC_{fp,pr,dz,m}^{pr,dem}}{TRCA_m} \right), \forall t^s \quad (39)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 IHC_{t^s} = & \sum_b \sum_{pc} \sum_{t^t} HC_b^{bms,conv} \cdot I_{b,pc,t^s,t^t}^{bms,conv} + \sum_{ip} \sum_{pc} \sum_{t^t} HC_{ip}^{int,conv} \cdot I_{ip,pc,t^s,t^t}^{int,conv} \\
 & + \sum_{ip} \sum_{pr} \sum_{t^t} HC_{ip}^{int,pr} \cdot I_{ip,pr,t^s,t^t}^{int} + \sum_{fp} \sum_{pr} \sum_{t^s} \sum_{t^t} HC_{fp}^{fpro,pr} \cdot I_{fp,pr,t^s,t^t}^{fpro}, \\
 & \forall t^s \quad (40)
 \end{aligned}$$

$$IPC_{t^s} = \sum_{dz} \sum_{fp} \sum_{t^t} penalty_{t^s,t^t}^{fp,shortage} \cdot fp_{dz,fp,t^s,t^t}^{shortage}, \quad \forall t^s \quad (41)$$

محدودیت (۴۲) درآمد خالص فروش ناشی از فروش محصولات نهایی را محاسبه می‌کند.

$$NTS_{t^s} = \sum_{fp} \sum_{pr} \sum_{dz} \sum_m \sum_{t^t} F_{fp,pr,dz,m,t^s,t^t}^{fpro} \cdot pr_{fp,t^s,t^t}^{fpro} \quad (42)$$

بر اساس محدودیت (۴۳) کل دارایی‌ها برابر است با مجموع حقوق صاحبان سهام، وام کوتاه مدت و وام بلندمدت.

$$TIC_{t^s} = E_{t^s} + STL_{t^s} + LTL_{t^s}, \quad \forall t^s \quad (43)$$

ارزش موجودی‌ها در مراکز جمع‌آوری، بیوپالایشگاه‌ها، تسهیلات آماده‌سازی، و پالایشگاه‌های نفت بر اساس هزینه تولید و نه قیمت بازار محاسبه می‌شود (لانگینیدیس و جورجیادیس^۱، ۲۰۱۱) که مبتنی بر قانون هزینه تاریخی^۲ از استاندارد قوانین پذیرفته شده عمومی حسابداری (GAAP)^۳

1. Longinidis and Georgiadis
2. Historical cost principle
3. Generally accepted accounting principles

است. قابل ذکر است که برای تسهیلات با هزینه‌های تولید / عملیات متفاوت برای تکنولوژی‌های مختلف، میانگین هزینه برای محاسبه ارزش موجودی استفاده شده است.

$$\begin{aligned}
 INR_{t^s} = & + \sum_{t^t} \sum_{ip} \sum_{pc} \sum_{qq} \frac{VC_{qq}^{pconv}}{2} \cdot I_{ip,pc,t^s,t^t}^{int,conv} \\
 & + \sum_{pr} \sum_{t^t} \sum_{fp} \sum_{ip} \frac{VPC_{ip}^{retrofit}}{2} \cdot \varphi_{fp} \cdot I_{fp,pr,t^s,t^t}^{fpro}, \quad \forall t^s \quad (44)
 \end{aligned}$$

بر اساس محدودیت (۴۵) سرمایه‌گذاری دارایی‌های ثابت برابر است با هزینه‌های ثابت و متغیر سالیانه باز کردن بیوپالایشگاه‌ها، مراکز جمع‌آوری، تسهیلات آماده‌سازی و تجهیز پالایشگاه‌های نفت که IR نرخ بازگشت سرمایه و NY دوره زمانی پروژه بر اساس سال است.

$$\begin{aligned}
 FAI_{t^s} = & \frac{IR \cdot (1 + IR)^{NY}}{(1 + IR)^{NY} - 1} \cdot \left(+ \sum_{pc} \sum_{qq} FXC_{pc,qq}^{pccons} \cdot Z_{pc,qq,t^s} \right. \\
 & \left. + \sum_{ip} \sum_{pr} FXC_{ip,pr}^{retrofit} \cdot \delta_{ip,pr,t^s} \right), \quad \forall t^s \quad (45)
 \end{aligned}$$

○ تابع هدف مدلی ریاضی: ماکزیمم‌سازی بازگشت سرمایه (ROA)^۱

تابع هدف ماکزیمم‌سازی بازگشت سرمایه زنجیره تامین سوخت زیستی در طول افق برنامه‌ریزی آن است که در محدودیت (۴۶) آمده است:

$$\max ROA = \frac{Net\ income}{total\ assets} = \frac{\sum_{t^s} NOPAT_{t^s}}{\sum_{t^s} (FA_{t^s} + CA_{t^s})} \quad (46)$$

1. Return on assets

○ تعریف متغیرها

تعریف متغیرهای باینری و پیوسته در محدودیت‌های (۴۷) و (۴۸) آورده شده است:

$$z_{pc,qq,t^s}, \delta_{ip,pr,t^s} \in \{0,1\}, \quad (۴۷)$$

$$l_{sz,b,t^s}, F_{b,sz,pc,m,t^s,t^t}^{hrvbm}, F_{ip,pc,pr,m,t^s,t^t}^{int}, F_{fp,pr,dz,m,t^s,t^t}^{fpro}, bms_{b,pc,qq,t^s,t^t}^{conv}, Int_{ip,pc,qq,t^s,t^t}^{conv}, Int_{ip,pr,t^s,t^t}^{pr}, F_{fp,pr,t^s,t^t}^{pro}, I_{b,pc,t^s,t^t}^{bms,conv}, I_{ip,pc,t^s,t^t}^{int,conv}, I_{fp,pr,t^s,t^t}^{fpro}, cap_{pc,t^s}^{pconv}, cap_{pr,ip}^{retrofit}, fp_{t^s,t^t}^{shortage}, NTS_{t^s}, TC_{t^s}, FA_{t^s}, CA_{t^s}, E_{t^s}, FAI_{t^s}, DPR_{t^s,t^t}, EBIT_{t^s}, ITP_{t^s}, LTL_{t^s}, STL$$

$$, TI_{t^s}, NOPAT_{t^s,t^t}, CASH_{t^s}, RA_{t^s}, INR_{t^s}, NIS_{t^s}, TIC_{t^s} \geq 0 \quad (۴۸)$$

