

## طراحی زنجیره تأمین تاب آور در صنعت نفت تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلالی: مطالعه موردی

آرزو بنشاسته

دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت (نویسنده مسئول)

a\_benshasteh@ind.iust.ac.ir

هادی صاحبی

استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران

hadi\_sahebi@iust.ac.ir

محمدسعید جبل عاملی

استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

jabal@iust.ac.ir

صنعت نفت از بزرگ‌ترین و مؤثرترین صنایع جهان است. به دلیل ساختار پیچیده زنجیره‌های تأمین نفت و عدم قطعیت قیمت و تقاضا، طراحی شبکه زنجیره تأمین ابزاری مناسب برای بهبود این صنعت است. پیچیدگی زنجیره‌های تأمین باعث افزایش آسیب‌پذیری نسبت به اختلالات می‌شود؛ بنابراین هنگام طراحی زنجیره تأمین، توجه به تاب‌آوری که زنجیره تأمین را قادر می‌سازد در مواجهه با اختلال، عملکرد مناسبی داشته باشد، ضروری است. به علت نبود مفاهیم تاب‌آوری و اختلال در ادبیات زنجیره تأمین نفت، مدل برنامه‌ریزی دومرحله‌ای تصادفی دو هدفه ارائه و از استراتژی توسعه پالایشگاه‌ها و جایگزینی بایواتانول جهت اختلاط با بنزین برای مقابله با اختلالات که بر صادرات نفت و واردات اکتان افزایش بنزین اثر می‌گذارند، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلال در واردات اکتان افزایش، باعث کاهش ۱۰ درصدی ارزش خالص فعلی و در بخش انتقال نفت به پایانه‌های صادراتی باعث کاهش ۲ درصدی ارزش خالص فعلی شده و استفاده از استراتژی‌هایی همچون افزایش ظرفیت پالایشگاه‌ها باعث ۱ درصد بهبود تابع هدف می‌شود. مدل با استفاده از روش اسپیلون محدودیت تکامل یافته برای کشور ایران به‌عنوان مطالعه موردی در بازه زمانی ۸ ساله حل شده و آنالیز حساسیت بر پارامترهای مهم انجام شده است.

**واژگان کلیدی:** طراحی شبکه تأمین نفت، ریسک‌های عملیاتی، ریسک‌های اختلالی، تاب‌آوری، مدل برنامه‌ریزی دومرحله‌ای تصادفی.

## ۱. مقدمه

نفت یکی از منابع حیاتی انرژی است که از سال ۱۹۹۰ بیش از ۳۰ درصد از تقاضای انرژی جهان را تشکیل می‌دهد. منابع اصلی دیگر انرژی گاز طبیعی، انرژی هسته‌ای، انرژی‌های تجدید پذیر<sup>۱</sup> و زغال‌سنگ هستند (پترولیوم<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵). برنامه‌ریزی و طراحی شبکه ابزاری برای بهبود رقابت زنجیره‌های تأمین نفت است که این روزها تحت تأثیر بحران اقتصادی، رقابت انرژی جایگزین و عدم قطعیت مربوط به قیمت قرار می‌گیرد (فرناندس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). به‌عنوان مثال می‌توان به ارزان شدن قیمت نفت خام با توجه به سیاست‌های آمریکا در گسترش عرضه نفت اشاره نمود (رضوانی، ۲۰۱۹). در زنجیره تأمین نفت، نفت پس از استخراج و جداسازی آب و املاح به نفت خام تبدیل شده و سپس به‌منظور تأمین نیاز داخلی به‌عنوان ماده خام، پالایشگاه‌های داخلی<sup>۴</sup> را تغذیه کرده و یا به‌منظور فروش به مشتریان خارجی به پایانه‌های شناور صادراتی<sup>۵</sup> عرضه می‌شود. پالایشگاه‌ها از این نفت خام استفاده کرده و با فراورش آن، مشتقاتی مانند نفت گاز، بنزین، نفت کوره و نفت سفید را تولید می‌کنند. در مرحله بعد محصولات و مشتقات نفتی با مدهای مختلف حمل‌ونقلی<sup>۶</sup> مانند خط لوله یا حمل‌ونقل ریلی و یا حمل‌ونقل جاده‌ای به مراکز توزیع رفته و بعد از آن به دست خرده‌فروشان و مشتریان نهایی می‌رسد. همان‌طور که اشاره شد، بنزین یکی از محصولات پالایش نفت خام است. بنزین سوپر<sup>۷</sup> با اکتان ۹۵ مخلوطی از بنزین با افزودنی‌های

1. Renewable energies
2. Petroleum
3. Fernandes et al
4. Domestic Refinery
5. Single Buoy Mooring - SBM
6. Transportation Modes
7. premium petrol

مختلفی نظیر تترا اتیل لید<sup>۱</sup>، اتانول<sup>۲</sup>، متانول<sup>۳</sup> و ترکیبات حلقوی افزایش می‌یابد و عملکرد بدون ضربه<sup>۴</sup> را برای خودروها با نیاز اکتان بالا تولید نماید. در کشور ایران علاوه بر افزودنی متیل ترشیو بوتیل اتر از خارج وارد کشور می‌شود. در ایالات متحده، اتانول به بنزین خرده‌فروشی به‌عنوان جایگزینی برای متیل ترشیو بوتیل اتر که اثرات مخربی بر سلامتی و محیط زیست دارند، اضافه می‌شود. بنزین مخلوط شده با اتانول به‌طور عمده میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید را با افزایش مقاومت در برابر ضربه به نسبت در نرخ‌های بالاتری کاهش می‌دهد (ژانگ و ساراتی، ۲۰۱۶). افزودن اتانول به بنزین هم باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها و هم باعث کاهش انتشار گاز کربن دی‌اکسید شده و کارایی مناسبی به نسبت افزودنی‌های متیل اتر و بوتیل اتر دارد و خطرات زیست‌محیطی ناشی از استفاده آن‌ها را ندارد (سعادت و حسینی نژاد، ۲۰۱۹).

در این پژوهش، مدلی برای تأمین، تولید و توزیع نفت و محصولات نفتی از جمله بنزین در یک زنجیره تأمین تاب آور تحت اختلال<sup>۵</sup> و ریسک‌های عملیاتی ارائه می‌شود. برای تأمین بنزین واردات اکتان با اختلالاتی مواجه است. به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری ناشی از اختلالات، استفاده از اتانول زیستی جهت بالا بردن کیفیت بنزین و به جهت حفظ سودآوری زنجیره و پاسخگویی<sup>۶</sup> آن در برابر اختلال فروش نفت خام، توسعه پالایشگاه‌ها بررسی می‌گردد. برخی سئوالات تحقیق عبارت‌اند از: (۱) به‌کارگیری استراتژی‌های مختلف جهت مقابله با اختلال، چه تأثیری بر اهداف مختلف زنجیره‌ی تأمین نفت (شامل سودآوری و تاب‌آوری) دارد و در مجموع آیا استفاده از این راهکارها موجب افزایش تاب‌آوری و سود کل سیستم می‌شود یا خیر؟ (۲) سیاست بهینه‌ی تولید، توزیع و فروش نفت خام و مشتقات نفتی چگونه باشد تا زنجیره پاسخگوی تقاضا بوده و توابع

1. Tetraethyl lead
2. Ethanol
3. Methanol
4. knock
5. Zhang & Sarathy
6. Disruption
7. Responsibility

هدف در حالت بهینه باشند؟ (۳) چگونه می‌توان راهکاری جهت مقابله با اختلالات و عدم قطعیت‌های موجود در زنجیره ارائه داد؟ (۴) اثر اختلال وارد بر سیستم چه مقدار بر تاب‌آوری و سودآوری سیستم اثر می‌گذارد؟

به‌طور کلی نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از: (۱) ارائه مدل ترکیبی طراحی زنجیره تأمین نفت با در نظر داشتن سوخت زیستی. (۲) در نظر داشتن اختلال حمل‌ونقل نفت و کمبود اکتان افزای و اثر آن بر زنجیره. (۳) ارائه استراتژی‌های متفاوت جهت مقابله با اختلال و بهبود تاب‌آوری زنجیره و همچنین بررسی اثرات اختلال و استراتژی‌ها بر اهداف مدل. (۴) موازنه تابع هدف تاب‌آوری و تابع هدف ارزش خالص فعلی (۵) بررسی کاربردی بودن مدل با مراجعه به داده‌های واقعی (مطالعه موردی).

در ادامه در بخش دوم مبانی نظری و پیشینه تحقیق، در بخش سوم روش تحقیق شامل مدل ریاضی و روش حل آن ارائه شده است. در بخش چهارم داده‌ها و پارامترهای تحقیق، در فصل پنجم نتایج موردی و نهایتاً در فصل ششم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه تحقیق

### ۲-۱. مفهوم تاب‌آوری زنجیره تأمین

با پیچیده‌تر شدن زنجیره‌های تأمین، آن‌ها نسبت به اختلالات ناشی از فجایای مختلف مانند بلایای طبیعی، ناآرامی‌های سیاسی، اعتصاب‌ها، مسائل قانونی پیش‌بینی نشده، مشکلات بندرگاه‌ها و فعالیت‌های تروریستی آسیب‌پذیر می‌شوند (اشنایدر و همکاران، ۲۰۱۶). هنگامی که شبکه‌های زنجیره تأمین با اختلال مواجه می‌شوند، رویکردهای جدیدی برای طراحی، ساخت و مدیریت آن‌ها جهت مقابله با اختلالات موردنیاز است (کریستوفر و هالوگ، ۲۰۱۱). ایجاد تاب‌آوری یک

1. Snyder et al.
2. Christopher & Holweg

قابلیت استراتژیک است (شفی و رایس<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵) که زنجیره تأمین را به پیش‌بینی<sup>۲</sup>، انطباق<sup>۳</sup>، پاسخگویی و بازیابی<sup>۴</sup> سریع در برابر رویدادهای غیرقابل پیش‌بینی قادر می‌سازد (پونومارو و هولکومب<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹؛ رایس و کانیا<sup>۶</sup>، ۲۰۰۳). اولین تعریف برای تاب‌آوری در زمینه مدیریت زنجیره تأمین<sup>۷</sup> عبارت است از توانایی پاسخگویی به یک اختلال غیرمنتظره، مانند یک بلای طبیعی و بازیابی عملکرد معمولی (رایس و کانیا<sup>۶</sup>، ۲۰۰۳). در تعریفی دیگر تاب‌آوری زنجیره تأمین به قابلیت زنجیره تأمین برای آمادگی جهت مقابله با رویدادهای غیرمنتظره، پاسخگویی و بازیابی تا رسیدن به سطح مطلوب پیوستگی و کنترل بر ساختار و عملکرد آن می‌باشد (هوهنستین<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). جهت ارزیابی تاب‌آوری روش‌های متفاوتی ارائه شده است که برخی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری در زمینه و علوم متفاوت کاربرد داشته و عام هستند و برخی با توجه به حوزه خاص مورد مطالعه طرح شده‌اند. جهت بهبود و افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین نیز دودسته استراتژی واکنشی<sup>۹</sup> و کنشگرایانه<sup>۱۰</sup> تعریف شده که از مهم‌ترین آن‌ها انعطاف‌پذیری<sup>۱۱</sup>، چابکی<sup>۱۲</sup>، همکاری<sup>۱۳</sup>، بازطراحی زنجیره تأمین، افزونگی<sup>۱۴</sup> و منابع چندگانه<sup>۱۵</sup> است. با وجود مقالات متفاوت در زمینه تاب‌آوری زنجیره تأمین، تحقیقات اندکی وجود دارد که معیاری<sup>۱۶</sup> برای سنجش که آن

1. Sheffi & Rice
2. Anticipate
3. Adapt
4. Recovery
5. Ponomarov & Holcomb
6. Rice & Caniato
7. Supply chain management
8. Hohenstein
9. Reactive
10. Proactive
11. Flexibility
12. Agility
13. Cooperation
14. Redundancy
15. Multiple sourcing
16. Measurement

را مورد بحث و بررسی قرار دهد. در ادامه به برخی از مقالات ارائه شده در حوزه تاب‌آوری زنجیره تأمین اشاره می‌گردد.

## ۲-۱-۱. مرور ادبیات زنجیره تأمین تاب‌آور

قمی اویلی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با استفاده از رویکرد دومرحله‌ای احتمالی در شرایط ریسک تأمین پرداخته است. در کنار در نظر گرفتن اختلال در تأمین، عواملی از قبیل استفاده از موجودی اضافی و همچنین قرارداد با تأمین‌کنندگان قابل اطمینان در دوره‌هایی که دچار اختلال نشده است به‌عنوان استراتژی در نظر گرفته شده است. هدف کمینه کردن هزینه‌های زنجیره با توجه به تصمیمات مکان‌یابی میزان جریان بین سطوح و فروش ازدست‌رفته است.

بهشتیان و همکاران (۲۰۱۷) مدل برنامه‌ریزی دومرحله‌ای تصادفی برای طراحی زنجیره تأمین سوخت موتور شامل استراتژی‌هایی نظیر نگهداشت موجودی اضطراری برای به مقابله با اختلالات ارائه نموده‌اند. مدل شامل یک تابع هدف به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری است که برابر با نسبت تقاضای تأمین نشده در طول اختلال به تقاضا کل است. نتایج نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی یکپارچه به همراه تخصیص هوشمندانه منابع تاب‌آوری بیشتر و کم‌هزینه‌تری دارد.

بهزادی و همکاران (۲۰۱۷) مدل دومرحله‌ای تصادفی برای یک زنجیره تأمین کشاورزی ارائه داده‌اند. در این مقاله به جهت کاهش ریسک، استراتژی‌های تاب‌آوری و استواری به کار رفته است. این مدل سود انتظاری را با انتخاب استراتژی‌های مدیریت ریسک بهینه و تصمیمات برنامه‌ریزی تاکتیکی زنجیره تأمین بهینه‌سازی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد ترکیب استراتژی‌های استواری و تاب‌آوری برای کاهش ریسک‌های اختلالی تأمین راه مؤثری است.

فتاحی و همکاران (۲۰۱۷) به طراحی تاب‌آور شبکه زنجیره تأمین با استفاده از یک مدل چند دوره‌ای، چند سطحی و تصادفی پرداختند. در این مدل فرض شده است که تقاضای مشتریان وابسته به تسهیلاتی است که به آن‌ها خدمت می‌دهند و ظرفیت تسهیلات، خود به‌واسطه اختلال به‌صورت تصادفی تغییر می‌کند. تاب‌آوری در مدل مذکور با استفاده از در نظر گرفتن ریسک پاسخگویی

لحاظ شده است. هدف این کار کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین به‌علاوه محدود کردن ریسک پاسخگویی است که از طریق تابع هدف و چند محدودیت انجام شده است.

