

## توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی استوار به‌منظور طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین تولید سوخت سبز از جلبک‌ها در شرایط عدم قطعیت

شایان محسنی<sup>۱</sup> و میرسامان پیشوایی

گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۳

**چکیده:** کاهش شدید منابع نفتی و آلودگی‌های زیست‌محیطی از مهم‌ترین انگیزه توسعه سوخت‌های سبز در کشور محسوب می‌شوند. در میان انواع مواد اولیه برای تولید سوخت سبز، جلبک‌ها به‌عنوان یکی از جدیدترین منابع توجهات فراوانی را در دنیا به خود جلب کرده‌اند. به‌منظور توسعه این صنعت در کشور، طراحی مدل‌سازی زنجیره تأمین تولید سوخت سبز از جلبک‌ها حیاتی است. برای این هدف، این مقاله به توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی استوار برای طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین جلبک‌ها در شرایط عدم قطعیت می‌پردازد. مدل طراحی زنجیره تأمین پیشنهادی بر اساس دو رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت مجموعه عدم قطعیت‌های مختلف فرمول‌بندی می‌شود. در یک مطالعه موردی، عملکرد دو مدل استوار طراحی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن درجات مختلف محافظه‌کاری سیاست‌گذار مقایسه و تجزیه و تحلیل می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌های استوار و آزمایش‌های تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که مدل زنجیره تأمین ارائه شده می‌تواند در آینده برای توسعه سوخت سبز از جلبک‌ها به کار گرفته شود.

**واژه‌های کلیدی:** سوخت سبز، جلبک‌ها، بهینه‌سازی استوار، طراحی شبکه زنجیره تأمین.

رده‌بندی ریاضی (۲۰۱۰): ۹۰C۱۵ و ۹۰B۰۶.

### ۱- مقدمه

محدود بودن ذخایر نفتی، افزایش روزافزون تقاضای انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی از مهم‌ترین انگیزه‌های توسعه سوخت‌های سبز در کشور می‌باشند. باوجود پتانسیل بالای تولید سوخت‌های سبز در کشور توجه محدودی به این موضوع در سالیان

۱ - آدرس الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله: Shayan\_mohseni@ind.iust.ac.ir

گذشته شده است. در کشورهای پیشرو در تولید سوخت‌های سبز مواد اولیه مختلفی برای تولید سوخت سبز به کار گرفته شده است. بر اساس مواد اولیه به کار گرفته شده سوخت‌های سبز در سه نسل طبقه‌بندی می‌شوند [۱]. نسل اول سوخت‌های سبز از مواد اولیه با منشأ خوراکی همچون دانه ذرت، نیشکر، دانه سویا و دانه‌های روغنی استخراج می‌شوند. این مواد اولیه سرشار از شکر یا چربی هستند که به ترتیب به‌وسیله فرایندهای تخمیر<sup>۱</sup> و تبادل استری<sup>۲</sup> به الکل و دیزل سبز تبدیل می‌شوند [۲]. اگرچه در حال حاضر سوخت‌های سبز نسل اول سهم اصلی را در بازار انرژی دنیا بر عهده دارند اما به دلیل اینکه از مواد غذایی برای تولید سوخت استفاده می‌کند مورد انتقادهای شدیدی قرار دارند [۳]. با افزایش دغدغه کمبود مواد غذایی، نسل دوم سوخت‌های سبز مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. سوخت‌های سبز نسل دو از موادی بدون منشأ غذایی همچون پسماندهای محصولات کشاورزی مانند غلاف ذرت و یا محصولات مختص انرژی بدون کاربرد خوراکی مانند جاتروفا، علف و بامبو استخراج می‌شوند [۱]. اگرچه این نسل اثر نامطلوب کمتری بر بازارهای مواد غذایی دارند اما میزان بهره‌وری بالایی ندارند و همچنین نیاز به آب مناسب و کودهای بخش کشاورزی دارند که باعث شده است ریز جلبک‌ها (گونه‌های تک‌سلولی جلبک‌ها) به‌عنوان نسل سوم سوخت‌های سبز نگاه‌های بسیاری را در نقاط مختلف دنیا به خود جلب کنند. جلبک‌ها دارای مزیت‌هایی همچون: (۱) میزان رشد بالا و همچنین قابلیت ذخیره‌سازی روغن بالا (۲) توانایی رشد برخی گونه‌های جلبک‌ها در آب شور و فاضلاب که نیاز به آب شیرین را کاهش می‌دهد و (۳) قابلیت تأمین مواد مغذی و کودهای موردنیاز برای رشد از طریق فاضلاب هستند [۴].