جدول ۲. میزان زمین تخصیص داده شده از هر ناحیه تامین برای کاشت فیداستاک‌های زیست توده (هکتار)

| SZ | ناحیه تامین | زمین تخصیص داده شده از ناحیه تامین SZ در وضعیت فعلی برای کاشت زیست توده نوع b (هکتار) ($la_{sz,b}^{existing}$) | | | |
|----|----------------|--|----------|--------|----------|
| | | استور ذرت | کاه گندم | کاه جو | کاه برنج |
| ۱ | آذربایجان شرقی | ۴۹۵ | ۳۸۵۷۸۵ | ۸۲۷۳۸ | ۲۱۸۷ |
| ۲ | فارس | ۲۷۵۸۶ | ۴۰۸۰۴۹ | ۱۱۳۱۱۲ | ۳۴۶۴۲ |
| ۳ | بندرعباس | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۴ | اصفهان | ۱۲۰۹ | ۸۱۸۰ | ۵۵۸۷۲ | ۴۹۳۳ |
| ۵ | کرمانشاه | ۳۳۹۰۷ | ۴۳۱۸۴۵ | ۱۶۴۰۰۰ | ۲۵۸ |
| ۶ | خوزستان | ۷۸۳۱۷ | ۵۱۱۹۶۵ | ۱۱۶۳۰۹ | ۷۳۱۰۴ |
| ۷ | استان مرکزی | ۵۴ | ۲۱۰۰۰۲ | ۵۱۳۴۸ | ۰ |
| ۸ | تهران | ۰ | ۴۱۰۰۱ | ۳۶۵۶۰ | ۰ |
| ۹ | هرمزگان | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱۰ | البرز | ۰ | ۹۳۶۶ | ۸۸۱۸ | ۰ |
| ۱۱ | اردبیل | ۱۲۷۰۱ | ۳۳۴۸۸۸ | ۱۲۳۲۳۱ | ۵۱۷ |
| ۱۲ | آذربایجان غربی | ۵۶۰۶ | ۳۵۰۸۴۹ | ۴۹۹۴۹ | ۳۰ |

| SZ | ناحیه تامین | زمین تخصیص داده شده از ناحیه تامین SZ در وضعیت فعلی برای کاشت زیست توده نوع b (هکتار) ($la_{sz,b}^{existing}$) | | | |
|----|---------------------|---|----------|--------|----------|
| | | استوور ذرت | کاه گندم | کاه جو | کاه برنج |
| ۱۳ | بوشهر | ۲۴۰ | ۱۲۱۲۹۴ | ۱۸۹۶۴ | ۰ |
| ۱۴ | چهارمحال و بختیاری | ۰ | ۶۹۸۹۹ | ۲۳۵۰۰ | ۳۶۱۸ |
| ۱۵ | گیلان | ۳۲ | ۸۱۸۰ | ۶۷۹۷ | ۱۵۱۹۴۹ |
| ۱۶ | گلستان | ۹۶۴ | ۳۷۰۲۸۳ | ۶۶۰۴۳ | ۴۷۱۷۹ |
| ۱۷ | همدان | ۵۸۱۳ | ۴۱۴۲۳۸ | ۱۱۰۱۴۴ | ۰ |
| ۱۸ | ایلام | ۱۱۱۶۵ | ۱۴۰۴۴۴ | ۴۴۷۳۰ | ۲۹۸۵ |
| ۱۹ | کرمان | ۲۹۰۶۲ | ۸۵۸۷۴ | ۲۵۴۷۶ | ۰ |
| ۲۰ | خراسان شمالی | ۰ | ۱۶۳۵۲۵ | ۵۷۴۴۱ | ۱۴۵۲ |
| ۲۱ | خراسان رضوی | ۰ | ۲۶۷۸۵۸ | ۱۷۵۰۰۱ | ۱۹۶۴ |
| ۲۲ | خراسان جنوبی | ۰ | ۲۳۰۶۰ | ۱۸۹۸۳ | ۱۲ |
| ۲۳ | کهگیلویه و بویراحمد | ۱۸۵۷ | ۱۰۶۴۷۰ | ۳۲۰۰۰ | ۵۴۵۹ |
| ۲۴ | کردستان | ۳۰۳۴ | ۵۷۳۶۵۵ | ۲۹۴۱۰ | ۰ |
| ۲۵ | لرستان | ۲۱۵۵ | ۲۴۷۶۹۷ | ۱۲۱۳۴۲ | ۳۶۶۶ |
| ۲۶ | مازندران | ۷۵ | ۵۵۹۹۳ | ۲۳۷۴۷ | ۱۹۹۳۶۶ |
| ۲۷ | قزوین | ۴۳۷۹ | ۱۵۳۶۸۹ | ۴۲۱۰۵ | ۲۳۲۳ |
| ۲۸ | قم | ۰ | ۱۱۴۳۰ | ۲۳۰۷۰ | ۰ |
| ۲۹ | سمنان | ۰ | ۳۷۳۱۹ | ۲۰۷۴۰ | ۰ |
| ۳۰ | سیستان و بلوچستان | ۵۷۱۰ | ۸۵۳۱۸ | ۱۶۳۹۴ | ۲۷۵۸ |
| ۳۱ | یزد | ۳۲۰۰ | ۱۹۶۳۶ | ۳۷۳۱ | ۰ |
| ۳۲ | زنجان | ۰ | ۳۲۱۴۶۱ | ۳۰۵۲۰ | ۶۸۹ |

ماخذ: آمارنامه کشاورزی^۱، سال ۲۰۱۳

۴. مطالعه موردی

۴-۱. برنامه‌ریزی چندهدفه: روش اپسیلون محدودیت بهبودیافته^۱ (AEC)

با توجه به اینکه تابع هدف مدل توسعه داده شده کسری خطی می‌باشد و به دلیل یکسان نبودن متغیرهای تصمیم صورت و مخرج کسر شرایط لازم برای استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی کسری خطی را ندارد، برای حل آن از روش اپسیلون محدودیت بهبودیافته با توابع هدف ماکزیم‌سازی درآمد خالص پس از کسر بهره و مالیات، و مینیم‌سازی مجموع دارایی‌های ثابت و جاری استفاده می‌کنیم. براین اساس در این بخش ابتدا روش AEC را تشریح کرده و نحوه پیاده‌سازی آن برای مدل پیشنهادی و حل مطالعه موردی را توضیح می‌دهیم.