جبارزاده، فهیم نیا و رستگار (۲۰۱۷) با استفاده از بهینه‌سازی استوار یک مدل چندهدفه به‌منظور طراحی تاب آور و سبز یک زنجیره تأمین برق با در نظر داشتن شبکه هوشمند ارائه نموده‌اند. اهداف این مدل شامل اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و تاب‌آوری است. از آنجا که اختلال به سیستم انتقال برق آسیب می‌رساند، انتقال برق به‌صورت جایگزین به‌عنوان استراتژی تاب‌آوری در نظر گرفته شده است.

گانگ و یو<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) یک مدل چندهدفه استوار به‌منظور بهینه‌سازی توابع تاب‌آوری و اقتصادی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از اختلالات برای یک سیستم فرآیند گاز و شبکه فرآیند شیمیایی ارائه شده است. در این مقاله از استراتژی‌های انتخاب طراحی فرآیند تاب‌آور از میان طراحی فرایندهای موجود، ظرفیت اضافی، در نظر گرفتن فرآیند پشتیبان و بهینه‌سازی سطح فعالیت پس از وقوع اختلال استفاده شده است. در این مقاله به جهت ارزیابی تاب‌آوری، تابع هدفی تحت این عنوان ارائه شده که برابر است با نسبت میزان عملکرد سیستم به میزان عملکرد سیستم در شرایطی که اختلالی وجود ندارد.

دهقانی و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی استوار و سناریو محور به‌منظور طراحی زنجیره تأمین تاب آور فتوولتائیک تحت عدم قطعیت‌های معمول کسب و کار و ریسک و مجموعه‌ای از استراتژی‌ها نظیر تقویت تسهیلات و چند منبعی به‌منظور مقابله با اختلالات ارائه داده‌اند. مدل شامل دو فاز است که در فاز اول ریسک‌های موجود نظیر سیل، زلزله در نقاط کاندید با استفاده از آماره‌های ریاضی محاسبه می‌شود. سپس در فاز دوم سناریوهای ممکن بر اساس نقاط با ریسک بالا تولید شده و در مدل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته می‌شود.

---

1. Gong & You

جبارزاده، فهیم نیا و صبوحي (۲۰۱۸) یک رویکرد دو فازی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار که نسبت به اختلالات تاب آور است، ارائه داده‌اند. هدف اولیه مدل ارائه شده این است که اطمینان حاصل شود که عملکرد پایداری زنجیره تأمین تا جایی که امکان پذیر باشد، تحت تأثیر اختلالات قرار نمی‌گیرد.

ظهیری، ژانگ<sup>۱</sup> و محمدی (۲۰۲۰) مدل برنامه‌نویسی احتمالی-امکانی به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین دارویی تحت عدم قطعیت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه با در نظر گرفتن تاب‌آوری و پایداری ارائه نمودند. در این مقاله برای سنجش تاب‌آوری از بحرانی بودن گره، تخصیص‌های چندگانه و پیچیدگی گره و جریان و همچنین سطح خدمت به مشتری استفاده شده است. در این مقاله استراتژی تاب‌آوری فناوری‌های پشتیبان در نظر گرفته شده است. در جداول پیوست (۱) خلاصه‌ای از مرور ادبیات در حوزه زنجیره تأمین تاب آور ارائه شده است.

## ۲-۱-۲. شکاف موجود در ادبیات زنجیره تأمین تاب آور

تعدادی از مدل‌های تاب‌آوری زنجیره تأمین دارای شاخصی جهت سنجش میزان تاب‌آوری زنجیره هستند به‌عنوان مثال می‌توان به پژوهش‌های (بهشتیان و همکاران، ۲۰۱۷؛ گانگ و یو، ۲۰۱۸) اشاره نمود. لازم است جهت ارزیابی و اندازه‌گیری مقدار آن، باید شاخصی ارائه گردد تا بتواند تمام ابعاد آن را پوشش دهد.

آنچه تحت عنوان میزان تاب‌آوری در مدل‌ها مطرح شده است، طبق مدل (چن و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲)، نسبت تقاضای تأمین شده در شرایط اختلال به میزان تقاضای کل تأمین شده در شرایط عادی است. تعدادی از مقالات تحت عنوان طراحی زنجیره تأمین تاب آور در برابر اختلالات مطرح شده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به پژوهش (جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۶؛ جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره نمود. این مقالات از استراتژی‌های تاب‌آوری مانند در نظر گرفتن تأمین‌کننده پشتیبان

1. Zhung  
2. Chen et al.



و یا ظرفیت اضافی استفاده کرده‌اند. اگرچه این استراتژی‌ها، استراتژی‌های افزایش مقدار تاب‌آوری زنجیره تأمین هستند اما لزوماً استفاده از آن‌ها باعث تاب‌آوری نمی‌شود و حتی ممکن است آن را کاهش دهد (توکاموها‌بوا و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵).

در اکثر مدل‌ها، جزء مختل شده، تأمین‌کننده است، زیرا آسیب وارده به این سطح بیشترین تأثیر را بر زنجیره می‌گذارد. البته باید توجه داشت که اختلال در سطح تقاضا و یا سایر سطوح زنجیره نیز باعث تغییر حالت زنجیره از حالت عادی می‌شود و اهمیت بخش‌های دیگر نباید نادیده گرفته شود.

## ۲-۲. زنجیره تأمین نفت

با توجه به موقعیت محل احداث چاه، زنجیره تأمین نفت خام به دو بخش ساحلی<sup>۲</sup> (میدان واقع در خشکی) و فراساحلی<sup>۳</sup> (میدان واقع در دریا) تقسیم می‌شود. هرچند روال کلی فعالیت هر دو بخش شبیه یکدیگر است، اما تفاوت‌های موجودیت‌های حاضر در هر یک از این بخش‌ها موجب شده که این طبقه‌بندی ارائه شود. در کشور ایران «شرکت مناطق نفت‌خیز» و «شرکت نفت فلات قاره» به ترتیب مسئول بهره‌برداری از بخش‌های ساحلی و فراساحلی هستند.

در زنجیره تأمین نفت فراساحلی، مشابه حوزه ساحلی، پس از اکتشاف یک میدان نفتی و انجام مطالعات فنی و زمین‌شناسی، نقاطی جهت احداث چاه‌های نفت تعیین می‌شوند. براساس حجم میدان، یک یا چند پلتفرم چاه<sup>۴</sup> احداث می‌شود. با توجه به اینکه ماده‌ای که در این مرحله استخراج می‌شود مخلوطی از نفت و گاز و آب و شن و ماسه و سایر آلاینده‌هاست، در همان محیط دریا تسهیلاتی به نام سکوها<sup>۵</sup> نفتی، عملیات جداسازی را انجام داده و ترکیبات همراه را از نفت جدا نمایند. در اینجا نفت خام به‌دست آمده قابلیت عرضه به مشتریان را دارد اما به دلیل

1. Tukamuhabwa et al.
2. Onshore
3. Offshore
4. Well Platform
5. Production Platform

اینکه معمولاً سکوه‌های نفتی در بخش‌هایی از دریا واقع شده‌اند که عمق کمی (حداکثر ۱۵ متر) داشته و عملاً امکان پهلوگیری نفت‌کش‌های غول‌پیکر در کنار آن‌ها وجود ندارد به همین دلیل لازم است که نفت برای عرضه به پایانه‌های صادراتی<sup>۱</sup> که اغلب همان بنادر نفتی هستند منتقل شود و یا به تسهیلات دیگری به نام واحدهای ذخیره‌سازی شناور<sup>۲</sup> که در بخش‌های پرعرق دریا به صورت شناور حاضرند و نقش ذخیره‌سازی موقت نفت خام را ایفا می‌کنند هدایت شود.

طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین نفت، تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی در مورد موضوعاتی مانند توسعه میدان‌ها نفتی، حمل‌ونقل نفت خام، برنامه‌ریزی تولید فرآورده‌ها از نفت خام، برنامه‌ریزی توزیع است که این موضوعات بیشتر ناظر بر سطوح راهبردی و تاکتیکی زنجیره است (شه و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱). در ادامه به توضیح هر یک از موارد اشاره می‌گردد:

**توسعه میادین نفتی:** توسعه میادین نفتی شامل برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری (انتخاب بهینه طرح‌های سرمایه‌گذاری)، مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات سطوح بالادستی زنجیره، برنامه‌ریزی استخراج از میادین با توجه به عملکرد مخازن است. البته ممکن است در مقالات ترکیبی از تصمیمات فوق به کاررفته باشد.

**حمل‌ونقل نفت خام:** در طول شبکه‌ی زنجیره، از زمان استخراج تا زمان تحویل به مشتری نهایی، مدهای مختلف حمل‌ونقل وجود دارد. هرچند که انتقال نفت خام معمولاً از طریق خطوط لوله، نفت‌کش‌ها و کشتی‌ها صورت می‌پذیرد ولی مشتقات آن پس از تبدیل، با مدهای مختلف خطوط لوله، حمل‌ونقل دریایی، حمل‌ونقل ریلی و حمل‌ونقل جاده‌ای به نقاط تقاضا ارسال می‌شوند. منظور از حمل‌ونقل تک‌وجهی<sup>۴</sup> در نظر گرفتن صرفاً یک نوع مدل حمل‌ونقل در مدل‌سازی مقالات بوده که اغلب مد خط لوله است و حمل‌ونقل چندوجهی<sup>۵</sup> در مورد

1. Oil Export Terminals
2. Floating Storage Units - FSU
3. Shah et al.
4. Single modal transportation
5. Multimodal transportation

مدل‌سازی‌هایی است که در ساختار زنجیره تأمین خود بیش از یک نوع مد حمل و نقل (شامل خط لوله، ریلی، جاده‌ای، دریایی) را لحاظ کرده‌اند.

**برنامه‌ریزی تولید فرآورده‌ها از نفت خام:** منظور از تولید فرآورده‌های نفتی، تبدیل نفت خام به محصولات مورد نظر در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌هاست و مدل‌های این حوزه به بهینه‌سازی برنامه‌ی تولید این تسهیلات و در مواردی به تصمیم‌گیری تدارک و خرید خارجی نفت خام در دوره‌های زمانی مختلف می‌پردازند.

**برنامه‌ریزی توزیع:** پژوهشگران برنامه‌ریزی توزیع نفت خام را به دودسته‌ی توزیع اولیه و توزیع ثانویه تقسیم نموده‌اند. منظور از توزیع اولیه نفت خام، انتقال آن به انبارها و مراکز توزیع بوده و منظور از توزیع ثانویه انتقال آن به خرده‌فروشان و نقاط تقاضا است. در بخش اول معمولاً شامل مدهای حمل و نقلی خط لوله، حمل و نقل دریایی و گاهی حمل و نقل ریلی است در حالی که مدهای حمل و نقل بخش دوم معمولاً حمل و نقل جاده‌ای و ریلی است.

**برنامه‌ریزی زنجیره تأمین چند سطحی:** در مسائل برنامه‌ریزی زنجیره تأمین چند سطحی سعی بر آن است که با دوری از نگاه جزیره‌ای به زنجیره و بهینه‌سازی تنها بخشی از آن، با در نظر گرفتن همه سطوح زنجیره شامل تأمین، تولید، توزیع نفت خام و فرآورده بتوان کل زنجیره را به حالت بهینه رساند.

## ۲-۱-۲. مرور ادبیات زنجیره تأمین نفت

در مقاله (فرناندس و همکاران، ۲۰۱۶) یک مدل خطی عدد صحیح مختلط تک هدفه تصادفی به جهت بهینه‌سازی ارزش خالص فعلی بخش‌های میان دستی و پایین‌دستی زنجیره نفت ارائه شده است. در این مدل تولید فرآورده‌ها از نفت خام، توزیع اولیه و توزیع ثانویه و حمل و نقل چندوجهی زنجیره تأمین نفت پرتغال بهینه‌سازی می‌شود. مدل مجموعه‌ای از تصمیمات راهبردی شامل مکان‌یابی و تخصیص و تصمیمات تاکتیکی شامل برنامه‌ریزی توزیع و برنامه‌ریزی تولید پالایشگاه را در برمی‌گیرد. در مقاله (جبارزاده، پیشوایی و پایی، ۲۰۱۶) یک مدل خطی عدد صحیح مختلط

تک هدفه‌فازی به جهت بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی بخش‌های بالادستی و میان‌دستی زنجیره نفت ساحلی ارائه دادند. محدودیت‌های بودجه، زمان و تجهیزات در این مدل لحاظ شده‌اند. مقدار قابل استحصال از چاه، قیمت نفت خام و تقاضا به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. مدل حاوی تصمیمات راهبردی شامل سرمایه‌گذاری، مکان‌یابی و تخصیص و تصمیمات تاکتیکی شامل برنامه‌ریزی تولید مناطق نفتی و برنامه‌ریزی پروژه می‌باشد.

لیو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۶) به یک مدل خطی عدد صحیح مختلط تک هدفه قطعی به جهت کمینه‌سازی هزینه‌ها بخش‌های بالادستی زنجیره نفت پرداختند. در این مقاله توسعه میدین نفتی منطقه نفتی در منطقه غوار در عربستان مدل‌سازی شده است. تصمیمات راهبردی شامل مکان‌یابی و تخصیص و تصمیمات تاکتیکی شامل برنامه‌ریزی تولید مناطق نفتی می‌باشد.

اوزتورکوگلو و لاول<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) به ارائه یک مدل خطی عدد صحیح مختلط تک هدفه قطعی به جهت کمینه‌سازی هزینه‌ها بخش‌های بالادستی، میان‌دستی و پایین‌دستی زنجیره نفت پرداخته‌اند. تولید فرآورده‌ها از نفت خام، توزیع ثانویه و حمل‌ونقل چندوجهی در شبکه توزیع محصولات نفتی نیجریه در نظر گرفته شده است. تصمیمات راهبردی شامل مکان‌یابی و تخصیص و تصمیمات تاکتیکی شامل برنامه‌ریزی توزیع و برنامه‌ریزی تولید پالایشگاه در مدل لحاظ شده‌اند. آزاده و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط تک هدفه قطعی به جهت بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی ارائه دادند. در این مدل توسعه میدین نفتی تولید فرآورده‌ها از نفت خام، توزیع اولیه و حمل‌ونقل چندوجهی سطوح بالادستی و میان‌دستی شرکت ملی نفت ایران لحاظ شده و تصمیمات راهبردی شامل سرمایه‌گذاری، مکان‌یابی و تخصیص و انتخاب تکنولوژی، تصمیمات تاکتیکی شامل برنامه‌ریزی تولید پالایشگاه و برنامه‌ریزی پروژه، برنامه‌ریزی تولید مناطق نفتی در مدل قرار داده شده است.

1. Liu et al.

2. Öztürkoglu & Lawal

لیما و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) یک مدل چندمرحله‌ای تصادفی خطی برای بهینه‌سازی برنامه توزیع مشتقات نفتی ارائه و زنجیره پایین دست نفت پرتغال را به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب نمودند. مدل تصادفی مبتنی بر آنالیز سری‌های زمانی و درخت سناریو به‌منظور مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در قیمت نفت و تقاضا است. نتایج پژوهش نمایانگر این است که عملکرد مدل، برای مسائل پیچیده و دارای عدم قطعیت مناسب است. بیرانوند و همکاران (۲۰۱۸) مدل برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی سودآوری کل زنجیره تأمین نفت ایران با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت نفت و تقاضا ارائه دادند و از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این رویکرد سودآوری زنجیره را بالا می‌برد.