با گسترش علاقه و نیاز به سوخت‌های سبز، مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت‌های سبز توجهات فراوانی را در سال‌های اخیر به خود جذب کرده است. به‌طور کلی این مدل‌ها به دنبال این هستند که تمام فعالیت‌های زنجیره تأمین از تأمین مواد اولیه برای تولید سوخت تا تبدیل آن‌ها به سوخت و سپس توزیع سوخت تولیدی به بهینه‌ترین حالت ممکن انجام شوند [۴]. فعالیت‌های در نظر گرفته شده در مدل‌های زنجیره تأمین سوخت‌های سبز بر اساس نوع ماده اولیه تفاوت می‌کند. زنجیره تأمین نسل اول از مراحل زیر تشکیل می‌شود: مواد اولیه (برای مثال ذرت) از مزارع موجود در نقاط مختلف جمع‌آوری شده، سپس به پالایشگاه‌های تبدیل منتقل شده و بعد از تبدیل مواد اولیه به سوخت در پالایشگاه‌ها، سوخت نهایی به ایستگاه‌های عرضه سوخت سبز منتقل می‌شوند. لذا در مطالعات انجام گرفته تصمیماتی همچون انتخاب تأمین‌کننده [۵]؛ ظرفیت، مکان و نوع فناوری پالایشگاه‌های تبدیل [۶-۷]؛ و روش حمل‌ونقل مواد اولیه و

۱- Fermentation

۲- Transesterification

سوخت نهایی [۸] بهینه می‌شوند. در ارتباط با زنجیره تأمین نسل دوم سوخت‌های سبز علاوه بر تصمیمات بالا، مکان بهینه برای احداث مزارع به‌منظور کشت محصولات و میزان کشت بهینه محصولات نیز مشخص می‌شوند [۹].

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مدل‌های زنجیره تأمین سوخت‌های سبز موضوع عدم قطعیت است. علت این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که تولید سوخت‌های سبز در مراحل اولیه توسعه است و تخمین دقیق هزینه‌ها و میزان بازده مراحل مختلف تولید سوخت در مقیاس انبوه بسیار پیچیده است. به‌علاوه رشد مواد اولیه به کار گرفته شده برای تولید سوخت، به‌شدت تحت تأثیر نوسانات آب و هوایی است که اهمیت موضوع عدم قطعیت را دوچندان می‌کند [۱]. بر اساس بررسی‌های انجام شده برنامه‌ریزی احتمالی روش غالب برای مقابله با عدم قطعیت در مطالعات طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت‌های سبز بوده است [۲]. با وجود این‌که از جنبه تئوری برنامه‌ریزی تصادفی رویکرد قوی برای مدل‌سازی عدم قطعیت است اما این روش در زمینه‌ی طراحی شبکه زنجیره تأمین با محدودیت‌های جدی روبرو است. برای مثال می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: (۱) برنامه‌ریزی احتمالی برای مدل‌سازی عدم قطعیت نیاز به تابع توزیع احتمالی پارامترهای غیرقطعی دارد حال‌آنکه در اغلب زنجیره تأمین‌های سوخت‌های سبز به دست آوردن توزیع احتمالی دقیق پارامترها به علت عدم وجود داده‌های تاریخی کافی مقدور نیست، (۲) بهینه‌سازی احتمالی بر پایه سناریو به‌عنوان یک تکنیک مشهور در بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین، برای مقابله با عدم قطعیت نیاز به در نظر گرفتن مجموعه‌ای بزرگ از سناریوها است که منجر به افزایش پیچیدگی مسئله و به‌تبع آن افزایش زمان محاسباتی می‌شود [۱۰]. به‌عنوان یک‌راه حل جایگزین، بهینه‌سازی استوار بر چنین مشکلاتی غلبه می‌کند و همچنین جوابی را فراهم می‌کند که تضمین می‌شود به ازای تمام واقع‌نمایی‌های پارامترهای غیرقطعی، شدنی و استوار باقی بماند [۱۱]. به‌کارگیری این رویکرد بهینه‌سازی برای بهینه‌سازی و طراحی شبکه زنجیره تأمین تضمین می‌کند که تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی زنجیره تأمین به‌دست‌آمده، نسبت به نوسانات پارامترهای غیرقطعی حساسیت کمتری داشته باشد و همچنین بر اثر نوسانات اندک پارامترهای بهینگی خود را از دست ندهد.