فرم کلی یک مسئله برنامه‌ریزی چندهدفه^۲ (MOPM) به صورت زیر مفروض است:

$$\begin{aligned} \min \{ & f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x) \} \\ \text{s. t. } & x \in S, \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن x بردار متغیرهای تصمیم، $f_i(x)$ ، آمین تابع هدف، p تعداد توابع هدف و S ناحیه شدنی مساله است. در روش اپسیلون-محدودیت (EC)، یکی از توابع هدف به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده و سایر توابع هدف به صورت محدودیت با حد بالای اپسیلون به مساله اضافه می‌شوند. بنابراین، مدل تک هدفه ($p=2$) زیر براساس روش EC حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & f_1(x) \\ \text{s. t. } \quad & f_2(x) \leq \varepsilon_2, \\ & f_3(x) \leq \varepsilon_3, \\ & \dots \\ & f_p(x) \leq \varepsilon_p, \\ & x \in S. \end{aligned} \quad (2)$$

1. Augmented Epsilon Constraint
2. Multi Objective Mathematical Programming

که در آن ε_i ، سطح برقراری تابع هدف i است و جواب‌های مختلف را می‌توان با تغییر مقادیر $\varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_p$ به دست آورد که ممکن است کارا^۱ نباشند (کارای ضعیف^۲ هستند). برای اصلاح/تکمیل مدل (p2)، جهت رفع مشکل مذکور روش اسپیلون محدودیت بهبودیافته (AEC) توسط ماوروتاش^۳ در سال ۲۰۰۹ ارائه شده است که به صورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } f_1(x) - \sum_{i=2}^n \phi_i s_i \\ f_i(x) + s_i = e_i, \quad i = 2, 3, \dots, n \\ x \in X \\ s_i \geq 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

که در آن s_i ها متغیرهای نامنفی برای کمبود ϕ_i یک پارامتر برای نرمال‌سازی مقدار تابع هدف اول نسبت به هدف i است ($\phi_i = \frac{R(f_1)}{R(f_i)}$). برای اجرای بهتر روش AEC، می‌توان بازه مناسب اسپیلون‌ها (e_i) را ابتدا از روش لکسیکوگرافیک^۴ بدست آورد و سپس اهداف و قیود مدل AEC را پیاده‌سازی کرد (آقایی و همکاران^۵، ۲۰۱۱). در این روش، ابتدا بازه $e_i \in [\text{Min}(f_i), \text{Max}(f_i)]$ ، تعیین شده و هربار پس از مقدار دهی به e_i ها در بازه مربوطه، مدل (p3) حل می‌شود که جواب آن یک جواب کارا است و مقدار اهداف به ازای این جواب در جبهه پارتو قرار می‌گیرند. برای یافتن بازه مناسب برای e_i مربوط به هدف i م ($i = 2, \dots, n$) در مدل (p3)، ابتدا برای هر یک از اهداف $i = 1, 2, \dots, n$ مسائل بهینه‌سازی زیر حل می‌شود:

$$\text{PayOff}_{jj} = \text{Min } f_j(x) \\ x \in X$$

1. Efficient
2. Weakly Efficient
3. Mavrotas
4. Lexicographic
5. Aghaei et al.

که $x^{i,*}$ به عنوان جواب بهینه و $PayOff_{jj} = f_j(x^{i,*})$ به عنوان مقدار بهینه هدف j م ذخیره می‌شود. حال مقدار بهینه هدف i م را، در حالیکه هر مرتبه یکی از اهداف $j = 1, 2, \dots, n; j \neq i$ در حالت بهینه قرار دارد، به صورت زیر بدست می‌آوریم:

$$PayOff_{ij} = \text{Min } f_i(x)$$

$$f_j(x) = PayOff_{jj}$$

$$x \in X$$

$$j \neq i$$

که جواب بهینه $x^{i,j,*}$ با مقدار بهینه $PayOff_{jj} = f_j(x^{i,j,*})$ برای هدف i م محاسبه می‌شود. به

این ترتیب، با استفاده از روش لکسیکوگرافیک، ماتریس payoff زیر حاصل می‌شود:

$$PayOff = [payOff_{ij}]$$

بعد از تعیین ماتریس $PayOff$ ، برای توابع هدف $i = 1, \dots, n$ ماکزیمم، مینیمم و بازه تغییرات

توابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود. قابل ذکر است که مقدار $R(f_i)$ نیز برای نرمال‌سازی

اهداف در تابع هدف مدل (p3) استفاده می‌شود. (ماورئاش^۱، ۲۰۰۹؛ آقایی و همکاران^۲، ۲۰۱۱)

$$\text{Min}(f_i) = \text{Min}_j\{payOff_{ij}\} = payOff_{ii} = f_i(x^{i,*})$$

$$\text{Max}(f_i) = \text{Max}_j\{payOff_{ij}\}$$

$$R(f_i) = \text{Max}(f_i) - \text{Min}(f_i)$$

در این قسمت برای حل مدل، تابع هدف درآمد خالص پس از کسر بهره و مالیات به عنوان تابع

هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و تابع هدف دوم (مجموع دارایی‌های ثابت و جاری) به