در جدول (۶) پیوست (۱) خلاصه‌ای از مرور ادبیات در حوزه زنجیره تأمین نفت ارائه شده است.

## ۲-۲-۲. شکاف موجود در ادبیات زنجیره تأمین نفت

همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، اگرچه تاب‌آوری یک بعد مهم است که در هر زنجیره تأمین در نظر گرفته شود. کاردوسو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۵)، به‌صراحت در طراحی استراتژیک و تاکتیکی پایین‌دستی زنجیره تأمین نفت موردتوجه قرار نگرفته است. به‌عبارت‌دیگر، برخی از مقالات با جنبه‌هایی مانند امنیت تأمین مقابله می‌کنند (یعنی اجتناب از اختلالات تأمین) که می‌تواند به‌طور غیرمستقیم به مسائل تاب‌آوری مرتبط باشد اما به جنبه‌هایی که به‌طور مستقیم با آن مرتبط هستند، مانند توانایی شبکه برای غلبه بر اختلالات مختلف و بازیابی از اثرات منفی آن مرتبط نیستند. برخی از مدل‌های برنامه‌نویسی ریاضی معمولاً از جریمه در تابع هدف به‌منظور جریمه‌ی نقص و عدم تأمین تقاضا استفاده می‌کنند، در نتیجه، اختلال تأمین را به حداقل می‌رسانند. باین‌حال، نیاز به طراحی و برنامه‌ریزی بخش پایین‌دستی زنجیره‌های تأمین نفت به‌عنوان یک پتانسیل بالا شناسایی شده است که در آن تاب‌آوری می‌تواند به مدل‌های بهینه‌سازی اضافه شود و در نتیجه آن

1. Lima et al.
2. Cardoso et al.

ظرفیت شبکه بهبود یابد تا با رویدادهایی غیرمنتظره‌ای که باعث ایجاد چندین اختلال در آن می‌شود، مقابله کند (لیما و همکاران، ۲۰۱۶).

### ۲-۳. نوآوری پژوهش حاضر

همان‌طور که در بخش شکاف تحقیقاتی تاب‌آوری زنجیره تأمین ارائه شد، تعداد بسیار محدودی از مقالات به ارائه شاخص مناسب برای سنجش تاب‌آوری زنجیره پرداخته‌اند؛ بنابراین در این پژوهش، شاخص مناسبی برای بررسی تاب‌آوری زنجیره در نظر گرفته می‌شود.

در مدل‌های ارائه‌شده در ارتباط با طراحی زنجیره تأمین تاب‌آور، تعداد محدودی از مدل‌ها هستند که اختلال در حمل‌ونقل را در نظر بگیرند. به جهت نمایش اختلال تحریم نفت که مانع فروش نفت خام و تحویل به مشتری می‌گردد، این اختلال در بخش حمل‌ونقل در نظر گرفته می‌شود.

همچنین در بخش شکاف تحقیقاتی زنجیره نفت، کمتر مقالاتی بحث اختلال و تاب‌آوری زنجیره نفت را مورد بررسی قرار داده‌اند، در نتیجه این مورد در مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌علاوه، این موضوع در بخش فرآورده‌های نفتی نیز کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش، طراحی شبکه زنجیره تأمین نفت با در نظر گرفتن ریسک‌های عملیاتی و اختلالی انجام می‌شود.

### ۳. روش تحقیق

در این پژوهش برای مدل‌سازی از برنامه‌ریزی دومرحله‌ای تصادفی استفاده شده است. در پارادایم استاندارد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای متغیرهای مسئله بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت به دو گروه تقسیم می‌شوند: متغیرهای مرحله اول که باید قبل از تحقق پارامترهای تصادفی در موردشان تصمیم گرفته شود. متغیرهای مرحله دوم به‌عنوان معیار اصلاحی (رجوع<sup>۱</sup>) در برابر هر جواب

---

1. Recourse

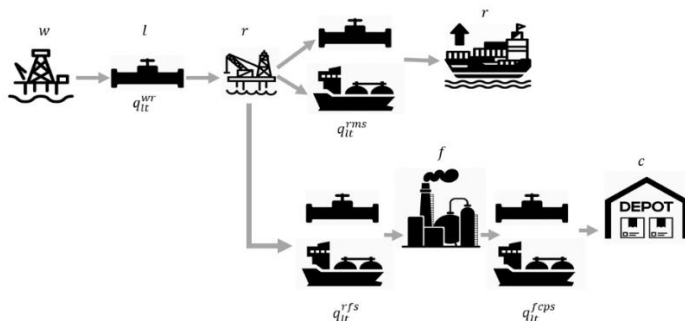
نشدنی (که به علت محقق شدن یک حالت خاصی از عدم اطمینان می تواند اتفاق بیفتد) عمل کند. همچنین مسئله مرحله دوم می تواند مسئله مربوطه به مرحله عملیاتی تصمیم باشد که در پی مسئله مرحله اول می آید. با توجه به عدم قطعیت، هزینه مرحله دوم یک متغیر تصادفی است، هدف، تعیین متغیرهای مرحله اول به قسمی است که مجموع هزینه های مرحله اول و ارزش انتظاری هزینه های مرحله دوم کمینه گردد (سهنیدیس<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴).

### ۳-۱. مدل ریاضی طراحی زنجیره تأمین

مدل زنجیره تأمین نفت (آزاده و همکاران، ۲۰۱۷) به عنوان مدل پایه در نظر گرفته شده است و با استفاده از مبانی مدل برنامه ریزی دو مرحله ای (سهنیدیس، ۲۰۰۴) توسعه داده شده است و روش حل آن ارائه شده است. نمادهای مدل در پیوست (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است مدل ارائه شده در این بخش غیرخطی است، بنابراین تمامی محدودیت هایی که عامل غیرخطی دارند، در پیوست (۳) خطی سازی می شوند. به جهت تأمین بنزین با اکتان بالا فرض شده واردات مواد اکتان افزا با اختلال مواجه است. به منظور کاهش آسیب پذیری، از استراتژی جایگزینی از اتانول زیستی با اکتان افزاها برای بالا بردن کیفیت بنزین و حفظ سودآوری زنجیره و پاسخگویی<sup>۲</sup> آن در برابر اختلال فروش نفت خام، توسعه پالایشگاه ها بررسی می گردد. شکل (۱) زنجیره مورد بررسی را نشان می دهد.

---

1. Sahinidis  
2. Responsibility



شکل ۱ زنجیره تأمین موردبررسی

### ۳-۱-۱. تابع هدف اول، ارزش خالص فعلی

تابع هدف، بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی مجموع جریان وجوه نقدی در تمام دوره‌های زمانی است که در معادله (۱) آمده است. کل جریان نقدی در هر دوره با اختلاف بین کسری از کل استهلاک سرمایه و درآمدهای خالص محاسبه می‌شود که در رابطه با ارزش استهلاک سرمایه در دوره گذشته است و توسط عبارت (۲) و (۳) نشان داده شده است. درآمد خالص در هر دوره با کم کردن هزینه متغیر از درآمدهای فروش با توجه به نرخ مالیات و استهلاک سرمایه سرمایه‌گذاری شده توسط معادله (۴) محاسبه می‌شود. درآمد فروش با فروش نفت خام به بازارهای صادراتی و فروش محصولات پالایشگاه به انبار در بازارهای داخلی و خارجی توسط معادله (۵) محاسبه می‌شود. استهلاک سرمایه سرمایه‌گذاری شده به روش مستقیم توسط معادله (۶) محاسبه می‌شود. کل سرمایه‌گذاری سرمایه ثابت با جمع هزینه سرمایه‌گذاری ثابت محاسبه می‌شود در معادله (۷) نشان داده شده است. کسری از سرمایه استهلاک کل به وسیله جمع کل سرمایه‌گذاری سرمایه ثابت محاسبه می‌شود و به صورت معادله (۸) نشان داده شده است. کل هزینه متغیر ناشی از هزینه حفاری مرتبط با چاه‌های بالقوه انتخاب‌شده، هزینه تکنولوژی و همچنین هزینه‌های انتقال مواد، هزینه خرید مواد اکتان افزا و هزینه استراتژی افزایش ظرفیت پالایشگاه‌ها، از معادله (۹) محاسبه می‌شوند. هزینه ثابت سرمایه‌گذاری در دوره  $t$  ناشی از هزینه احداث تکنولوژی‌ها و هزینه نصب خطوط لوله در معادله (۱۰) نشان داده شده است.



$$\max \quad NPV = \sum_t \frac{TCF_t}{(1+i)^{t-1}} \quad (1)$$

$$TCF_t = NE_t - FTDC_t \quad \forall t = 1, 2, 3, \dots, T-1 \quad (2)$$

$$TCF_t = NE_t - FTDC_t + (sv) \cdot TFCI \quad \forall t = T \quad (3)$$

$$NE_t = (1 - \alpha)(SRev_t - TVC_t) + \alpha Dep_t \quad \forall t \quad (4)$$

$$Srev_t = \sum_s prb_s \left( \sum_{f,r,l} p_i^{fs} q_{lt}^{fs} + \sum_{m,r,l} p_i^{ms} q_{lt}^{ms} + \sum_{p \in p_2, c, f, l} p_i^{pcs} q_{lt}^{fps} + \sum_{k, c, f, l} p_i^{pcs} q_{lt}^{fcs} \right) \quad \forall t \quad (5)$$

$$Dep_t = \frac{(1 - sv)TFCI}{T} \quad \forall t \quad (6)$$

$$TFCI = \sum_t \frac{FCI_t}{(1+i)^{t-1}} \quad (7)$$

$$FTDC_t = (TFCI) \left[ \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \right] \quad \forall t \quad (8)$$

$$\begin{aligned} TVC_t = & \sum_s prb_s \left( \sum_{w,g} \phi_t^w \cdot yw_t^{wg} + \sum_{w,g,r,l} v_t^{gw} q_{lt}^{wr} + \sum_{r,g,w,l,g''} v_t^{g'r} q_{lt}^{wr} + \sum_{r,g'',g'} c_t^{g'} \pi_t^{g''r} \cdot yr_t^{rg'g''} + \right. \\ & \sum_{p,f,g'',l,c} pc_t^{g''p} q_{lt}^{fps} + \sum_{w,r,l} \gamma_t^l \cdot \delta^{wr} q_{lt}^{wr} + \sum_{r,m,l} \gamma_t^l \cdot \delta^{ms} q_{lt}^{ms} + \sum_{r,f,l} \gamma_t^l \cdot \delta^{rf} q_{lt}^{fs} + \sum_{p,f,l,c} \gamma_t^l \cdot \delta^{fc} q_{lt}^{fps} + \\ & \left. \sum_f cs^{ft} x_f 2_t^{fs} \right) \quad \forall t \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} FCI_t = & \sum_{w,g} \beta_t^{wg} \cdot xw_t^{wg} + \sum_{rg'g''} \beta_t^{g'r} \cdot xr_t^{rg'g''} + \quad \forall t \\ & \sum_{r,g',g''} \beta_t^{g''r} \cdot xr_t^{rg'g''} + \sum_{f,g''} \beta_t^{g''f} \cdot xf_t^{fg''} + \sum_{w,r,l} \beta_{lt}^{wr} \cdot a_{lt}^{wr} + \quad (10) \\ & \sum_{m,r,l} \beta_{lt}^{ml} \cdot a_{lt}^{ml} + \sum_{f,r,l} \beta_{lt}^{rf} \cdot a_{lt}^{rf} + \sum_{f,c,l,p} \beta_{lt}^{fcp} \cdot a_{lt}^{fcp} \end{aligned}$$

### ۳-۱-۲. تابع هدف دوم مدل، بیشینه‌سازی تاب‌آوری

تابع هدف دوم، به جهت بررسی تاب‌آوری زنجیره در نظر گرفته شده است که در عبارت (۱۹) با استفاده از مدل (ظہیری، ۲۰۲۰) در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن معیاری برای تاب‌آوری

در مدل از این جهت اهمیت دارد که سطح تأثیر استراتژی‌های مختلف سنجیده می‌شود و کارا بودن استراتژی را می‌توان تشخیص داد. هنگامی که این تابع هدف کمینه شود، مقدار تاب‌آوری زنجیره پیشینه می‌گردد. معادلات (۱۱) تا (۱۵) برای تعریف تابع هدف دوم به محدودیت‌های مدل اضافه می‌گردند و معادلات (۱۶) تا (۱۸) در داخل تابع هدف وارد می‌شوند.

الف) بحرانی بودن گره: یک گره را بحرانی می‌نامند هرگاه مجموع مقدار جریان ورودی کل و جریان خروجی کل از آن گره بیشتر از یک حد خاصی باشد. (۱۱) تا (۱۵) به ترتیب برای بحرانی بودن گره‌های چاه، سکوها، تولیدی، پالایشگاه‌ها، پایانه‌های صادراتی و انبارها نوشته شده است.

$$(Uw^{wt} - \sum_{rl} q_{lt}^{wr}) \cdot (1 - a1_w) \geq \varepsilon \cdot (1 - a1_w) \quad \forall w.t \quad (11)$$

$$(Ur^{rt} - (\sum_{wi} q_{lt}^{wr} + \sum_{fl} q_{lt}^{rfs} + \sum_{mi} q_{lt}^{rms})) \cdot (1 - a2_r) \geq \varepsilon \cdot (1 - a2_r) \quad \forall r.t \quad (12)$$

$$(Ur^{rt} - (\sum_{rl} q_{lt}^{rfs} + \sum_{cpl} q_{lt}^{fcps} + \sum_{cokl} q_{lt}^{fcoks})) \cdot (1 - a3_f) \geq \varepsilon \cdot (1 - a3_f) \quad \forall f.t \quad (13)$$

$$(Um^{mt} - \sum_{rl} q_{lt}^{rms}) \cdot (1 - a4_m) \geq \varepsilon \cdot (1 - a4_m) \quad \forall m.t \quad (14)$$

$$(Uc^{ct} - (\sum_{fpl} q_{lt}^{fcps} + \sum_{fkol} q_{lt}^{fcoks})) \cdot (1 - a5_c) \geq \varepsilon \cdot (1 - a5_c) \quad \forall c.t \quad (15)$$

ب) پیچیدگی جریان: این شاخص تعاملات کلی بین گره‌ها را محاسبه می‌کند. جریان کل در یک شبکه پیچیده در نظر گرفته می‌شود هرگاه تعداد لینک‌های مرتبط بالا باشد. عبارت (۱۶) مجموع جریان‌های موجود در این مدل را محاسبه می‌کند.

$$\sum_{w.r.l.t} a_{lt}^{wr} + \sum_{r.f.l.t} a_{lt}^{rf} + \sum_{r.m.l.t} a_{lt}^{rm} + \sum_{f.c.p.l.t} a_{lt}^{fcp} \quad (16)$$