رویکرد بهینه‌سازی استوار با داده‌های غیرقطعی فاصله‌ای نخستین بار به‌وسیله سویستر [۱۲] ارائه شده است. رویکرد سویستر بدترین مقدار محتمل پارامترهای غیرقطعی را برای پارامترهای غیرقطعی در نظر می‌گیرد؛ نتیجتاً حداکثر حفاظت را در برابر عدم قطعیت فراهم می‌کند. نقص رویکرد سویستر در این است که احتمال این‌که تمام پارامترهای غیرقطعی هم‌زمان بدترین مقدار خود را بگیرند در عمل بسیار کم است. برای کاهش محافظه‌کاری این روش، بنتال و نمیروفسکی [۱۱] به توسعه مدل بهینه‌سازی استوار تحت مجموعه عدم قطعیت بیضوی شکل پرداختند. اگرچه رویکرد آن‌ها توانایی مناسبی در کنترل محافظه‌کاری مدل دارد اما مدل برنامه‌ریزی خطی

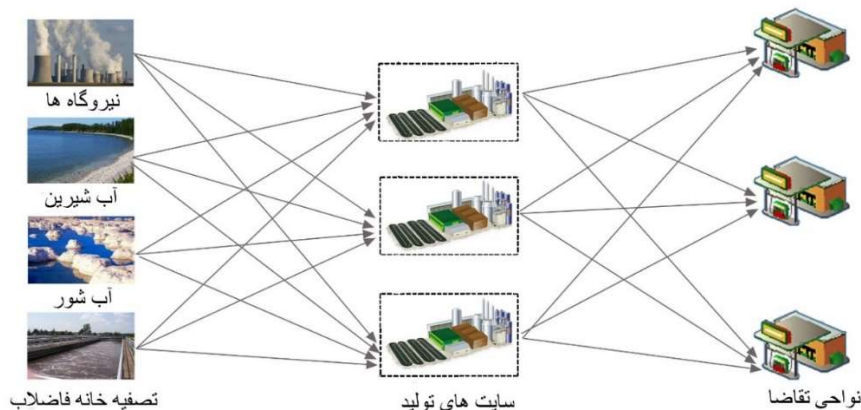
اولیه را به مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل می‌کند که از لحاظ محاسباتی بسیار پیچیده‌تر است. در ادامه بنتال و همکاران [۱۳] روش همزاد استوار تنظیم‌پذیر را بر پایه مجموعه عدم قطعیتی ارائه دادند که پارامترها را در دو بخش در نظر می‌گیرد: پارامترهای غیرقابل تنظیم که لازم است مقدارشان قبل از تحقق مقادیر مختلف پارامترهای غیرقطعی تعیین شود و پارامترهای قابل تنظیم که اجازه دارند مقدار خود را که بعد از تحقق مقادیر پارامترهای مختلف انتخاب نمایند. گرچه این روش انعطاف‌پذیری مناسبی فراهم می‌کند اما در اغلب موارد منجر به پیچیدگی محاسباتی می‌شود. وردرام و فلوداس [۱۴] به مطالعه مدل‌های استوار تحت مجموعه‌های عدم قطعیت پیوسته (عمومی، یکنواخت، نرمال) و مجموعه عدم قطعیت‌های ناپیوسته (عمومی، دوجمله‌ای، پواسن) پرداختند. زوکوی [۱۵] به بررسی مدل‌های بهینه‌سازی همزاد استوار بر اساس مجموعه عدم قطعیت‌های متفاوتی همچون مربع، چندوجهی، بیضی، ترکیب مربع و چندوجهی، ترکیب مربع و بیضی و ترکیب مربع، بیضی و چندوجهی برای مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط پرداختند. برتسیماس و سیم [۱۶] مدل برنامه‌ریزی استوار با استفاده از مجموعه عدم قطعیت با بودجه عدم قطعیت معرفی کردند. مدل آن‌ها علاوه بر این که خطی بودن مسئله اصلی را حفظ می‌کند، کنترل کاملی بر درجه محافظه‌کاری جواب مدل به‌وسیله مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت فراهم می‌کند [۱۶].