اپسیلون محدود می‌شود. قابل ذکر است که هدف اول که ماکزیمم‌سازی است، به صورت قرینه

و مینیمم‌سازی در نظر گرفته می‌شوند:

-
1. Mavrotas
 2. Aghaei et al.

$$\min f_1 = -Net\ income = - \sum_{t^s} NOPAT_{t^s}$$

$$\min f_2 = total\ assets = \sum_{t^s} (FA_{t^s} + CA_{t^s})$$

جدول ۳. حد بالا و پایین ظرفیت تجهیز پالایشگاه نفت در یک دوره زمانی استراتژیک (گیگاژول/سال)

| | |
|---------------------|----------|
| $low_{ip}^{cap,pr}$ | ۴۸۱۱۰۴۰۰ |
| $up_{ip}^{cap,pr}$ | ۲۴۰۵۵۰۰ |

ماخذ: تُنگک و همکاران^۱، ۲۰۱۴

جدول ۴. هزینه ثابت بازکردن و هزینه متغیر تولید تجهیز پالایشگاه نفت

| پارامتر | ip=1 | ip=2 |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $FXC_{ip,pr}^{retrofit}$ | ۵۰۰۰۰۰ دلار | ۵۰۰۰۰۰ دلار |
| $VPC_{ip}^{retrofit}$ | ۱۰/۲۵۲ دلار گیگاژول در سال | ۱۰/۲۵۲ دلار گیگاژول در سال |

ماخذ: تُنگک و همکاران^۲، ۲۰۱۴

جدول ۵. نرخ تبدیل حجم یک واحد محصول نهایی به معادل انرژی (گیگاژول/گالن)

| پارامتر | محصول نهایی زنجیره تامین دوم (fp) | | |
|----------------|-----------------------------------|--------|---------|
| | بنزین | دیزل | سوخت جت |
| φ_{fp} | ۰/۱۲۰۲ | ۰/۱۳۶۶ | ۰/۱۳۳۶ |

ماخذ: تُنگک و همکاران^۳، ۲۰۱۴

1. Tong et al.
2. Tong et al.
3. Tong et al.

۴-۲. پیاده‌سازی مطالعه موردی

در این پژوهش، به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل توسعه داده شده، این مدل را برای طراحی یک مطالعه موردی در ایران به کار می‌بریم و نتایج محاسباتی را مورد تحلیل قرار می‌دهیم. مفروضات اصلی مطالعه موردی به شرح زیر است:

- منابع تامین شامل پسماندهای کشاورزی کاه گندم، کاه برنج، استوور ذرت و کاه جو به عنوان فیداستاک زیست توده برای زنجیره تامین در نظر گرفته شده‌اند که به طور گسترده-ای در ایران موجود هستند.
- همه ۳۱ استان ایران به عنوان نواحی بالقوه تامین زیست توده سلولزی در نظر گرفته شده است.
- میزان تقاضای پنج استان تهران، اصفهان، خراسان رضوی، فارس و مازندران به عنوان نواحی تقاضا در نظر گرفته شده‌اند. همچنین به عنوان مکان‌های بالقوه برای احداث تسهیلات در نظر گرفته شده‌اند.
- پالایشگاه‌های نفت تهران، اصفهان و شیراز به عنوان پالایشگاه‌های موجود در نظر گرفته شده‌اند. میزان تقاضای بنزین و دیزل در زنجیره تامین متناسب با جمعیت و براساس سرانه مصرف گزارش شده در آمارنامه مصرف فرآورده‌های نفتی انرژی‌زا^۱ در سال ۲۰۱۴ محاسبه شده و همچنین یک درصد افزایش برای هر سال در نظر گرفته شده است. همچنین میزان برآورده شدن تقاضای بنزین و دیزل از زیست توده ۱۰ درصد و برای سوخت جت این مقدار ۱.۵ درصد در نظر گرفته شده است (تنگ و همکاران^۲، ۲۰۱۴).
- دو تکنولوژی (پیرولیز راکتور چرخشی^۳ و پیرولیز سیار راکتور تخت^۱) برای تسهیلات آماده‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. (تنگ و همکاران^۲، ۲۰۱۴).

1. Iran Statistical Yearbook of oil products consumption

2. Tong et al.

3. Rotating cone reactor pyrolysis

- محصولات میانی / نقاط ورودی^۳ زنجیره‌تامین شامل روغن زیستی^۴ و slurry زیستی و محصولات نهایی شامل بنزین، دیزل و سوخت جت هستند. همچنین برای قیمت فروش محصولات نهایی ۵ درصد افزایش در هر سال در نظر گرفته شده است.
- ضرایب تبدیل حجم به انرژی معادل آن برای بنزین، دیزل و سوخت جت به ترتیب ۳۱/۷۷، ۳۶/۱۰ و ۳۵/۳۰ گیگاژول بر مترمکعب است (تنگ و همکاران^۵، ۲۰۱۴).
- افق زمانی (تعداد دوره‌های زمانی استراتژیک) ۱۵ سال در نظر گرفته شده است و هر دوره زمانی استراتژیک به دو دوره زمانی تاکتیکی ۶ ماهه (۳۰ دوره زمانی تاکتیکی) تقسیم شده است.
- نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS 24 با سالور CPLEX برای حل مدل استفاده شده است که پردازنده Intel core i5 2.67 GHz با رم چهار گیگ برای اجرا مورد کاربرد قرار گرفته است. قابل ذکر است مقادیر سایر داده‌های مربوط به مطالعه موردی در جدول‌های (۲) تا (۷) آورده شده است.

جدول ۶. بازدهی زیست توده در هر دوره زمانی تاکتیکی (تن/هکتار)

| b | زیست توده | $t^t = 1$ | $t^t = 2$ |
|---|------------|-----------|-----------|
| ۱ | استوور ذرت | ۰ | ۴/۴ |
| ۲ | کاه گندم | ۳/۵ | ۰ |
| ۳ | کاه جو | ۲/۷۶ | ۰ |
| ۴ | کاه برنج | ۰ | ۴/۹ |

ماخذ: کیم و دیل^۶، ۲۰۰۴؛ چوچک و همکاران^۷، ۲۰۱۴

1. Fluidized bed reactor pyrolysis
2. Tong et al.
3. Insertion points
4. Bio oil
5. Tong et al.
6. Kim and Dale
7. cucek et al.