ج) پیچیدگی گره: همانند پیچیدگی جریان، در یک شبکه یک گره را پیچیده می‌نامند اگر مقدار کل گره‌های فعال بالا باشد. عبارت (۱۷) نیز مجموع تمام گره‌های مدل را محاسبه می‌کند.

$$\sum_{w.g.t} xw_t^{wg} + \sum_{r.g'.g''.t} xr_t^{rg'g''} + \sum_{f.g'''t} xf_t^{fg'''} + \sum_{m.t} xm_t^m + \sum_{c.t} xc_t^c \quad (17)$$

د) سطح عدم خدمت به مشتری: سطح عدم خدمت رسانی به مشتری به تعداد تقاضاهای تأمین نشده به ازای هر محصول، در هر ناحیه تقاضا و در هر زمان خاص گویند. معادله (۱۸) سطح عدم خدمت رسانی به مشتری را نشان می‌دهد که برابر نسبت تقاضاهای از دست رفته به کل تقاضای موجود است. از آنجا که این معادله غیرخطی است، با توجه به معادلات (۱۰۸) و (۱۰۹) که در پیوست (۳) ارائه شده است خطی سازی شده و به صورت  $\varphi$  در تابع هدف مسئله در نظر گرفته می‌شود.

$$\min \max \text{service}' = \sum_s \sum_t pr_s \cdot \frac{\sum_m bc1m \cdot z_t^{ms} + \sum_{p \in p_2} \sum_c bc2pc \cdot z_t^{pcs} + \sum_k \sum_o \sum_c bc3kc \cdot z_t^{kocs}}{\sum_m d_t^{ms} + \sum_{p \in p_2} \sum_c d_t^{pcs} + \sum_k \sum_c d_t^{kcs}} \quad (18)$$

بنابراین در مجموع، در تابع هدف دوم، مقدار بحرانی بودن گره، پیچیدگی گره و جریان و سطح عدم خدمت به مشتری با در نظر گرفتن ضرایبی که درجه اهمیت هر یک از این شاخص‌ها را نشان می‌دهد، در معادله (۱۹) در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} \min \text{Resilience}' = & \gamma_o \cdot \varphi + \sum_w ew \cdot a1_w + \sum_r er \cdot a2_r + \sum_f ef \cdot \\ & a3_f + \sum_m em \cdot a4_m + \sum_c ec \cdot a5_c + \sum_{w.r.l.t} d_1 \cdot a_{lt}^{wr} + \sum_{r.f.l.t} d_2 \cdot \\ & a_{lt}^{rf} + \sum_{r.m.l.t} d_3 \cdot a_{lt}^{rm} + \sum_{f.c.p.l.t} d_4 \cdot a_{lt}^{fcp} + \sum_{w.g.t} d_5 \cdot xw_t^{wg} + \\ & \sum_{r.g'.g''.t} d_6 \cdot xr_t^{rg'g''} + \sum_{f.g'''t} d_7 \cdot xf_t^{fg'''} + \sum_{m.t} d_8 \cdot xm_t^m + \\ & \sum_{c.t} d_8 \cdot xc_t^c \end{aligned} \quad (19)$$

### ۳-۱-۳. محدودیت‌های مدل توسعه یافته

محدودیت‌های مدل توسعه یافته نیز به سه بخش تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارت‌اند از:  
الف) محدودیت‌های تعادل: محدودیت (۲۰) بیان می‌کند که مقدار نفت خام منتقل شده از چاه‌ها به سکوها تولید باید بیش از نفت خام منتقل شده به بازارهای بین‌المللی و پالایشگاه‌ها باشد. همچنین، محدودیت (۲۱) بیان می‌کند که نفت خام منتقل شده از سکوها تولید به پالایشگاه‌ها باید بیش از جریان خروجی (نفت مورد نیاز برای تولید محصولات پالایشگاهی) تا انبار باشد.

$$\sum_f \sum_l q_{lt}^{rfs} + \sum_m \sum_l q_{lt}^{rms} \leq \sum_w \sum_l owr_t^w \cdot q_{lt}^{wr} \quad \forall r.t.s \quad (20)$$

$$\sum_c \sum_l ce_p \cdot q_{lt}^{cps} \leq \sum_r \sum_l q_{lt}^{rfs} \quad \forall p.t.f.s \quad (21)$$

ب) محدودیت‌های ظرفیت: محدودیت (۲۲) نشان‌دهنده محدودیت بودجه برای سرمایه‌گذاری در هزینه ثابت در هر دوره است. محدودیت‌ها (۲۳) تا (۲۶) نشان‌دهنده کران بالا و پایین برای ظرفیت مدهای حمل‌ونقل است. در محدودیت (۲۵)، اختلال حمل‌ونقل نفت خام با ضرب عبارت  $(1 - \theta_{st})$  در کران بالای ظرفیت آن، اعمال شده است، بنابراین میزان حمل نفت خام در این محدودیت در شرایط اختلال کمتر از حالت معمولی است. محدودیت (۲۷)، حد بالای ظرفیت چاه‌ها را بیان می‌کند. محدودیت‌های (۲۸) تا (۳۰) کران بالایی و کران پایینی ظرفیت تکنولوژی‌های مختلف را نشان می‌دهند. محدودیت (۳۱)، تقاضای نفت در بازارهای بین‌المللی را نشان می‌دهد که برابر مجموع نفت خام منتقل شده و تقاضای ازدست‌رفته می‌باشد. همچنین محدودیت شماره (۳۲)، تقاضای محصول برای انبار را نشان می‌دهد، که به صورت مشابه با محدودیت (۳۲) برابر مجموع فرآورده منتقل شده با تقاضای از دست رفته است. محدودیت (۳۳) تقاضای انواع بنزین، یعنی بنزین معمولی و بنزین سوپر را همانند معادلات (۳۲) و (۳۳) مورد بررسی قرار می‌دهد. محدودیت (۳۴) کران بالایی و کران پایینی برای ظرفیت تولید فرآورده‌های نفتی در پالایشگاه را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۵) کران بالای ظرفیت پالایشگاه برای پذیرش نفت خام را بیان می‌کند که استراتژی افزایش ظرفیت پالایشگاه‌ها به‌عنوان یکی از استراتژی‌های تاب‌آوری در این محدودیت لحاظ شده است. در این محدودیت با توجه به ضرب عامل  $(1 + a \cdot \gamma f 2_t^{fs})$ ، در صورتی که استراتژی افزایش ظرفیت پالایشگاه‌ها انتخاب شود، ظرفیت پالایشگاه به مقدار  $a$  برابر ظرفیت اولیه پالایشگاه به ظرفیت اولیه آن افزوده می‌شود. محدودیت (۳۶) حد بالایی ظرفیت سکوها برای تولید نفت خام برای پذیرش نفت خام را نشان می‌دهد. محدودیت (۳۷) مقدار بنزین اولیه (با درجه اکتانی پایین‌تر از درجه اکتان مورد نیاز برای تولید انواع بنزین معمولی و سوپر) را در هر نوع را محدود می‌کند. محدودیت (۳۸) مقدار

کل اکتان افزایشی مورد نیاز را محاسبه می‌کند. محدودیت (۳۹) مقدار ماده اکتان افزایشی مورد نیاز را با توجه به مقدار در دسترس و سناریو اختلال محدود می‌کند، همچنین در این محدودیت با توجه به پارامتر اختلال در نظر گرفته شده، مقدار مواد اکتان افزایشی وارداتی کاهش می‌یابد، اما در همین محدودیت در نظر گرفته شده که نوع دیگری اکتان افزا که همان بایواتانول می‌باشد موجود است که با توجه به تعریف پارامتر اختلال، مقدار کاهشی ندارد.

$$FCI_t \leq UTFCI \quad \forall t \quad (22)$$

$$LC_t^l \cdot a_{lt}^{wr} \leq q_{lt}^{wr} \leq UC_t^l \cdot a_{lt}^{wr} \quad \forall w.r.l.t \quad (23)$$

$$LC_t^l \cdot a_{lt}^{rf} \leq q_{lt}^{rf} \leq UC_t^l \cdot a_{lt}^{rf} \quad \forall r.f.l.t.s \quad (24)$$

$$LC_t^l \cdot a_{lt}^{rm} \leq q_{lt}^{rms} \leq UC_t^l \cdot a_{lt}^{rm} \cdot (1 - \theta_{st}) \quad \forall r.m.l.t.s \quad (25)$$

$$LC_t^l \cdot a_{lt}^{fcp} \leq q_{lt}^{fcp} \leq UC_t^l \cdot a_{lt}^{fcp} \quad \forall f.c.l.p.t. \quad (26)$$

$$\sum_r \sum_l q_{lt}^{wr} \leq UC_t^w \cdot yw_t^{wg} \quad \forall w.t.g \quad (27)$$

$$LC_t^g \cdot yw_t^{wg} \leq \sum_r \sum_l q_{lt}^{wr} \leq UC_t^g \cdot yw_t^{wg} \quad \forall w.g.t \quad (28)$$

$$LC_t^{g'} \cdot \sum_{g''} yr_t^{rg'g''} \leq \sum_f \sum_l q_{lt}^{rfs} + \sum_m \sum_l q_{lt}^{rms} \leq UC_t^{g'} \cdot \sum_{g''} yr_t^{rg'g''} \quad \forall r.t.g'.s \quad (29)$$

$$LC_t^{g''} \cdot \sum_{g'} yr_t^{rg'g''} \leq \epsilon^r (\sum_f \sum_l q_{lt}^{rfs} + \sum_m \sum_l q_{lt}^{rms}) \leq UC_t^{g''} \cdot \sum_{g'} yr_t^{rg'g''} \quad \forall r.t.g''.s \quad (30)$$

$$\sum_l \sum_r q_{lt}^{rms} + z_t^{ms} = d_t^{ms} \quad \forall m.s.t \quad (31)$$

$$\sum_l \sum_f q_{lt}^{fcp} + z_t^{pc} = d_t^{pc} \quad \forall p \quad (32)$$

$$\sum_l \sum_f \sum_o q_{lt}^{fcks} + z_t^{kcs} = d_t^{kcs} \quad \forall k.c.s.t \quad (33)$$

$$Lcap_{ft}^{g'''p} \cdot yf_t^{fg'''} \leq \sum_l \sum_c q_{lt}^{fcp} \leq Ucap_{ft}^{g'''p} \cdot yf_t^{fg'''} \quad \forall f.p.t.g''' \quad (34)$$

$$\sum_r \sum_l q_{lt}^{rfs} \leq UC_t^f \cdot \sum_{g'''} yf_t^{fg'''} \cdot (1 + a \cdot yf2_t^{fs}) \quad \forall f.t.s \quad (35)$$

$$\sum_w \sum_l q_{lt}^{wr} \leq UC_t^r \cdot \sum_{g'} \sum_{g''} yr_t^{rg'g''} \quad \forall r.t \quad (36)$$

$$\sum_l \sum_c \sum_k \sum_o b_{ko} \cdot q_{lt}^{fcoks} \leq \sum_c \sum_l q_{lt}^{fcps} \quad \forall f.s.t.p \quad (37)$$

$$\sum_l \sum_c \sum_k \sum_o c_{ko} \cdot q_{lt}^{fcoks} = octan_{st}^{fo} \quad \forall f.s.t \quad (38)$$

$$\sum_f octan_{st}^{fo} \leq aoctan^o \cdot \mu_t^{so} \quad \forall o.s.t \quad (39)$$

ج) محدودیت‌های منطقی: محدودیت‌های (۴۰) تا (۴۴) بیان می‌کنند که یک نهاد (احداث چاه، انتخاب سکوها، تولید، مکان پالایشگاه، پایانه صادراتی و انبارهای محصولات) زمانی شکل می‌گیرد که در زمان‌های قبل شکل نگرفته باشد. محدودیت‌ها (۴۵) تا (۴۸) نشان می‌دهند که هر کدام از نهادهای ذکر شده باید تنها در یک زمان شکل بگیرد. محدودیت (۴۹) تا (۵۵) بیان می‌کند که زمانی مواد (نفت خام و محصولات نفتی) بین نهادها منتقل می‌شوند که آن نهادها ایجاد شده باشند. محدودیت (۵۶) تا (۶۰) بیان می‌کند که زمانی مواد بین نهادها از طریق مدهای حمل و نقل انتقال می‌یابد که آن مدها بین نهادها ایجاد شده باشند.

$$yw_t^{wg} - yw_{t-1}^{wg} = xw_t^{wg} \quad \forall w.g.t \quad (40)$$

$$yr_t^{rg'g''} - yr_{t-1}^{rg'g''} = xr_t^{rg'g''} \quad \forall r.g'.g''.t \quad (41)$$

$$yf_t^{fg''' } - yf_{t-1}^{fg''' } = xf_t^{fg''' } \quad \forall f.t.g''' \quad (42)$$

$$ym_t^m - ym_{t-1}^m = xm_t^m \quad \forall m.t \quad (43)$$

$$yc_t^c - yc_{t-1}^c = xc_t^c \quad \forall c.t \quad (44)$$

$$\sum_g yw_t^{wg} \leq 1 \quad \forall w.t \quad (45)$$

$$\sum_{g'} yr_t^{rg'g''} \leq 1 \quad \forall r.g''.t \quad (46)$$

$$\sum_{g''} yr_t^{rg'g''} \leq 1 \quad \forall r.g'.t \quad (47)$$

$$\sum_{g'''} yf_t^{fg'''} \leq 1 \quad \forall f.t \quad (48)$$

$$a_{lt}^{wr} \leq \sum_g yw_t^{wg} \quad \forall w.r.l.t \quad (49)$$

$$a_{lt}^{wr} \leq \sum_{g'} \sum_{g''} yr_t^{rg'g''} \quad \forall w.r.l.t \quad (50)$$

$$a_{lt}^{rf} \leq \sum_{g'} \sum_{g''} yr_t^{rg'g''} \quad \forall r.f.l.t \quad (51)$$

$$a_{lt}^{rf} \leq \sum_{g'''} yf_t^{fg'''} \quad \forall r.f.l.t \quad (52)$$

$$a_{lt}^{fcp} \leq yc_t^c \quad \forall f.p.c.l.t \quad (53)$$

$$a_{lt}^{fcp} \leq \sum_{g'''} yf_t^{fg'''} \quad \forall p.c.f.l.t \quad (54)$$

$$a_{lt}^{rm} \leq \sum_{g'} \sum_{g''} yr_t^{rg'g''} \quad \forall r.m.l.t \quad (55)$$

$$a_{lt}^{rm} \leq ym_t^m \quad \forall r.m.l.t \quad (56)$$

$$a_{lt}^{wr} \leq p1_{lt}^{wr} \quad \forall w.r.l.t \quad (57)$$

$$a_{lt}^{rf} \leq p2_{lt}^{rf} \quad \forall r.f.l.t \quad (58)$$

$$a_{lt}^{rm} \leq p3_{lt}^{rm} \quad \forall r.m.l.t \quad (59)$$

$$a_{lt}^{fcp} \leq p4_{lt}^{fcp} \quad \forall f.c.p.l.t \quad (60)$$

## ۴. نتایج و تفسیر آن‌ها

### ۴-۱. روش حل

برای حل مسائل تصمیم‌گیری/ بهینه‌سازی دو/ چندهدفه<sup>۱</sup> (MODM) رویکردهای مختلفی ارائه شده‌اند در هر یک از روش‌های حل مسائل MODM، مجموعه جواب‌های کارا مورد بررسی

قراری می‌گیرند که در آن‌ها مقادیر تابع هدف نا مغلوب می‌گردند و روی جبهه پارتو سراسری قراری می‌گیرند. در این تحقیق، روش اسپیلون-محدودیت تکامل یافته به‌عنوان روش دقیق برای حل مسئله به کار گرفته می‌شود؛ که در پیوست (۴) به صورت کامل تشریح شده است.