از آنجایی که جلبک‌ها به‌عنوان یکی از جدیدترین مواد برای تولید سوخت سبز محسوب می‌شوند، توجهات کمتری به مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین جلبک‌ها در نقاط مختلف دنیا شده است. از معدود مطالعات در این حوزه می‌توان به مدل توسعه داده شده توسط محسنی و پیشوایی [۱۷] اشاره نمود که به طراحی زنجیره تولید سوخت با در نظر گرفتن مراحل عملیاتی تولید دسته‌ای و پیوسته اشاره نمود. در مدل آن‌ها برای مقابله با عدم قطعیت در هزینه‌های تولید از مدل برنامه‌ریزی استوار استفاده شده است. مطالعه حاضر به توسعه مدل‌های پیشین در مسیرهای زیر می‌پردازد: (۱) در نظر گرفتن خطوط لوله برای انتقال مواد اولیه و انتخاب مکان و ظرفیت بهینه آن‌ها (۲) در نظر گرفتن تصمیمات مدیریت موجودی در مدل (۳) در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مقدار عرضه (در دسترس بودن) مواد اولیه و تقاضای سوخت علاوه بر پارامترهای هزینه و ارائه رویکرد برنامه‌ریزی استوار مرتبط با آن (۴) به‌کارگیری رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت مجموعه عدم قطعیت مربع (نرم بینهایت بردار داده‌های غیرقطعی) [۱۵] و رویکرد بهینه‌سازی با بودجه عدم قطعیت (رویکرد برتسیماس و سیم) [۱۶] که خطی بودن مسئله اصلی را تضمین کرده و همچنین با استفاده از نحوه متفاوت برخورد با عدم قطعیت انعطاف‌پذیری مناسبی برای کنترل درجه محافظه‌کاری فراهم می‌کند.

## ۲- بیان مسئله

### ۲-۱- مراحل تولید سوخت از جلبک‌ها

پیش از ارائه مدل طراحی زنجیره تأمین جلبک‌ها، آشنایی با مراحل تولید سوخت از جلبک‌ها الزامی است. در یک نگاه کلی چرخه تولید سوخت سبز از جلبک‌ها از چند مرحله تشکیل شده است [۱۸]. در ابتدای این چرخه، حوضچه‌هایی قرار دارند که در آن‌ها جلبک‌ها کشت داده می‌شوند. به عبارت دقیق‌تر این حوضچه‌ها مملو از مخلوط آب و مواد مغذی موردنیاز برای رشد بهره‌ور جلبک‌ها (کربن دی‌اکسید، نیتروژن و فسفر) هستند و در مساحت‌های چندین هکتار ساخته می‌شوند. بعد از رشد جلبک‌ها در این حوضچه‌ها، لازم است جلبک‌ها از آب پیرامونشان جداسازی شده تا هم از فسادپذیری آن‌ها جلوگیری شوند و هم برای مراحل بعدی تولید سوخت آماده شوند [۴]. برای این منظور، مخلوط آب و جلبک‌ها وارد مرحله برداشت و سپس مرحله خشک کردن می‌شود. در مرحله برداشت با استفاده از فرایند لخته سازی و فیلتراسیون مقدار قابل توجهی آب از مخلوط آب و جلبک جداسازی شده و سپس در محله خشک کردن مقدار اندک آب باقی‌مانده نیز به‌وسیله حرارت تبخیر شده و جلبک‌ها به‌طور کامل خشک می‌شوند. جلبک خشک‌شده می‌تواند توسط فرایندهای مختلفی به سوخت‌های مختلفی تبدیل شود؛ اما از آنجاکه بخش قابل توجهی از جلبک‌ها را روغن تشکیل می‌دهد، استخراج روغن و تبدیل آن به دیزل سبز (بایودیزل) شناخته‌ده‌ترین روش تولید سوخت از جلبک‌ها است [۴]. بر این اساس، جلبک خشک شده وارد مرحله استخراج شده و روغن موجود در جلبک‌ها استخراج می‌شود. نهایتاً روغن استخراجی توسط واکنش‌های شیمیایی به سوخت بایودیزل تبدیل می‌شود.