جدول ۷. تقاضای محصول نهایی در دوره زمانی استراتژیک اول و دوره‌های زمانی تاکتیکی (گالن)

| محصول نهایی | ناحیه تقاضا | t^s | $t^t=1$ | $t^t=2$ |
|-------------|-------------|-------|--------------|--------------|
| بنزین | تهران | ۱ | ۶۶۷۸۲۶۹۴۷.۴۶ | ۶۶۷۸۲۶۹۴۷.۴۶ |
| بنزین | اصفهان | ۱ | ۲۴۴۶۲۳۳۲۰.۱۵ | ۲۴۴۶۲۳۳۲۰.۱۵ |
| بنزین | خراسان رضوی | ۱ | ۲۳۲۴۷۱۴۰۵.۷۶ | ۲۳۲۴۷۱۴۰۵.۷۶ |
| بنزین | فارس | ۱ | ۲۱۷۹۴۱۹۴۲.۹۰ | ۲۱۷۹۴۱۹۴۲.۹۰ |
| بنزین | مازندران | ۱ | ۱۷۷۲۵۹۴۴۶.۸۹ | ۱۷۷۲۵۹۴۴۶.۸۹ |
| دیزل | تهران | ۱ | ۳۳۶۱۸۴۰۹۸.۴۳ | ۳۳۶۱۸۴۰۹۸.۴۳ |
| دیزل | اصفهان | ۱ | ۳۳۶۳۴۰۷۵۲.۴۲ | ۳۳۶۳۴۰۷۵۲.۴۲ |
| دیزل | خراسان رضوی | ۱ | ۲۲۷۸۳۲۱۰۳.۴۲ | ۲۲۷۸۳۲۱۰۳.۴۲ |
| دیزل | فارس | ۱ | ۲۵۳۱۸۸۶۵۲.۸۴ | ۲۵۳۱۸۸۶۵۲.۸۴ |
| دیزل | مازندران | ۱ | ۳۹۷۸۰۵۰۰ | ۳۹۷۸۰۵۰۰ |
| سوخت جت | تهران | ۱ | ۳۳۱۴۹۲۷۵۳.۸۱ | ۳۳۱۴۹۲۷۵۳.۸۱ |
| سوخت جت | اصفهان | ۱ | ۴۷۵۵۵۸۳۷.۶۱ | ۴۷۵۵۵۸۳۷.۶۱ |
| سوخت جت | خراسان رضوی | ۱ | ۴۷۶۰۶۱۲۹.۳۱ | ۴۷۶۰۶۱۲۹.۳۱ |
| سوخت جت | فارس | ۱ | ۷۰۲۵۷۵۱۳.۸۹ | ۷۰۲۵۷۵۱۳.۸۹ |
| سوخت جت | مازندران | ۱ | ۷۱۴۶۴۵۱.۴۸ | ۷۱۴۶۴۵۱.۴۸ |

ماخذ: آمارنامه مصرف فرآورده‌های نفتی انرژی‌زا^۱، ۲۰۱۴

در جدول (۸) و (۹) نتایج محاسباتی حل مدل پیشنهادی برای مطالعه موردی گزارش شده است. جدول (۸) مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد. در جدول (۹) نیز مقادیر متغیرهای استراتژیک به تفکیک دوره‌های زمانی استراتژیک مربوط به جواب در افق زمانی ۱۵ سال شامل مکان، ظرفیت، تکنولوژی تسهیلات احداث شده در زنجیره‌تامین (تسهیلات آماده‌سازی و پالایشگاه‌های نفت تجهیز شده) گزارش شده است.

1. Iran Statistical Yearbook of oil products consumption

جدول ۸. مقدار تابع هدف براساس مقادیر بهینه توابع هدف اول و دوم

| تابع هدف اول (درآمد خالص پس از کسر بهره و مالیات) | تابع هدف دوم (مجموع دارایی‌های ثابت و جاری) | تابع هدف مدل |
|---|---|--------------|
| ۹۵۰۴۷۴۰۰۰ | ۷۱۹۱۵۸۹۰۰۰ | ۰/۱۳۲ |

ماخذ: نتایج تحقیق

همان‌طور که در جدول (۹) نشان داده شده است، چهار تسهیل آماده‌سازی در فارس، اصفهان، تهران و خراسان رضوی احداث و سه پالایشگاه فارس، اصفهان و تهران تجهیز شده‌اند. تسهیل آماده‌سازی فارس در سال‌های دوم و هشتم، تسهیل آماده‌سازی اصفهان در سال‌های نهم و چهاردهم، تسهیل آماده‌سازی تهران در سال چهاردهم و تسهیل آماده‌سازی خراسان رضوی در سال نهم افزایش ظرفیت داشته‌اند.

محصول میانی slurry زیستی و تکنولوژی پیرولیز سیار راکتور تخت برای تسهیلات آماده‌سازی انتخاب شده است. همچنین ظرفیت تجهیز پالایشگاه‌های نفت فارس، اصفهان و تهران در سال چهارم افزایش ظرفیت داشته است.