#### ۴-۲. تشریح مطالعه موردی زنجیره تأمین نفت ایران

داده‌های مطالعه موردی این مقاله از پژوهش (آزاده و همکاران، ۲۰۱۷) که از داده‌های زنجیره تأمین نفت ایران استفاده شده است، استخراج شده‌اند.

در این شبکه، چاه‌های (۱) تا (۷) نقاط نامزد برای حفر چاه می‌باشند. چهار مکان نیز برای احداث سکوهای تولیدی در نزدیکی این مناطق در نظر گرفته شده است. چهار پایانه صادراتی (۱) تا (۴) نیز در نظر گرفته شده است که نفت خام به آنجا ارسال خواهد شد و سپس به کشورهای مربوطه حمل می‌شوند؛ و این پایانه‌های صادراتی مربوط به سنگاپور، مالزی، کشور هند و بخش دیگری از کشور هند است. پالایشگاه (۱) پالایشگاه تأسیس شده در بندرعباس و دونقطه کاندید دیگر مربوط به پالایشگاه هرمز و ستاره خلیج فارس است. برای نگهداری محصولات تولیدشده در این پالایشگاه‌ها، چهار مکان کاندید در نظر گرفته شده است. مشتقات نفتی استحصال شده از پالایشگاه‌ها به ترتیب بنزین، نفت گاز، نفت کوره و نفت سفید هستند. عدد اکتان بنزین پایه پالایشگاه ۸۴/۳ است که این مقدار به جهت استفاده در وسایل نقلیه مناسب نیست ("ماهنامه زیست فناوری ایران"، ۱۳۹۷). در جدول (۱) درصد حجمی اکتان افزای مورد استفاده برای رسیدن به عدد اکتان مطلوب، ارائه شده‌اند.



جدول ۱. درصد حجمی اکتان افزا (مأخذ: ماهنامه زیست فناوری ایران، ۱۳۹۷)

عدد اکتان	بنزین پایه	نوع اکتان افزا	درصد حجمی	اکتان حاصله	میزان افزایش عدد اکتان
			۳	۸۵/۹	۱/۶
	۸۴/۳	متیل ترشیو بوتیل اتر	۵	۸۶/۳	۲
			۱۰	۸۸/۴	۳/۹
			۱۵	۹۰/۲	۵/۹
			۵	۸۷/۲	۲/۹
		بایواتانول	۱۰	۹۰	۵/۷

مأخذ: نتایج تحقیق

در اینجا نرخ مالیات ( $\alpha$ )، حداقل نرخ جذب کننده (i) و ارزش استهلاکی (sv) به ترتیب ۱۴٪، ۸٪ و ۲۵٪ به صورت ثابت برای دوره‌های زمانی مختلف در نظر گرفته شده‌اند (آزاده و همکاران، ۲۰۱۷) در جدول (۲) اطلاعاتی در خصوص ظرفیت، نسبت آب به نفت و هزینه احداث چاه‌ها ارائه می‌گردد (آزاده و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۲. اطلاعات مربوط به چاه‌های نفت

چاه نفت	ظرفیت (میلیون بشکه در سال)	نسبت آب به نفت	هزینه استخراج (میلیون دلار)
W1	۴/۷۳۱	۰/۸۰۵	۰
W2	۴/۷۱۵	۰/۹۲۴	۰
W3	۴/۴۵۷	۰/۸۰۵	۱۳/۴۵
W4	۴/۹۰۷	۰/۸۳۹	۱۲/۸۹
W5	۴/۶۲۷	۰/۸۳۶	۱۳/۲۱
W6	۴/۹۰۸	۰/۸۹۵	۱۳/۳۴
W7	۴/۹۰۴	۰/۸۹۷	۱۳/۸۷
نرخ افزایش سالانه	-۳٪	-۲٪	٪۳

مأخذ: نتایج تحقیق

جدول ۳ اطلاعات مربوط به ظرفیت و هزینه سرمایه‌گذاری تکنولوژی‌ها را بیان می‌کند.

جدول ۳. اطلاعات مربوط به تکنولوژی‌ها (مأخذ: (آزاده و همکاران، ۲۰۱۷))

تکنولوژی	ظرفیت		سرمایه لازم (میلیون دلار)
	حد بالا	حد پایین	
استخراج نفت (افقی، عمودی، مورب)			
G1	۵/۹	۱/۸	۲/۶
G2	۵/۱	۱/۶	۵/۲
G3	۲/۱	۰/۶	۱۵
تولید نفت (انواع روش‌های نمک‌زدایی)			
G'1	۱۱/۱	۴/۳	۷/۷
G'2	۷/۸	۳/۲	۱۲/۸
G'3	۴/۵	۱/۶	۲۳
تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی (روزمینی، شناور و زیرزمینی)			
G''1	۱/۵۳	۰/۶	۱/۵
G''2	۱/۳	۰/۵	۲/۶
G''3	۰/۹	۰/۴	۵/۸
تکنولوژی تولید پالایشگاهی (کراکینگ و کوکینگ)			
G'''1	۱۹/۸	۱۰/۴	۲۵
G'''2	۱۸/۷	۹/۸	۱۹
نرخ افزایش سالانه	-۲٪	-۲٪	۳٪

مأخذ: نتایج تحقیق

بر اساس گزارش ملی سازمان بین‌المللی انرژی، ضریب مصرف هر یک از محصولات از نفت

خام به شرح زیر است:

جدول ۳. ضریب مصرف محصولات نفتی (مأخذ: (آزاده و همکاران، ۲۰۱۷))

محصول	P1	P2	P3	P4
ضریب مصرف	۱/۰۶۵	۱/۲	۱/۰۶۵	۱/۲

مأخذ: نتایج تحقیق

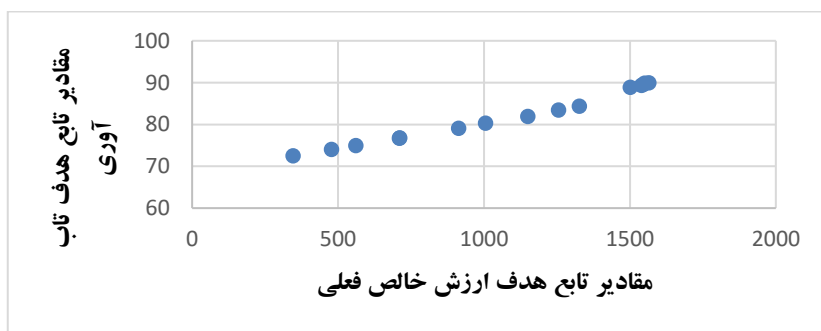
سایر داده‌هایی که در مدل به کار رفته‌اند، به صورت عدد تصادفی تولید شده‌اند.

## ۵. نتایج حل عددی

به علت وجود توابع هدف متعارض و چندگانه، با استفاده از روش حل اپسیلون محدودیت تکامل یافته در نرم افزار گمز کد نویسی و حل شده است. در ادامه به بررسی نتایج مدل پرداخته می شود.

### ۵-۱. تابع هدف

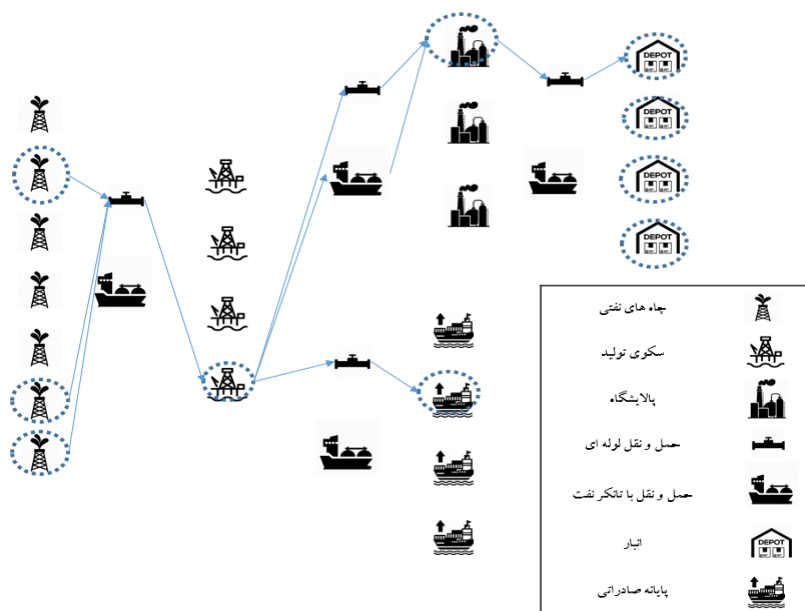
همان طور که اشاره شد از روش اپسیلون-محدودیت تکامل یافته برای حل این مسئله استفاده شده است. در شکل (۲) مقدار ارزش انتظاری ارزش خالص فعلی و آسیب پذیری آورده و مرز پارتو این مسئله برای ۲۰ بار تکرار حل مسئله رسم شده است. همان طور که در نمودار نیز مشخص است، با افزایش مقدار آسیب پذیری (کاهش تاب آوری)، مقدار ارزش خالص فعلی افزایش می یابد.



شکل ۲ نمودار پارتو (مأخذ: یافته‌های پژوهش)

### ۵-۲. مقادیر متغیرهای تصمیم

به منظور گزارش متغیرهای تصمیم مدل، یکی از نقاط مرز پارتو انتخاب شده و با توجه به آن تابع هدف دوم به محدودیت‌ها اضافه شد. سپس مدل با پارامترهای ذکر شده حل شده و مقادیر متغیرهای صفر و یک به صورت شکل (۳) گزارش می شود. لازم به ذکر است به دلیل بالا بودن تعداد متغیرهای تصمیم، نتیجه متغیرهای صفر و یک ارائه شده است. همه متغیرهای صفر و یک در دوره اول یک می شوند، اما چاه نفتی هفتم از دوره سوم به بعد در شبکه فعال می شود. شماره شکل‌ها از بالا به پایین و به صورت صعودی در نظر گرفته شده است.



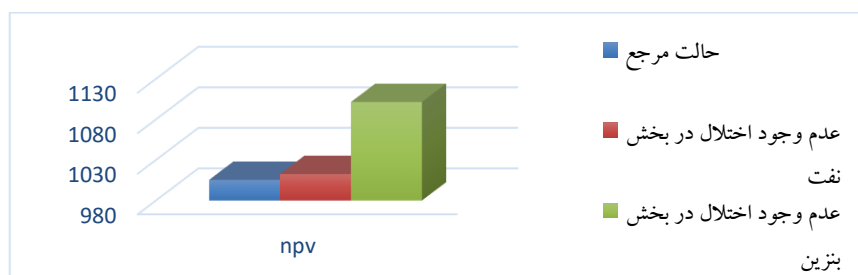
شکل ۳. متغیرهای صفر و یک در مدل

### ۳-۵. تحلیل حساسیت

به جهت انجام تحلیل حساسیت، یکی از نقاط مرز پارتو انتخاب شده و با توجه به آن تابع هدف دوم به محدودیت‌ها اضافه شده و اثر اختلال‌های موجود و اثر استراتژی‌های ارائه شده بررسی شده است.

#### ۳-۵-۱. تحلیل حساسیت بر روی تأثیر اختلال

بدین منظور ابتدا مدل بدون در نظر گرفتن اختلال حل می‌شود. لذا پارامتر مربوط به اختلال جزئی به مدل اضافه و حذف شده و تابع هدف در شکل (۴) نمایش داده شده است. در حالت نبودن اختلال در بخش نفت خام، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. علت این است که وقتی اختلال در این بخش وجود نداشته باشد، مقدار فروش نفت می‌تواند به تقاضای نفت نزدیک شود. با توجه به اینکه حال نفت خام بیشتری می‌تواند به فروش برسد، بنابراین مقدار ارزش خالص فعلی افزایش می‌یابد.

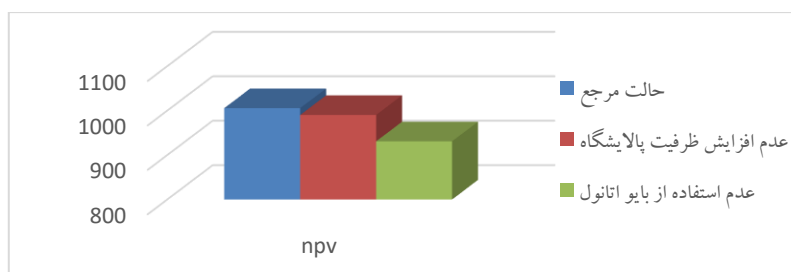


شکل ۴. نمودار تحلیل حساسیت اثر اختلال بر ارزش خالص فعلی (مأخذ: یافته‌های پژوهش)

در حالت نبود اختلال در بخش اکتان افزایش‌های معمولی بنزین، به دلیل اینکه مقدار این اکتان‌افزاه‌ها در زنجیره به اندازه کافی وجود دارد، بنابراین مقدار فروش انواع بنزین‌ها افزایش یافته و در نهایت منجر افزایش مقدار تابع هدف می‌شوند. همچنین از این نمودار این نتیجه برداشت می‌شود که اختلال در بخش‌های میان دستی زنجیره نفت، نسبت به اختلال تحریم نفت، اثر بیشتری بر توابع اقتصادی دارد.

### ۲-۳-۵. تحلیل حساسیت بر روی اثر استراتژی‌ها

در این قسمت مدل با در نظر گرفتن اختلالات بدون استراتژی تاب‌آوری حل می‌شود و سپس مدل با در نظر گرفتن اختلال‌های موجود ولی با در نظر گرفتن استراتژی تاب‌آوری و افزودن محدودیت‌های مربوطه حل می‌گردد. در شکل (۵) تأثیر استراتژی تاب‌آوری بر روی هزینه‌ها در حالت در نظر گرفتن اختلال قابل مشاهده است. افزودن استراتژی‌های مربوط به تاب‌آوری تأثیر به‌سزایی در افزایش تابع هدف دارد، هرچند که بابت ارائه این استراتژی‌ها زنجیره متحمل هزینه باشد، اما چون اثر بسزایی بر روی فروش دارد، بنابراین با استفاده از آن‌ها مقادیر تابع هدف اقتصادی افزایش می‌یابد.