شکل (۱): مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت سبز از جلبک‌ها.

## ۲-۲-۲ مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین

بر اساس فرایند تولید سوخت توصیف شده، شبکه زنجیره تأمینی به صورت نشان داده شده در شکل (۱) می‌توان برای تولید سوخت از جلبک‌ها در نظر گرفت. این شبکه زنجیره تأمین از سطوح مختلفی تشکیل شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود:

### ۲-۲-۲-۱ مواد اولیه مورد نیاز

رشد بهینه جلبک‌ها نیاز به تأمین کافی و پایدار مواد اولیه‌ای همچون آب، کربن دی‌اکسید و مواد مغذی دارد؛ نتیجتاً لازم است در مدل طراحی زنجیره تأمین جلبک‌ها، تأمین این مواد در نظر گرفته شوند. آب لازمه اصلی رشد جلبک‌ها است که بستر آبی مورد نیاز برای رشد و پرورش جلبک‌ها در کنار مواد مغذی را فراهم می‌کند. بر اساس تحقیقات انجام شده تولید هر لیتر سوخت از جلبک‌ها نیازمند ۱۵۰ لیتر آب است [۱۹]. این میزان قابل توجه آب مورد نیاز مانع عمده‌ای برای تولید در مقیاس عظیم سوخت جلبکی محسوب می‌شود. برای کاهش این مشکل، می‌توان از قابلیت رشد جلبک‌ها در آب شور و فاضلاب‌ها بهره برد. بر این اساس در مدل طراحی شبکه پیشنهادی از آب شور و فاضلاب علاوه بر آب شیرین برای تأمین آب استفاده می‌شود. کربن دی‌اکسید ماده اولیه مهم دیگری است که در فرایند فتوسنتز جلبک‌ها همانند سایر گیاهان مورد نیاز است. از آنجایی که جلبک‌ها زیر سطح آب رشد می‌کنند میزان جذب کربن دی‌اکسید آن‌ها از اتمسفر به علت برگشت‌پذیری سطحی آب کافی نیست؛ لذا استفاده از یک منبع کربن دی‌اکسید غلیظ الزامی است [۱۸]. اگرچه می‌توان از منابع مختلفی برای تأمین کربن دی‌اکسید استفاده نمود، کربن دی‌اکسید منتشر شده از نیروگاه‌های تولید برق، منبع شناخته شده کربن دی‌اکسید محسوب می‌شود [۲۰]. نیتروژن و فسفر دو ماده مغذی اصلی مورد نیاز برای رشد جلبک‌ها محسوب می‌شوند [۱۹]. این دو ماده مغذی به‌وسیله تهیه کودهای کشاورزی تأمین می‌شوند. به‌علاوه از آنجایی که فاضلاب‌ها دارای مقادیر بالایی از مواد مغذی هستند، در صورت استفاده از فاضلاب، می‌توان مواد مغذی مورد نیاز را به‌وسیله کودهای کشاورزی و فاضلاب تأمین نمود.