جدول ۹. مقادیر بهینه متغیرهای استراتژیک مربوط به تسهیلات آماده‌سازی و تجهیز پالایشگاه‌های نفت

| دوره زمانی استراتژیک | تسهیلات آماده-سازی { z_{pc,qq,t^s} } | ظرفیت { cap_{pc,t^s} } | تکنولوژی* { δ_{ip,pr,t^s} } | پالایشگاه‌های تجهیز شده { $cap_{pr,ip}^{retrofit}$ } | ظرفیت تجهیز گیگاژول | تکنولوژی / نقطه ورودی |
|----------------------|---|--|---------------------------------------|---|----------------------------------|-----------------------|
| ۱ | فارس، اصفهان، تهران، خراسان رضوی | ۱۰۰۰۰۰۰ ۵۸۵۶۸۲۷.۲۶۸ ۵۶۹۱۳۶۰.۴۸۸ ۵۷۵۳۶۸۴.۸۷۱ | K2 | فارس، اصفهان، تهران | ۸۱۴۳۰۹۹۰ ۸۰۷۹۸۹۲۰ ۸۰۷۸۲۴۴۰ | Bioslurry |
| ۳-۲ | فارس، اصفهان، تهران، خراسان رضوی | ۶۴۲۴۰۲۵.۸۱۱ ۵۸۵۶۸۲۷.۲۶۸ ۵۶۹۱۳۶۰.۴۸۸ ۵۷۵۳۶۸۴.۸۷۱ | K2 | فارس، اصفهان، تهران | ۸۱۴۳۰۹۹۰ ۸۰۷۹۸۹۲۰ ۸۰۷۸۲۴۴۰ | Bioslurry |

| تکنولوژی / نقطه ورودی | ظرفیت تجهیز $\{cap_{pr,ip}^{retrofit}\}$ گیگاژول | پالایشگاه‌های تجهیز شده $\{\delta_{ip,pr,t^s}\}$ | تکنولوژی * K2 | ظرفیت $\{cap_{pc,t^s}^{pconv}\}$ تن | تسهیلات آماده- سازی $\{z_{pc,qq,t^s}\}$ | دوره زمانی استراتژیک |
|--------------------------|--|--|------------------|--|---|-------------------------|
| Bioslurry | ۹۶۲۲۰۸۰۰ ۹۶۲۲۰۸۰۰ ۹۶۲۲۰۸۰۰ | فارس، اصفهان، تهران | K2 | ۶۴۲۴۰۲۵۸۱۱ ۵۸۵۶۸۲۷۰۲۶۸ ۵۶۹۱۳۶۰۰۴۸۸ ۵۷۵۳۶۸۴۸۷۱ | فارس، اصفهان، تهران، خراسان رضوی | ۴-۷ |
| Bioslurry | ۹۶۲۲۰۸۰۰ ۹۶۲۲۰۸۰۰ ۹۶۲۲۰۸۰۰ | فارس، اصفهان، تهران | K2 | ۷۴۱۸۸۵۲۰۹۳۰ ۵۸۵۶۸۲۷۰۲۶۸ ۵۶۹۱۳۶۰۰۴۸۸ ۵۷۵۳۶۸۴۸۷۱ | فارس، اصفهان، تهران، خراسان رضوی | ۸ |
| Bioslurry | ۹۶۲۲۰۸۰۰ ۹۶۲۲۰۸۰۰ ۹۶۲۲۰۸۰۰ | فارس، اصفهان، تهران | K2 | ۷۴۱۸۸۵۲۰۹۳۰ ۷۷۶۳۲۶۰۰۵۵۱ ۵۶۹۱۳۶۰۰۴۸۸ ۶۹۵۲۸۴۶۰۵۳۱ | فارس، اصفهان، تهران، خراسان رضوی | ۹-۱۵ |
| Bioslurry | ۹۶۲۲۰۸۰۰ ۹۶۲۲۰۸۰۰ ۹۶۲۲۰۸۰۰ | فارس، اصفهان، تهران | K2 | ۷۴۱۸۸۵۲۰۹۳۰ ۱۱۶۳۵۰۵۰ ۶۶۷۶۹۷۵۰۲۸۸ ۶۹۵۲۸۴۶۰۵۳۱ | فارس، اصفهان، تهران، خراسان رضوی | ۱۵-۱۴ |

K1= پیرولیز راکتور چرخشی و K2= پیرولیز سیار راکتور تخت

ماخذ: نتایج تحقیق

۴-۳. لزوم تفکیک دوره‌های زمانی استراتژیک و تاکتیکی در مدل ارائه شده برای مطالعه موردی

در این بخش به منظور نشان دادن برتری مدل زنجیره تامین پویا نسبت به زنجیره تامین ایستا از نظر تفکیک دوره‌های زمانی استراتژیک و تاکتیکی در نظر گرفته شده برای افق برنامه‌ریزی، مدل

زنجیره تامین ارائه شده را با حالتی مقایسه می‌کنیم که در مطالعه موردی به جای در نظر گرفتن ۱۵ دوره استراتژیک یک ساله و ۳۰ دوره زمانی تاکتیکی، ۳۰ دوره زمانی یکسان در نظر گرفته شود که با در نظر گرفتن متغیر باینری برای امکان تغییر متغیرهای استراتژیک در هر دوره حل شود. به این منظور تعداد متغیرهای باینری که دارای اندیس دوره زمانی هستند در دو حالت مفروض در جدول (۱۰) گزارش شده است.

همانطور که در جدول (۱۰) نشان داده شده است، متغیرهای باینری که در مدل پویا فقط اندیس دوره زمانی استراتژیک داشته‌اند، با این تغییر تعدادشان چهار برابر شده است که باعث افزایش پیچیدگی حل و در نتیجه افزایش زمان حل خواهد شد. از سوی دیگر، با توجه به طولانی بودن زمان تغییر در متغیرهای استراتژیک، در نظر گرفتن دوره‌های زمانی شش ماهه که در آن متغیرهای استراتژیک قابلیت تغییر داشته باشند (با توجه به در نظر گرفتن طراحی شبکه زنجیره تامین پویا که در آن متغیرهای استراتژیک اندیس دوره زمانی دارند)، با ماهیت متغیرهای استراتژیک سازگار نمی‌باشد. این مفروض در حالتی که در مطالعه موردی تعداد متغیرهای تاکتیکی بیشتری در دوره زمانی استراتژیک یک ساله در نظر گرفته شود دارای ناسازگاری بیشتری خواهد بود.