شکل ۵. نمودار اثر استراتژی‌ها بر تابع هدف ارزش خالص فعلی (مأخذ: یافته‌های پژوهش)

## ۶. جمع‌بندی

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین نفت ارائه گردید که با توجه به ریسک‌های عملیاتی و اختلالی موجود، جنبه تاب‌آوری و جنبه‌های اقتصادی توسعه‌ی سطوح بالادستی و میان‌دستی صنعت نفت را در نظر گرفته و موجب بهبود شاخص‌های مربوط به هر یک از آن‌ها شود. در مدل با اعمال دو استراتژی در ساختار مدل تلاش شد تا با اختلال‌های موجود در مدل مقابله شود. از آنجایی که مدل ارائه‌شده نوعی مدل چندهدفه است، لذا از روش اسپیلون محدودیت تکامل‌یافته استفاده شد و با به‌کارگیری اطلاعات به‌دست آمده از صنعت نفت ایران و با استفاده از نرم‌افزار گمز، مدل حل‌شده و تحلیل حساسیت مدل ارائه شد. مهم‌ترین نتیجه این پژوهش آن است که توسعه پالایشگاه و صنایع پایین‌دستی زنجیره نفت، باعث کاهش آسیب‌پذیری زنجیره تأمین نفت نسبت به اختلال انتقال نفت به پایانه‌های صادراتی می‌شود. همچنین جایگزینی بایواتانول با سایر اکتان افزایش‌دهنده بنزین که واردات آن‌ها با اختلال مواجه است، باعث بهبود تاب‌آوری می‌گردد. از جمله راهکارهایی که با توجه به مدل می‌توان استخراج نمود، استفاده حداکثری از ظرفیت پالایشگاه، افزایش ظرفیت تولید پالایشگاه‌ها و مشتقات نفتی و همچنین تولید محصولات مختلف نفتی است. با بالا رفتن ظرفیت تولید محصولات نفتی، در صورت مواجهه با اختلال انتقال حمل‌ونقل نفت، سودآوری و تاب‌آوری زنجیره حفظ می‌گردد. با توجه به ویژگی جایگزینی بایواتانول، از این ماده به جهت افزایش کیفیت بنزین استفاده شود. همچنین این محصول

در داخل کشور تولید می‌شود و مشکلات مربوط به اختلال سایر اکتان افزایش وارداتی را ندارد، هم باعث سودآوری و هم باعث افزایش تاب‌آوری زنجیره می‌گردد. زمینه‌های تحقیق بالقوه به‌عنوان مسیرهایی جهت تحقیقات آینده عبارت‌اند از: ۱) استفاده از مدل‌های GIS و روش‌های سلسله مراتبی برای وزن دهی لایه‌های جغرافیایی به‌منظور شناسایی مکان‌های کاندید به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری در انتخاب مکان‌های کاندید. ۲) اضافه نمودن بخش پایین‌دست زنجیره تأمین نفت به مدل (پتروشیمی) به جهت تطابق بیشتر مدل با واقعیت ۳) استفاده از بهینه‌سازی استوار، به دلیل نامشخص بودن توزیع داده‌های غیرقطعی ۴) اضافه نمودن مفهوم پایداری به مدل ۵) لحاظ نمودن استراتژی‌هایی نظیر مدیریت تقاضا برای مقابله با اختلالات.

## منابع

قمی اویلی، م.؛ جلالی نائینی، س.؛ توکلی مقدم، ر و آ. جبارزاده (۱۳۹۸). طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط اختلال و عدم قطعیت با در نظر گرفتن کیفیت و استراتژی تاب‌آوری. نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت کیفیت، ۶(۲)، صص ۱۳۳-۱۴۵.

**Aghaei J., Amjady N. & H.A. Shayanfar** (2011). "Multi-objective Electricity Market Clearing Considering Dynamic Security by Lexicographic Optimization and Augmented Epsilon Constraint Method". *Applied Soft Computing*, 11(4), pp. 3846–3858.

**Azadeh A., Shafiee F., Yazdanparast R., Heydari J. & A. Keshvarparast** (2017). "Optimum Integrated Design of Crude Oil Supply Chain by a Unique Mixed Integer Nonlinear Programming Model". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(19), pp. 5734–5746.

**Beheshtian A., Donaghy K.P., Geddes, R. R., & Rouhani, O. M.** (2017). "International Journal of Disaster Risk Reduction Planning Resilient Motor-fuel Supply Chain". *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24(June), 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.06.021>

**Behzadi G., Justin M., Sullivan O., Lennon T., Scrimgeour F. & A. Zhang** (2017). International Journal of Production Economics Robust and resilient strategies for managing supply disruptions in an agribusiness supply chain. *International Journal of Production Economics*, 191(July 2016), 207–220.

**Beiranvand H., Ghazanfari M., Sahebi H. & M.S. Pishvae** (2018). Regular a Rrticle a Robust Crude Oil Supply Chain Design under Uncertain Demand and Market Price : A case study, No. 66.

- Cardoso S. R., Barbosa-póvoa A.P., Relvas S. & A.Q. Novais** (2015). "Resilience Metrics in the Assessment of Complex Supply-chains Performance Operating under Demand Uncertainty". *Omega*, No. 56, pp. 53–73. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.03.008>
- Chen L., Miller-hooks E., Chen L. & E. Miller-hooks** (2012). Resilience : An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport Resilience : An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport, (June 2014).
- Dehghani E., Jabalameli M.S., Jabbarzadeh A. & M.S. Pishvae** (2018). Resilient Solar Photovoltaic Supply chain network design under business-as-usual and hazard uncertainties. *Computers and Chemical Engineering*, 111, 288–310. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.01.013>
- Ehrgott, M.** (2005). *Multicriteria optimization* (Vol. 491). Springer Science & Business Media.
- Fattahi M., Govindan K. & E. Keyvanshokoo** (2017). Responsive and Resilient Supply Chain Network Design under Operational and Disruption Risks with Delivery Lead-time Sensitive Customers. *Transportation Research Part E*, 101, pp.176–200. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.02.004>
- Fernandes L.J., Relvas S., Alem D. & A.P. Barbosa-Póvoa** (2016). "Robust Optimization for Petroleum Supply Chain Collaborative Design and Planning. In Computer Aided Chemical Engineering", *Elsevier*, Vol. 38, pp. 1569–1574).
- Gong J. & F. You** (2018). Resilient Design and Operations of Process Systems: Nonlinear Adaptive Robust Optimization Model and Algorithm for Resilience Analysis and Enhancement. *Computers and Chemical Engineering*, No. 116, pp.231–252. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.11.002>
- Jabbarzadeh A., Fahimnia B. & S. Rastegar** (2017). Green and Resilient Design of Electricity Supply Chain Networks : A Multiobjective Robust Optimization Approach, pp. 1–21.
- Jabbarzadeh A., Fahimnia B. & F. Sabouhi** (2018). Resilient and Sustainable Supply Chain Design: Sustainability Analysis under Disruption Risks. *International Journal of Production Research*, 7543(May), pp.1–24. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1461950>
- Jabbarzadeh A., Fahimnia B. & J. Sheu** (2016). Designing a Supply Chain Resilient to Major Disruptions and Supply / Demand Interruptions. *Transportation Research Part B*, 94, pp. 121–149. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.09.004>
- Jabbarzadeh A., Pishvae M. & A. Papi** (2016). A Multi-period Fuzzy Mathematical Programming Model for Crude oil Supply Chain Network Design Considering Budget and Equipment Limitations. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 9 (special issue on supply chain), pp. 88–107.
- Lima C., Relvas S. & A. Barbosa-póvoa** (2017). Stochastic Programming approach for the optimal tactical planning of the downstream oil supply chain. *Computers and Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.09.012>
- Lima C., Relvas S. & A.P.F.D. Barbosa-Póvoa** (2016). Downstream Oil Supply Chain Management: A Critical Review and Future Directions. *Computers & Chemical Engineering*, No. 92, pp. 78–92.



- Lima C., Relvas S., Paula A. & P. Barbosa** (2017). Stochastic Mode Ling Approach for Downstream Oil Supply Chain. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50225-7>
- Liu S., Alhasan I. & L.G. Papageorgiou** (2016). A Mixed Integer Linear Programming Model for the Optimal Operation of a Network of Gas Oil Separation Plants. *Chemical Engineering Research and Design*, No. 111, pp. 147–160.
- Mavrotas G.** (2009). Effective Implementation of the E-constraint Method in Multi-objective Mathematical Programming Problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), pp. 455–465.
- Öztürkoğlu Ö. & O. Lawal** (2016). "The Integrated Network Model of Pipeline, sea and Road Distribution of Petroleum Product". *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 6(2), pp. 151–165.
- Sahinidis N.V.** (2004). "Optimization under Uncertainty: State-of-the-art and Opportunities". *Computers & Chemical Engineering*, 28(6–7), pp. 971–983.
- Shah N.K., Li Z. & M.G. Ierapetritou** (2011). "Petroleum Refining Operations: Key Issues, Advances and Opportunities". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(3), 1161–1170. <https://doi.org/10.1021/ie1010004>
- Tukamuhabwa B.R., Stevenson M., Busby J. & M. Zorzini** (2015). "Supply Chain Resilience: Definition, Review and Theoretical Foundations for Further Study". *International Journal of Production Research*, 53(18), pp. 5592–5623.
- Zahiri B., Zhuang J. & M. Mohammadi** (2020). "Toward an Integrated Sustainable-resilient Supply Chain: A pharmaceutical case study". *Transportation Research Part E*, 103(2017), pp. 109–142. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.04.009>

## پیوست ۱. جداول مرور ادبیات

جدول ۴: خلاصه‌ای از مرور ادبیات در بخش زنجیره تأمین تاب آور

شماره ردیف	ریسک‌ها			پارامترهای غیرقطعی				قسمت مختل شده	سطوح زنجیره	بهینه‌سازی			تابع هدف				نام نویسندگان و سال			
	اختلال			عملیات	مالی	تأمین	تقاضا			هزینه	قطعی	غیرقطعی			سایر	ماکزیمم پایداری		مربوط به تاب‌آوری	ماکزیمم سود	مینیمم هزینه
	سایر/ذکر نشده	حوادث انسانی	فجایع طبیعی									فازی	استوار	تصادفی						
*			*					DC	S-DC-D			*			*			بهشتیان و همکاران، ۲۰۱۷		
	*							S	S-D			*			*			بهرزادی و همکاران، ۲۰۱۷		
			*	*		*		W	M-W-D			*			*			فتاحی و همکاران، ۲۰۱۷		
*	*							SYSTEM	SYSTEM			*			*		*	گانگ و یو، ۲۰۱۸		
*	*	*	*	*		*	*	M-TR-DC	M-TR-DC			*		*	*	*		جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۷		
			*	*		*		M	S-M-T-D			*			*			دهقانی و همکاران، ۲۰۱۸		
		*	*	*			*	S	S-M-CC-D-W			*			*			قمی و همکاران، ۱۳۹۸		
	*							S-M	S-M-D			*		*	*			جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۸		
*	*	*	*	*		*	*	M	M-DC-D					*	*		*	ظهیری و همکاران، ۲۰۲۰		
*		*		*	*	*	*	S-T	S-M-T-D			*		*	*			این پژوهش		

مأخذ: نتایج تحقیق

### فهرست علائم در جدول ۵

مشتری: D	S:	تأمین کننده: URS	MZ:	مناطق	TL:	لینک
حمل و نقل: T	تأمین کننده	غیر قابل اطمینان	بازاری		حمل و نقل	
SYSTEM:	M:	تأمین کننده: RS	DC:		انبار: W	
سیستم	تولید کننده	قابل اطمینان	توزیع کننده		سایر: OSC	
		مناطق جمع آوری: CC				

جدول ۵: خلاصه‌ای از مرور ادبیات زنجیره تأمین نفت

نویسندگان و سال انتشار	برنامه‌ریزی	نوع اهداف	نوع قطعیت	عدم قطعیت در پارامترها
	مدل‌ها			
(جبارزاده، پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۶)	*	*	*	*
(لیو و همکاران، ۲۰۱۶)	*	*	*	*
(اوزتورکوگلو و لاوال، ۲۰۱۶)	*	*	*	*
(آزاده و همکاران، ۲۰۱۷)	*	*	*	*
(لیما و همکاران، ۲۰۱۷)	*	*	*	*
(بیرانوند و همکاران، ۲۰۱۸)	*	*	*	*
این پژوهش	*	*	*	*

مأخذ: نتایج تحقیق

## پیوست ۲. معرفی نمادها، پارامترها و متغیرهای تصمیم

در این قسمت به شرح مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل توسعه یافته پرداخته می‌شود.  
مجموعه‌های مدل توسعه یافته

مجموعه نقاط بالقوه احداث چاه	$W$
مجموعه نقاط پتانسیل احداث سکو تولید	$R$
مجموعه نقاط پتانسیل احداث پالایشگاه	$F$
مجموعه نقاط بازارهای صادراتی	$M$
مجموعه نقاط انبارها	$C$
مجموعه دوره‌های زمانی	$T$
مجموعه مدهای حمل و نقل	$L$
مجموعه‌ی فرآورده‌های پالایشگاهی $P_1 \cup P_2 = P$	$P$
مجموعه نشانگر بنزین	$P_1$
مجموعه سایر مشتقات نفتی	$P_2$
مجموعه‌ی نوع بنزین	$K$
مجموعه تکنولوژی‌های استخراج نفت	$G$
مجموعه تکنولوژی‌های تولید نفت در چاه‌ها	$G'$
مجموعه تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی در سکوها تولید	$G''$
مجموعه تکنولوژی‌های تولید در پالایشگاه‌ها	$G'''$
مجموعه انواع اکتان افزاها	$O$
مجموعه سناریوها	$S$
پارامترهای مدل توسعه یافته	
هزینه کل سرمایه‌گذاری ثابت	$TFCI$
نرخ جذاب سرمایه‌گذاری	$i$
نرخ استهلاک	$sv$
نرخ مالیات	$\alpha$