### ۲-۲-۲-۲ سایت‌های تولید

در ردیف میانی مدل زنجیره تأمین پیشنهادی سایت‌های تولید قرار دارند. این سایت‌های تولید بر اساس چرخه تولید سوخت از جلبک‌ها کار می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر بعد از منتقل شدن مواد

اولیه موردنیاز به سایت‌های تولید، جلبک‌ها کشت داده شده و بعد از فرایند خشک کردن، روغن آن‌ها استخراج شده و سپس روغن استخراجی به سوخت تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است برای مدل‌سازی ریاضی فرایندهای سایت‌های تولید، فرض می‌شود که پروسه تولید سوخت در دو مرحله انجام می‌شوند. در مرحله اول حوضچه‌های تولید جلبک قرار دارند که به میزان نرخ رشد جلبک‌ها (مقدار ماده خشک به ازای هر هکتار) ضربدر مساحت کل حوضچه‌ها (هکتار) جلبک خشک تولید می‌کنند. نتیجتاً ظرفیت سایت‌های تولید با توجه به مساحت حوضچه‌ها تعریف می‌شود. در مرحله دوم جلبک‌های خشک تولید شده با یک نرخ تبدیل به سوخت دیزل سبز تبدیل می‌شود.

### ۲-۲-۳ نواحی تقاضا

در لایه آخر زنجیره تأمین جلبک‌ها نواحی تقاضای سوخت قرار دارند. از آنجایی که در مراحل اولیه توسعه سوخت‌های سبز از جلبک‌ها نمی‌توان انتظار داشت که توزیع سوخت در تمام کشور انجام شود، تعدادی استان به‌صورت بازارهای آزمایشی در نظر گرفته شده و عرضه سوخت در این استان‌ها انجام می‌گیرد.

### ۲-۲-۴ حمل و نقل

برای برقراری ارتباط میان بخش‌های زنجیره تأمین پیشنهادی، دو روش حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود: انتقال به‌وسیله خط لوله و تانکر حمل. از آنجایی که آب، فاضلاب و کربن دی‌اکسید لازم است به‌صورت بی‌وقفه به سایت‌های تولید منتقل شود، خط لوله برای انتقال آن‌ها به کار گرفته می‌شود. با توجه به این که استفاده از تانکرهای حمل برای انتقال سوخت بنزین و دیزل عملکرد مناسبی داشته است [۱۹]، تانکرهای حمل برای انتقال سوخت سبز تولیدی در سایت‌های تولید به بازارهای آزمایشی در نظر گرفته می‌شود.

### ۲-۳ مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین

#### ۲-۳-۱ نمادهای مدل

در این بخش مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه می‌شود. پیش از ارائه مدل، نمادهای به کار گرفته شده در مدل تشریح می‌شود. لازم به ذکر است پارامترهای غیرقطعی با "ˆ" نشان داده شده‌اند.