جدول ۱۰. مقایسه تعداد متغیرهای باینری مدل پیشنهادی

با در نظر گرفتن عدم تفکیک دوره‌های زمانی در مطالعه موردی

| افزایش تعداد متغیرهای باینری | تعداد متغیرهای باینری | | متغیرهای باینری دارای اندیس دوره زمانی | |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--|--|
| | عدم تفکیک دوره‌های زمانی (مدل ایستا) | مدل پویا | نماد | متغیر استراتژیک |
| ۲×۲=۴ | $ip \times pr \times 30$ | $ip \times pr \times 15$ | $\delta_{ip,pr,t,s}$ | تجهیز پالایشگاه نفت در دوره زمانی استراتژیک |
| | $pc \times qq \times 30$ | $pc \times qq \times 15$ | $Z_{pc,qq,t,s}$ | احداث تسهیل آماده‌سازی در دوره زمانی استراتژیک |

ماخذ: نتایج تحقیق

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش دو راهکار عمده جهت تخفیف چالش مطرح شده در مورد توسعه صنعت انرژی زیستی یعنی هزینه زنجیره تامین زیست توده ناشی از تولید ناکارای انرژی زیستی از فیداستاک‌های زیست توده با محتوای انرژی پایین، هزینه‌های بالای لجستیک تولید، پردازش و حمل و نقل زیست توده ارائه شده است. از یک سو، براساس تکنولوژی ارائه شده توسط دپارتمان انرژی ایالات متحده مبنی بر استفاده از ظرفیت پالایشگاه‌های نفت موجود، سوخت زیستی هیدروکربن پیشرفته را می‌توان از طریق ارتقای محصولات میانی به محصولات نهایی (مانند بنزین، دیزل و سوخت جت) تولید نمود و از زیرساخت‌های موجود پالایشگاه‌های نفت جهت توزیع آن استفاده نمود که با توجه به هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری مربوط به پالایشگاه‌های زیستی در زنجیره تامین سوخت زیستی و با توجه به حذف بخش بزرگی از هزینه حمل و نقل به این دلیل که حمل و نقل از طریق خطوط لوله موجود انجام می‌شود، صرفه‌جویی‌های قابل ملاحظه بزرگی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و کل هزینه‌های سالانه ایجاد می‌شود. از سوی دیگر، با اعمال نمودن طراحی شبکه زنجیره تامین پویا، دو دوره زمانی استراتژیک و تاکتیکی در مدلسازی در نظر گرفته شده که در آن امکان افزایش ظرفیت تسهیلات و فعال شدن تسهیلات در هر دوره زمانی استراتژیک وجود دارد. براین اساس، در این پژوهش شبکه زنجیره تامین چهار سطحی مورد مطالعه در قالب یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط کسری خطی چند محمولی و چند دوره‌ای پیشنهاد شده است که در آن امکان افزایش ظرفیت تسهیلات و فعال شدن تسهیلات در طول دوره زمانی وجود دارد. مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم شامل تصمیم‌گیری در خصوص مساحت قابل تخصیص به کاشت زیست توده در هر دوره زمانی استراتژیک جهت کاشت فیداستاک زیست توده، انتخاب مکان و ظرفیت تسهیلات آماده‌سازی، انتخاب پالایشگاه‌های نفت تجهیز شده و ظرفیت تجهیز، تخصیص نواحی تامین به تسهیلات آماده‌سازی، تسهیلات آماده‌سازی به پالایشگاه‌های نفت تجهیز شده و تخصیص محصولات نهایی به نواحی تقاضا است. تعداد، مکان، ظرفیت تسهیلات و همچنین

سیاست‌های منبع‌یابی قابلیت تغییر در هر دوره زمانی استراتژیک را دارند. از سوی دیگر، تصمیمات مربوط به سطح برنامه‌ریزی میان‌مدت در دوره‌های زمانی تاکتیکی تعیین می‌شوند.

لحاظ کردن جریان مالی در شبکه و کنترل عملکرد مالی زنجیره تامین دیگر جنبه نوآوری این مقاله است که با توجه به لزوم در نظر گرفتن تابع هدف کارایی برای زنجیره تامین سوخت زیستی برای مدل توسعه داده شده پیشنهاد شده است. برای حل مدل توسعه داده شده کسری خطی از روش اپسیلون محدودیت بهبودیافته استفاده شده که با استفاده از نرم‌افزار گمز و سالور سیلکس حل شده است. برای صحت‌سنجی عملکرد مدل، مدل توسعه داده شده را برای طراحی یک مطالعه موردی در ایران به کار برده و نتایج محاسباتی ارائه شده است.