$d_1$ تا $d_9$	ضرایب جریمه‌ای نودها و گره‌ها
$ew$	ضریب جریمه بحرانی شدن گره‌های مربوط به چاه‌ها
$er$	ضریب جریمه بحرانی شدن گره‌های مربوط به سکوها تولید
$em$	ضریب جریمه بحرانی شدن گره‌های مربوط به پایانه‌های صادراتی
$ef$	ضریب جریمه بحرانی شدن گره‌های مربوط به پالایشگاه‌ها
$ec$	ضریب جریمه بحرانی شدن گره‌های مربوط به انبارها
$\gamma_0$	مقدار وزن مجموع تقاضاهای ازدست‌رفته
$p_t^{fs}$	قیمت فروش هر واحد نفت خام به پالایشگاه $f$ در زمان $t$ تحت سناریو $s$
$p_t^{ms}$	قیمت فروش هر واحد نفت خام به بازار صادراتی $m$ در زمان $t$ تحت سناریو $s$
$p_t^{pcs}$	قیمت فروش هر واحد محصول $p$ به انبار $c$ در زمان $t$ تحت سناریو $s$
$\phi_t^w$	هزینه عملیاتی احداث در چاه $w$ در زمان $t$
$v_t^{gw}$	هزینه عملیاتی تکنولوژی استخراج $g$ در چاه $w$ در زمان $t$
$v_t^{g'r}$	هزینه عملیاتی تکنولوژی تولید $g'$ در سکو تولید $r$ در زمان $t$
$\pi_t^{g''r}$	هزینه عملیاتی تکنولوژی ذخیره‌سازی $g''$ در سکو تولید $r$ در زمان $t$
$pc_t^{g'''p}$	هزینه عملیاتی تکنولوژی تولید $g'''$ برای محصول $p$ در زمان $t$
$\delta^{wr}$	فاصله بین چاه $w$ و سکو تولید $r$
$\delta^{rm}$	فاصله بین سکو تولید $r$ و پایانه صادراتی $m$
$\delta^{rf}$	فاصله بین سکو تولید $r$ و پالایشگاه $f$
$\delta^{fc}$	فاصله بین پالایشگاه $f$ و انبار $c$
$\gamma_t^l$	هزینه عملیاتی مد حمل و نقل $l$ به ازای هر واحد از سیال در زمان $t$
$\beta_t^{gw}$	هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای تکنولوژی استخراج $g$ در چاه $w$ در زمان $t$
$\beta_t^{g'r}$	هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای تکنولوژی تولید $g'$ در سکو تولید $r$ در زمان $t$
$\beta_t^{g''r}$	هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای تکنولوژی ذخیره‌سازی $g''$ در سکو تولید $r$ در زمان $t$
$\beta_t^{g'''f}$	هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای تکنولوژی تولید $g'''$ در پالایشگاه $f$ در زمان $t$
$\beta_{lt}^{wr}$	هزینه ثابت سرمایه‌گذاری مد حمل و نقل $l$ بین چاه $w$ و سکو تولید $r$ در زمان $t$

هزینه ثابت سرمایه‌گذاری مد حمل‌ونقل I بین سکو تولید r و پایانه صادراتی m در زمان t	$\beta_{lt}^{rm}$
هزینه ثابت سرمایه‌گذاری مد حمل‌ونقل I بین سکو تولید r و پالایشگاه f در زمان t	$\beta_{lt}^{rf}$
هزینه ثابت سرمایه‌گذاری مد حمل‌ونقل I بین پالایشگاه f و انبار c برای محصول c در زمان t	$\beta_{lt}^{fcp}$
$\varepsilon^r$	درصد نفت تولیدشده در سکو تولید r
$ce_p$	نسبت مصرف نفت برای تولید محصول p
$owr_t^w$	درصد نفت به آب در زمان t
$UC_t^w$	بیشینه مقدار نفت استخراجی در چاه w در زمان t
$LC_t^{wg}$	کمترین مقدار نفت استخراج‌شده توسط تکنولوژی استخراج g در زمان t
$UC_t^{wg}$	بیشترین مقدار نفت استخراج‌شده توسط تکنولوژی استخراج g در زمان t
$LC_t^{wg'}$	کمترین مقدار نفت تولیدشده در چاه w توسط تکنولوژی تولید g' در زمان t
$UC_t^{wg'}$	بیشترین مقدار نفت تولیدشده در چاه w توسط تکنولوژی تولید g' در زمان t
$UC_t^{rg''}$	بیشترین مقدار نفت خام ذخیره‌شده توسط تکنولوژی "g در سکوی تولید r در زمان t
$d_t^{ms}$	تقاضای نفت خام در پایانه‌های صادراتی m در زمان t تحت سناریو s
$d_t^{kcs}$	تقاضای بنزین نوع k در انبار c تحت سناریو s در زمان t
$d_t^{pcs}$	تقاضای محصول p در انبار c تحت سناریو s در زمان t
$Lcap_{ft}^{g''''}$	کمترین مقدار تولید محصول p توسط تکنولوژی "g در پالایشگاه f در زمان t
$Ucap_{ft}^{g''''}$	بیشترین مقدار تولید محصول p توسط تکنولوژی "g در پالایشگاه f در زمان t
$UC_t^l$	بیشترین مقدار سیال حمل‌شده توسط مد حمل‌ونقل l در دوره t
$lC_t^l$	کمترین مقدار سیال حمل‌شده توسط مد حمل‌ونقل l در دوره t
$UC_t^f$	بیشترین مقدار سیال حمل‌شده به پالایشگاه f در دوره t
$UC_t^r$	بیشترین مقدار نفت حمل‌شده از سکو تولید r در دوره t
$p1_{lt}^{wr}$	ماتریس احتمالی حمل‌ونقل برای مد حمل‌ونقل I بین چاه w و سکوی تولید r در دوره t
$p2_{lt}^{rf}$	ماتریس احتمالی حمل‌ونقل برای مد حمل‌ونقل I بین سکوی تولید r و پالایشگاه f در دوره t

ماتریس احتمالی حمل و نقل برای مد حمل و نقل $l$ بین سکوی تولید $r$ و پایانه صادراتی $m$ در دوره $t$	$p3_{lt}^{rm}$
ماتریس احتمالی حمل و نقل برای محصول $p$ و مد حمل و نقل $l$ بین پالایشگاه $f$ و انبار $c$ در دوره $t$	$p4_{lt}^{fcp}$
مقدار بنزین خام مورد نیاز برای تولید هر لیتر بنزین نوع $k$ که به وسیله اکتان افزای نوع $o$ به کیفیت مورد نظر رسیده‌اند.	$b_{ko}$
مقدار ماده اکتان افزا نوع $o$ برای تولید هر لیتر بنزین نوع $k$	$c_{ko}$
قیمت اکتان افزای $o$	$prl_o$
هزینه تقاضای ازدست رفته پایانه صادراتی $m$	$bc1^m$
هزینه تقاضای ازدست رفته محصول $p$ در انبار $c$	$bc2^{pc}$
هزینه تقاضای ازدست رفته بنزین نوع $k$ در انبار $c$	$bc3^{kc}$
پارامتر سناریو $s$ . مقداری بین صفر و یک برای در دسترس قرار داشتن و یا نداشتن اکتان افزای نوع $o$ در زمان $t$	$\mu_{st}^o$
پارامتر سناریو اختلال حمل و نقل نفت خام به پایانه‌های صادراتی در سناریو $s$ در زمان $t$ . مقداری بین صفر و یک.	$\theta_{st}$
احتمال سناریو $s$	$prb_s$
مقدار اکتان افزای در دسترس از نوع $o$	$octan_o$
حد آستانه جریان برای چاه $w$ در زمان $t$	$uw^{wt}$
حد آستانه جریان برای سکوی تولید $r$ در زمان $t$	$ur^{rt}$
حد آستانه جریان برای پالایشگاه $f$ در زمان $t$	$uff^t$
حد آستانه جریان برای پایانه صادراتی $m$ در زمان $t$	$um^{mt}$
حد آستانه جریان برای انبار $c$ در زمان $t$	$uc^{ct}$
هزینه افزایش ظرفیت پالایشگاه $f$ در زمان $t$	$cs^{ft}$
مقدار افزایش ظرفیت پالایشگاه $f$ در زمان $t$ در سناریو $s$	$cf_s^{ft}$

متغیرهای صفر و یک مدل توسعه‌یافته

- $xw_t^{wg}$  اگر چاه نفت  $w$  با تکنولوژی  $g$  در زمان  $t$  احداث شود یک، در غیر این صورت صفر.
- $yw_t^{wg}$  اگر چاه نفت  $w$  با تکنولوژی  $g$  در زمان  $t$  موجود باشد یک، در غیر این صورت صفر.
- $xr_t^{rg'g''}$  اگر سکوی تولید  $r$  با تکنولوژی  $g'$  و  $g''$  در زمان  $t$  احداث شود یک، در غیر این صورت صفر.
- $yr_t^{rg'g''}$  اگر سکوی تولید  $r$  با تکنولوژی  $g'$  و  $g''$  تا زمان  $t$  موجود باشد یک، در غیر این صورت صفر.
- $xf_t^{fg'''}$  اگر پالایشگاه  $f$  با تکنولوژی  $g'''$  در زمان  $t$  احداث شود یک، در غیر این صورت صفر.
- $yf_t^{fg'''}$  اگر پالایشگاه  $f$  با تکنولوژی  $g'''$  در زمان  $t$  موجود باشد یک، در غیر این صورت صفر.
- $xm_t^m$  اگر بازار خارجی  $m$  در زمان  $t$  تخصیص یابد یک، در غیر این صورت صفر.
- $ym_t^m$  اگر بازار خارجی  $m$  در زمان  $t$  تخصیص یافته شده باشد یک، در غیر این صورت صفر.
- $xc_t^c$  اگر انبار  $c$  در زمان  $t$  احداث شود یک، در غیر این صورت صفر.
- $yc_t^c$  اگر انبار  $c$  در زمان  $t$  موجود باشد یک، در غیر این صورت صفر.
- $a_{lt}^{wr}$  اگر مد حمل و نقل  $l$  بین چاه  $w$  و سکوی تولید  $r$  در زمان  $t$  توسعه یابد یک، در غیر این صورت صفر.
- $a_{lt}^{rf}$  اگر مد حمل و نقل  $l$  بین سکوی تولید  $r$  و پالایشگاه  $f$  در زمان  $t$  توسعه یابد یک، در غیر این صورت صفر.
- $a_{lt}^{rm}$  اگر مد حمل و نقل  $l$  بین سکوی تولید  $r$  و پایانه صادراتی  $m$  در زمان  $t$  توسعه یابد یک، در غیر این صورت صفر.
- $a_{lt}^{fcp}$  اگر مد حمل و نقل  $l$  بین پالایشگاه  $f$  و انبار  $c$  برای محصول  $p$  در زمان  $t$  توسعه یابد یک، در غیر این صورت صفر.
- $xf1_t^{fs}$  اگر افزایش ظرفیت پالایشگاه  $f$  در سناریو  $s$  و در زمان  $t$  رخ دهد، یک و در غیر این صورت صفر.
- $yf1_t^{fs}$  اگر افزایش ظرفیت پالایشگاه  $f$  در سناریو  $s$  و در زمان‌های قبل  $t$  صورت پذیرفته باشد، یک و در غیر این صورت صفر.



در صورتی که گره مربوط به چاه $w$ بحرانی شود ۱ و در غیر این صورت صفر.	$a1^w$
در صورتی که گره مربوط به سکوی تولید تولیدی $r$ بحرانی شود ۱ و در غیر این صورت صفر.	$a2^r$
در صورتی که گره مربوط به پالایشگاه $f$ بحرانی شود ۱ و در غیر این صورت صفر.	$a3^f$
در صورتی که گره مربوط به پایانه صادراتی $m$ بحرانی شود ۱ و در غیر این صورت صفر.	$a4^m$
در صورتی که گره مربوط به انبار $c$ بحرانی شود ۱ و در غیر این صورت صفر.	$a5^c$

متغیرهای پیوسته مدل توسعه یافته

مقدار نفت حمل و نقل شده از چاه $w$ به سکوی تولید $r$ در زمان $t$ توسط مد حمل و نقل $l$	$q_{lt}^{wr}$
مقدار نفت حمل و نقل شده از سکوی تولید $r$ به پالایشگاه $f$ در زمان $t$ تحت سناریو $s$ توسط مد حمل و نقل $l$	$q_{lt}^{rfs}$
مقدار نفت حمل و نقل شده از سکوی تولید $r$ به پایانه صادراتی $m$ در زمان $t$ تحت سناریو $s$ توسط مد حمل و نقل $l$	$q_{lt}^{rms}$
مقدار محصول $p$ حمل و نقل شده از پالایشگاه $f$ به انبار $c$ در زمان $t$ تحت سناریو $s$ توسط مد حمل و نقل $l$	$q_{lt}^{fcp}$
مقدار بنزین نوع $k$ حمل و نقل شده از پالایشگاه $f$ به انبار $c$ در زمان $t$ توسط مد حمل و نقل $l$ تحت سناریو $s$	$q_{lt}^{fcks}$
مقدار بایواتانول خریداری شده توسط پالایشگاه $f$ در زمان $t$	$l^f t$
مقدار تقاضای ازدست رفته نفت در پایانه صادراتی $m$ تحت سناریو $s$ در زمان $t$	$z_t^{ms}$
مقدار تقاضای ازدست رفته محصول $p$ در انبار $c$ تحت سناریو $s$ در زمان $t$	$z_t^{pcs}$
مقدار تقاضای ازدست رفته بنزین نوع $k$ در انبار $c$ تحت سناریو $s$ در زمان $t$	$z_t^{kcs}$
ارزش خالص فعلی تمام جریان های نقدی	$NPV$
کل جریان های نقدی در زمان $t$	$TCF_t$
هزینه سرمایه گذاری ثابت در زمان $t$	$FCl_t$

$NE_t$	درآمد خالص در زمان $t$
$FTDC_t$	کسری از استهلاک سرمایه کل در زمان $t$
$TFCI$	کل هزینه سرمایه‌گذاری
$SRev_t$	درآمد فروش در زمان $t$
$TVC_t$	هزینه متغیر کل در زمان $t$
$Dep_t$	استهلاک سرمایه در زمان $t$

### پیوست ۳. خطی سازی بخش‌های غیرخطی مدل

به صورت کلی هرگاه دو متغیر صفر و یک مانند  $x$  و  $y$  در هم ضرب شوند، به جای

حاصل ضرب می‌توان روابط (۶۱) را جایگزین نمود:

$$\begin{aligned} z &= x \times y & (61) \\ z &\leq x \times M \\ z &\leq y \times M \\ z &\geq x + y - 1 \end{aligned}$$

در صورتی که یکی از متغیرها مانند  $x$  پیوسته باشد، از رابطه (۶۲) استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} z &= x \times y & (62) \\ z &\leq x \\ z &\leq y \times M \\ z &\geq x + (y - 1) \times M \end{aligned}$$

محدودیت‌های (۳۵) و (۱۱) تا (۱۴) در مدل به صورت غیرخطی هستند که برای تبدیل آن‌ها

به محدودیت‌های خطی، از روابط (۶۱) و (۶۲) استفاده شده است. محدودیت (۳۵) به صورت

محدودیت‌های (۶۳) تا (۶۶) بازنویسی می‌شوند.

$$\sum_{g'''} y f_t^{fg'''} \cdot y f 2_t^{fs} = y f 2_t^{fs} \quad \forall f, t, s \quad (63)$$

$$yf2_t^{fs} \leq yf1_t^{fs} \quad \forall f.t.s \quad (64)$$

$$yf2_t^{fs} \leq \sum_{g'''} yf_t^{fg'''} \quad \forall f.t.s \quad (65)$$

$$yf2_t^{fs} \geq \sum_{g'''} yf_t^{fg'''} + yf1_t^{fs} - 1 \quad \forall f.t.s \quad (66)$$

محدودیت (۱۱) به صورت معادلات (۶۷) تا (۷۰) بازنویسی می شود.

$$a1_w \cdot q_{lt}^{wr} = a1q_{lt}^{wr} \quad \forall w.r.l.t \quad (67)$$

$$a1q_{lt}^{wr} \leq M \cdot a1_w \quad \forall w.r.l.t \quad (68)$$

$$a1q_{lt}^{wr} \leq q_{lt}^{wr} \quad \forall w.r.l.t \quad (69)$$

$$a1q_{lt}^{wr} \geq q_{lt}^{wr} - M \cdot (1 - a1_w) \quad \forall w.r.l.t \quad (70)$$

محدودیت (۱۲) به دلیل ضرب سه متغیر پیوسته در یک متغیر صفر و یک به صورت (۷۱) تا (۸۲) بازنویسی می شود.

$$a2_r \cdot q_{lt}^{rm} = a2q_{lt}^{rm} \quad \forall r.m.l.t \quad (71)$$

$$a2q_{lt}^{rm} \leq M \cdot a2_r \quad \forall r.m.l.t \quad (72)$$

$$a2q_{lt}^{rm} \leq q_{lt}^{wr} \quad \forall r.m.l.t \quad (73)$$

$$a2q_{lt}^{rm} \geq q_{lt}^{rm} - M \cdot (1 - a2_r) \quad \forall r. m. l. t \quad (۷۴)$$

$$a2_r \cdot q_{lt}^{rfs} = a2q_{lt}^{rfs} \quad \forall r. f. s. l. t \quad (۷۵)$$

$$a2q_{lt}^{rfs} \leq M \cdot a2_r \quad \forall r. f. s. l. t \quad (۷۶)$$

$$a2q_{lt}^{rfs} \leq q_{lt}^{rfs} \quad \forall r. f. s. l. t \quad (۷۷)$$

$$a2q_{lt}^{rfs} \geq q_{lt}^{rfs} - M \cdot (1 - a2_r) \quad \forall r. f. s. l. t \quad (۷۸)$$

$$a2_r \cdot q_{lt}^{wr} = a2q_{lt}^{wr} \quad \forall w. r. l. t \quad (۷۹)$$

$$a2q_{lt}^{wr} \leq M \cdot a2_r \quad \forall w. r. l. t \quad (۸۰)$$

$$a2q_{lt}^{wr} \leq q_{lt}^{wr} \quad \forall w. r. l. t \quad (۸۱)$$

$$a2q_{lt}^{wr} \geq q_{lt}^{wr} - M \cdot (1 - a2_r) \quad \forall w. r. l. t \quad (۸۲)$$

محدودیت (۱۳) به دلیل ضرب سه متغیر پیوسته در یک متغیر صفر و یک به صورت (۸۳) تا (۹۴)

بازنویسی می‌شود.

$$a3_f \cdot q_{lt}^{rfs} = a3q_{lt}^{rfs} \quad \forall r. f. s. l. t \quad (۸۳)$$

$$a3q_{lt}^{rfs} \leq M \cdot a3_f \quad \forall r. f. s. l. t \quad (۸۴)$$

$$a3q_{lt}^{rfs} \leq q_{lt}^{rfs} \quad \forall r. f. s. l. t \quad (۸۵)$$

$$a3q_{lt}^{rfs} \geq q_{lt}^{rfs} - M \cdot (1 - a3_f) \quad \forall r. f. s. l. t \quad (۸۶)$$

$$a3_f \cdot q_{lt}^{fcp_s} = a3q_{lt}^{fcp_s} \quad \forall f. c. p \in p2. s. l. t \quad (۸۷)$$

$$a3q_{lt}^{fcp_s} \leq M \cdot a3_f \quad \forall f. c. p \in p2. s. l. t \quad (۸۸)$$

$$a3q_{lt}^{fcp_s} \leq q_{lt}^{rf_s} \quad \forall f. c. p \in p2. s. l. t \quad (۸۹)$$

$$a3q_{lt}^{fcp_s} \geq q_{lt}^{fcp_s} - M \cdot (1 - a3_f) \quad \forall f. c. p \in p2. s. l. t \quad (۹۰)$$

$$a3_f \cdot q_{lt}^{fcoks} = a3q_{lt}^{fcoks} \quad \forall f. c. o. k. s. l. t \quad (۹۱)$$

$$a3q_{lt}^{fcoks} \leq M \cdot a3_f \quad \forall f. c. o. k. s. l. t \quad (۹۲)$$

$$a3q_{lt}^{fcoks} \leq q_{lt}^{fcoks} \quad \forall f. c. o. k. s. l. t \quad (۹۳)$$

$$a3q_{lt}^{fcoks} \geq q_{lt}^{fcoks} - M \cdot (1 - a3_f) \quad \forall f. c. o. k. s. l. t \quad (۹۴)$$

محدودیت (۱۴) به صورت محدودیت‌های (۹۵) تا (۹۸) بازنویسی می شود.

$$a4_m \cdot q_{lt}^{rms} = a4q_{lt}^{rms} \quad \forall r. m. s. l. t \quad (۹۶)$$

$$a4q_{lt}^{rms} \leq M \cdot a4_m \quad \forall r. m. s. l. t \quad (۹۷)$$

$$a4q_{lt}^{rms} \leq q_{lt}^{rms} \quad \forall r. m. s. l. t \quad (۹۸)$$

$$a4q_{lt}^{rms} \geq q_{lt}^{rms} - M \cdot (1 - a4_m) \quad \forall r. m. s. l. t \quad (۹۹)$$

در آخر نیز محدودیت (۱۵) به صورت (۱۰۰) تا (۱۰۷) نوشته می شوند.

$$a5_c \cdot q_{lt}^{fcp_s} = a5q_{lt}^{fcp_s} \quad \forall f.c.p \in p2.l.s.t \quad (100)$$

$$a5q_{lt}^{fcp_s} \leq M \cdot a5_c \quad \forall f.c.p \in p2.l.s.t \quad (101)$$

$$a5q_{lt}^{fcp_s} \leq q_{lt}^{fcp_s} \quad \forall f.c.p \in p2.l.s.t \quad (102)$$

$$a5q_{lt}^{fcp_s} \geq q_{lt}^{fcp_s} - M \cdot (1 - a5_c) \quad \forall f.c.p \in p2.l.s.t \quad (103)$$

$$a5_c \cdot q_{lt}^{fkocs} = a5q_{lt}^{fkocs} \quad \forall f.c.o.k.s.l.t \quad (104)$$

$$a5q_{lt}^{fkocs} \leq M \cdot a5_c \quad \forall f.c.o.k.s.l.t \quad (105)$$

$$a5q_{lt}^{fkocs} \leq q_{lt}^{fkocs} \quad \forall f.c.o.k.s.l.t \quad (106)$$

$$a5q_{lt}^{fkocs} \geq q_{lt}^{fkocs} - M \cdot (1 - a5_c) \quad \forall f.c.o.k.s.l.t \quad (107)$$

همچنین معادله (۱۸) به علت وجود  $\min \max$  یک عبارت غیرخطی است که به صورت معادلات (۱۰۸) و (۱۰۹) خطی سازی می‌گردد.

$$\min A = \varphi \quad (108)$$

$$\begin{aligned} & \varphi \\ & \geq \sum_s \sum_t pr_s \\ & \cdot \left( \frac{\sum_m bc1_m \cdot z_t^{ms} + \sum_{p \in p_2} \sum_c bc2_{pc} \cdot z_t^{pcs} + \sum_k \sum_o \sum_c bc3_{kc} \cdot z_t^{kocs}}{\sum_m d_t^{ms} + \sum_{p \in p_2} \sum_c d_t^{pcs} + \sum_k \sum_c d_t^{kcs}} \right) \end{aligned} \quad (109)$$

## پیوست ۴. توضیح روش اپسیلون-محدودیت و اپسیلون-محدودیت تکامل یافته

### ۱. رویکرد اپسیلون محدودیت

فرم کلی یک مسئله با تابع هدف چندگانه به صورت مسئله (۱۱۰) است.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ x \in X \end{array} \right. \quad (110)$$

فرض کنید هدف اول به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می شود و سایر اهداف به کران بالای اپسیلون محدود و در قیود مسئله اعمال می شوند. در این صورت، روش اپسیلون-محدودیت به کار گرفته می شود و مدل تک هدفه (۱۱۱) حاصل می شود،

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } f_1(x) \\ f_i(x) \leq e_i \quad i = 2, 3, \dots, n \\ x \in X \end{array} \right. \quad (111)$$

که در آن هدف اول به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است و اهداف دوم تا  $n$  به مقدار حداکثر  $e_i$  محدود می شوند. اگر یکی از اهداف (مثلاً  $f_k(x)$ ) به صورت بیشینه سازی بود، آنگاه با تعریف  $f'_i(x) = f_i(x)$  و جای گذاری آن به عنوان هدف  $k$ م، بازهم  $m$  فرم کلی فوق استفاده کرد. راه حل دیگر نیز این است که قید مربوط به این هدف به صورت  $f_k(x) \geq e_k$  نوشته شود.

برای به کارگیری روش اپسیلون-محدودیت تکامل یافته دو موضوع مهم است؛ اول آنکه دامنه تغییرات اپسیلون ها به چه صورت باشد و دوم آنکه به ازای چه مقادیری از این دامنه، جواب های کارا به دست آورده می شود. معمولاً با استفاده از ماتریس پی آمده<sup>۱</sup> می توان دامنه تغییرات اپسیلون ها را تعیین کرد ولی بازهم در روش اپسیلون-محدودیت ممکن است به ازای برخی از مقادیر اپسیلون، جواب کارا به دست نیاید (ارگات<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵).

1. Pay off matrix  
2. Ehrgott

## ۲. حل مدل پیشنهادی با رویکرد اپسیلون-محدودیت تکامل یافته

همان‌طور که اشاره شد، در روش اپسیلون-محدودیت با تغییر مقادیر  $e_i$  جواب‌های مختلفی به دست می‌آید که یا کارا هستند و یا حداقل کارای ضعیف می‌باشند. با اصلاح/تکمیل جزئی مدل (۱۱۱)، می‌توان همواره جواب کارا به دست آورد، این روش به روش اپسیلون-محدودیت تکامل یافته معروف است (ماوروتاس<sup>۱</sup>، ۲۰۰۹). برای اجرای بهتر روش اپسیلون-محدودیت تکامل یافته، می‌توان بازه مناسب اپسیلون‌ها ( $e_i$ ) را ابتدا Lex به دست آورد (آقایی و همکاران، ۲۰۱۱). در روش اپسیلون-محدودیت تکامل یافته ابتدا باید بازه مناسب تغییرات  $e_i$  مشخص شود و سپس به ازای مقادیر مختلف  $e_i$ ها جبهه پارتو را به دست آورد. دو مرحله اصلی که در روش اپسیلون-محدودیت تکامل یافته پیموده می‌شود عبارت‌اند از:

الف) تعیین دامنه مقادیر اپسیلون‌ها

ب) برنامه‌ریزی با مدل اپسیلون-محدودیت تکامل یافته.

در ادامه این دو مرحله به‌طور کلی توضیح داده می‌شود و سپس گام‌های به‌کارگیری روش

اپسیلون-محدودیت تکامل یافته تشریح می‌شود.

الف) تعیین دامنه مقادیر اپسیلون‌ها

به‌منظور یافتن بازه مناسب برای  $e_i$  مربوط به هدف  $i$ م ( $i = 2, \dots, n$ )، ابتدا برای هر یک از

اهداف  $j = 1, 2, \dots, n$  مسائل بهینه‌سازی (۱۱۲) حل می‌شود،

$$\text{PayOff}_{f_{jj}} = \min_{x \in X} f_j(x) \quad (112)$$

که  $x^{j*}$  به‌عنوان جواب بهینه و  $\text{PayOff}_{f_{jj}} = f_j(x^{j*})$  به‌عنوان مقدار بهینه هدف  $j$ م ذخیره

می‌شود. حال باید مقدار بهینه هدف  $i$ م، درحالی‌که هر مرتبه یکی از اهداف  $j \neq i$ ،  $j = 1, 2, \dots, n$

$i$  در حالت بهینه قرار دارد، به‌صورت (۱۱۳) به دست آورده شود:

1. Mavrotas



$$PayOff_{ij} = \text{Min } f_i(x) \quad (113)$$

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

$$x \in X$$

$$j \neq i$$

که جواب بهینه  $x^{ij*}$  با مقدار بهینه  $PayOff_{jj} = f_i(x^{ij*})$  برای هدف  $i$  محاسبه می شود.

به این ترتیب، با استفاده از روش Lex، ماتریس پی آمد<sup>۱</sup> (۱۱۴) حاصل می شود:

$$PayOff = [payOff_{ij}] \quad (114)$$

بعد از تعیین ماتریس پی آمد، بر هدف  $i = 1, \dots, n$  موارد (۱۱۵) تعریف می شود:

$$\text{Min}(f_i) = \text{Min}_j \{payOff_{ij}\} = payOff_{ii} \quad (115)$$

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

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

با تعریف فوق الذکر، بازه مناسب برای  $e_i$  به صورت  $e_i \in [\text{Min}(f_i), \text{Max}(f_i)]$  تعیین می -

شود. و از مقدار  $R(f_i)$  نیز برای نرمال سازی اهداف در تابع هدف اپسیلون-محدودیت تکامل یافته

استفاده می شود.

(ب) برنامه ریزی با مدل اپسیلون-محدودیت تکامل یافته

برای حل یک مسئله چندهدفه (۱۱۰) به روش اپسیلون-محدودیت تکامل یافته مدل برنامه ریزی

(۱۱۶) توسعه داده شده است،

$$\begin{cases} \text{Min } f_1(x) - \sum_{i=2}^n \phi_i s_i \\ f_i(x) + s_i = e_i & i = 2, 3, \dots, n \\ x \in X \\ s_i \geq 0 \end{cases} \quad (116)$$

که در آن  $s_i$ ها متغیرهای نامنفی برای کمبود و  $\phi_i$  یک پارامتر برای نرمال سازی مقدار تابع هدف

$$\text{اول نسبت به هدف } i \text{ است. } (\phi_i = \frac{R(f_1)}{R(f_i)})$$

در روش اپسیلون-محدودیت تکامل‌یافته پیشنهادی این تحقیق، ابتدا مقادیر  $e_i \in [Min(f_i), Max(f_i)]$ ، بر اساس روش توضیح داده‌شده در بخش قبلی، برای اهداف مقیدشده تعیین می‌شود و پس از مقداردهی به  $e_i$ ها، مدل تک هدفه (۱۱۶) حل می‌شود که جواب آن یک جواب کارا است و مقدار اهداف به ازای این جواب در جبهه پارتو قرار می‌گیرد. ملاحظه می‌شود با تغییر در  $e$ ها، در بازه مربوط به آن‌ها، جواب کارایی دیگر و نقطه‌ای دیگر روی جبهه پارتو حاصل می‌شود.