به منظور توسعه مدل پیشنهادی می‌توان علاوه بر تابع هدف کارایی، با توجه به اهمیت نقش تکنولوژی در توسعه حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و بخصوص سوخت زیستی، تابع هدف دیگری با مفهوم نوآوری برای مدل در نظر گرفت که می‌تواند فرصتی برای پژوهش‌های آتی باشد. همچنین با توجه به شرایط آب و هوایی غیر قابل پیش‌بینی، شرایط اقتصادی بی‌ثبات، سیاست‌ها و الزامات متغیر مرتبط با سوخت زیستی و تغییرات در تکنولوژی‌های سوخت زیستی که عواملی هستند که می‌توانند منجر به چندین منشا عدم قطعیت شوند، غیرقطعی بودن پارامترهایی مانند بازدهی زیست‌توده، تقاضا، قیمت، نرخ تبدیل زیست‌توده به سوخت زیستی و ... می‌تواند به واقعی‌تر شدن مدل کمک نماید. از سوی دیگر، به منظور لحاظ نمودن مسائل مربوط به پایداری^۱ در طراحی شبکه زنجیره‌تامین که به یک حوزه تحقیق مورد توجه در سال‌های اخیر تبدیل شده است، استفاده از متدولوژی ارزیابی دوره عمر برای ارزیابی اثرات اجتماعی و محیط‌زیستی برای مدل پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- Aghaei, J., Amjady, N., & Shayanfar, H. A. (2011). Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method. *Applied Soft Computing*, 11(4), 3846–3858. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2011.02.022>
- Aghezzaf, E. (2005). Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. *Journal of the Operational Research Society*, 56(4), pp.453–462.
- Badri, H., Bashiri, M., & Hejazi, T. H. (2013). Integrated strategic and tactical planning in a supply chain network design with a heuristic solution method. *Computers & Operations Research*, 40(4), 1143–1154.
- Bashiri, M., Badri, H., & Talebi, J. (2012). A new approach to tactical and strategic planning in production–distribution networks. *Applied Mathematical Modelling*, 36(4), 1703–1717.
- Behmardi, B., & Lee, S. (2008). Dynamic multi-commodity capacitated facility location problem in supply chain. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 1914). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE).
- Canel, C., Khumawala, B. M., Law, J., & Loh, A. (2001). An algorithm for the capacitated, multi-commodity multi-period facility location problem. *Computers & Operations Research*, 28(5), 411–427.
- Correia, I., Melo, T., & Saldanha-da-Gama, F. (2013). Comparing classical performance measures for a multi-period, two-echelon supply chain network design problem with sizing decisions. *Computers & Industrial Engineering*, 64(1), pp.366–380.
- Čuček, L., Martín, M., Grossmann, I., Chemical, Z. K.-C. (2014). Multi-period synthesis of optimally integrated biomass and bioenergy supply network. *Elsevier*.
- Demirbas, A. (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2106–2116.
- Dias, J., Captivo, M. E., & Clímaco, J. (2007). Efficient primal-dual heuristic for a dynamic location problem. *Computers & Operations Research*, 34(6), 1800–1823.
- Farahani, R. Z., Rezapour, S., Drezner, T., & Fallah, S. (2014). Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. *Omega*, 45, 92–118.
- Fattahi, M., Mahootchi, M., Govindan, K., & Hussein, S. M. M. (2015). Dynamic supply chain network design with capacity planning and multi-period pricing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 81, 169–202.
- Hammami, R., & Frein, Y. (2014). Redesign of global supply chains with integration of transfer pricing: Mathematical modeling and managerial insights. *International Journal of Production Economics*, 158, 267–277.
- Hinojosa, Y., Kalcsics, J., Nickel, S., Puerto, J., & Velten, S. (2008). Dynamic supply chain design with inventory. *Computers & Operations Research*, 35(2), 373–391.

- Hinojosa, Y., Puerto, J., & Fernández, F. R. (2000). A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, 123(2), 271–291.
- Iran Statistical Yearbook of Agricultural Products. (2013). *Iran's Ministry of Agriculture*, <<http://www>>.
- Iran Statistical Yearbook of oil products consumption. (2014). *National Iranian Oil Products Distribution Company (NIOPDC)*, <<http://ni>>.
- Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Seuring, S. (2014). Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: a robust model with real world application. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 70, 225–244.
- Kazemzadeh, N., & Hu, G. (2013). Optimization models for biorefinery supply chain network design under uncertainty. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(5), 53125. <https://doi.org/10.1063/1.4822255>
- Kim, S., & Dale, B. E. (2004). Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 361–375.
- Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 283–293.
- Longinidis, P., & Georgiadis, M. C. (2011). Integration of financial statement analysis in the optimal design of supply chain networks under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 129(2), 262–276.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455–465. <https://doi.org/10.1016/J.AMC.2009.03.037>
- Melachrinoudis, E., & Min, H. (2000). The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehousing facility: A multiple objective approach. *European Journal of Operational Research*, 123(1), 1–15.
- Melo, M. T., Nickel, S., & Da Gama, F. S. (2006). Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers & Operations Research*, 33(1), 181–208.
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management—A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), pp.401–412.
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2012). A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon. *International Journal of Production Economics*, 136(1), 218–230.
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2014). An efficient heuristic approach for a multi-period logistics network redesign problem. *Top*, 22(1), pp.80–108.
- Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., & Ziegler, H.-P. (2012). A multi-stage stochastic supply network design problem with financial decisions and risk management. *Omega*, 40(5), 511–524.

- Pimentel, B. S., Mateus, G. R., & Almeida, F. A.** (2013). Stochastic capacity planning and dynamic network design. *International Journal of Production Economics*, 145(1), 139–149.
- Razm, S., Nickel, S., ... M. S.-J. of C.** (2019). A global bioenergy supply network redesign through integrating transfer pricing under uncertain condition. *Elsevier*.
- Ross, S.** (2010). *Fundamentals of Corporate Finance: Standard Edition*/Stephen A. Ross, Bradford Jordan, Randolph W. Westerfield, Bradford D Jordan.
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q.** (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: a generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336–349.
- Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., Huhnke, R. L., & Khanchi, A.** (2013). Scenario optimization modeling approach for design and management of biomass-to-biorefinery supply chain system. *Bioresource Technology*, 150, 163–171.
- Thanh, P. N., Bostel, N., & Péton, O.** (2008). A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 678–693.
- Thanh, P. N., Péton, O., & Bostel, N.** (2010). A linear relaxation-based heuristic approach for logistics network design. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4), 964–975.
- Tong, K., Gleeson, M. J., Rong, G., & You, F.** (2014). Optimal design of advanced drop-in hydrocarbon biofuel supply chain integrating with existing petroleum refineries under uncertainty. *Biomass and Bioenergy*, 60, 108–120.
- Torres Soto, J.** (2010). *Dynamic and robust capacitated facility location in time varying demand environments*.
- U.S. Department of Energy.** (2012). Replacing the whole barrel to reduce U.S. dependence on oil.
- Wilhelm, W., Han, X., & Lee, C.** (2013). Computational comparison of two formulations for dynamic supply chain reconfiguration with capacity expansion and contraction. *Computers & Operations Research*, 40(10), 2340–2356.
- Wong, C. W. Y., Wong, C. Y., & Boon-itt, S.** (2013). The combined effects of internal and external supply chain integration on product innovation. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 566–574.
- You, F., Tao, L., Graziano, D. J., & Snyder, S. W.** (2012). Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis. *AIChE Journal*, 58(4), 1157–1180.
- 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.