مجموعه‌ها	
C	مجموعه منبع‌های کربن دی‌اکسید (نیروگاه‌های تولید برق)،
F	مجموعه منبع‌های آب شیرین،
W	مجموعه منبع‌های فاضلاب،
S	مجموعه منبع‌های آب شور،
I	مجموعه مکان‌های کاندید برای سایت‌های تولید،
Q	مجموعه سطوح مختلف ظرفیت، $(q_f, q_s, q_w, q_c \in Q)$
T	مجموعه دوره‌های زمانی،
M	مجموعه نواحی تقاضا،
پارامترها	
$t\tilde{f}_{f \rightarrow i}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد آب شیرین از منبع $f$ به سایت تولید $i$
$t\tilde{w}_{w \rightarrow i}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد فاضلاب از منبع $w$ به سایت تولید $i$
$t\tilde{s}_{s \rightarrow i}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد آب شور از منبع $s$ به سایت تولید $i$
$t\tilde{c}_{c \rightarrow i}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد کربن دی‌اکسید از منبع $c$ به سایت تولید $i$
$t\tilde{b}_{i \rightarrow m}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد بایودیزل از سایت تولید $i$ به مکان تقاضا $m$
$cp\tilde{f}_f^t$	مقدار آب شیرین در دسترس در ناحیه $f$ در دوره زمانی $t$
$cp\tilde{w}_w^t$	مقدار فاضلاب در دسترس در ناحیه $w$ در دوره زمانی $t$
$cp\tilde{s}_s^t$	مقدار آب شور در دسترس در ناحیه $s$ در دوره زمانی $t$
$cp\tilde{c}_c^t$	مقدار کربن دی‌اکسید در دسترس در ناحیه $c$ در دوره زمانی $t$
$\tilde{C}_{i,q}$	هزینه احداث سایت تولید $i$ با ظرفیت $q$
$\tilde{O}_i$	هزینه تولید هر واحد بایودیزل در سایت تولید $i$
$\tilde{C}_{q_f}^{f \rightarrow i}$	هزینه احداث خط لوله با ظرفیت $q_f$ از منبع $f$ به سایت تولید $i$
$\tilde{C}_{q_w}^{w \rightarrow i}$	هزینه احداث خط لوله با ظرفیت $q_w$ از منبع $w$ به سایت تولید $i$
$\tilde{C}_{q_s}^{s \rightarrow i}$	هزینه احداث خط لوله با ظرفیت $q_s$ از منبع $s$ به سایت تولید $i$
$\tilde{C}_{q_c}^{c \rightarrow i}$	هزینه احداث خط لوله با ظرفیت $q_c$ از منبع $c$ به سایت تولید $i$
$cp_{q_f}^{f \rightarrow i}$	حداکثر میزان انتقال خط لوله $f \rightarrow i$ با ظرفیت $q_f$
$cp_{q_w}^{w \rightarrow i}$	حداکثر میزان انتقال خط لوله $w \rightarrow i$ با ظرفیت $q_w$
$cp_{q_s}^{s \rightarrow i}$	حداکثر میزان انتقال خط لوله $s \rightarrow i$ با ظرفیت $q_s$
$cp_{q_c}^{c \rightarrow i}$	حداکثر میزان انتقال خط لوله $c \rightarrow i$ با ظرفیت $q_c$
$\tilde{\varphi}_n$	نیترژن موجود در هر واحد فاضلاب



$\tilde{\varphi}_p$	فسفر د موجود در هر واحد فاضلاب
$\tilde{p}_n^t$	قیمت هر واحد نیتروژن در دوره زمانی $t$
$\tilde{p}_p^t$	قیمت هر واحد فسفر در دوره زمانی $t$
$\tilde{h}_i$	هزینه نگهداری هر واحد بایودیزل در سایت تولید $i$
$\sigma$	نرخ تبدیل جلبک خشک شده به بایودیزل
$\tilde{d}_{m,t}$	میزان تقاضا در ناحیه $m$ در دوره $t$
$\delta_q$	مساحت حوضچه‌های سایت تولید با ظرفیت $q$
$\tilde{q}_i^t$	مقدار تولید جلبک خشک به ازای هر واحد سطح در سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$
$\beta_w$	آب موردنیاز به ازای هر واحد جلبک خشک تولیدی
$\beta_n$	نیتروژن موردنیاز به ازای هر واحد جلبک خشک تولیدی
$\beta_p$	فسفر موردنیاز به ازای هر واحد جلبک خشک تولیدی
$\beta_c$	کربن دی‌اکسید موردنیاز به ازای هر واحد جلبک خشک تولیدی
متغیرهای تصمیم	
$xf_{f \rightarrow i}^t$	مقدار آب شیرین انتقالی از منبع $f$ به سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$
$xw_{w \rightarrow i}^t$	مقدار فاضلاب انتقالی از منبع $w$ به سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$
$xs_{s \rightarrow i}^t$	مقدار آب شور انتقالی از منبع $s$ به سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$
$xc_{c \rightarrow i}^t$	مقدار کربن دی‌اکسید انتقالی از منبع $c$ به سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$
$xb_{i \rightarrow m}^t$	مقدار بایودیزل انتقالی از سایت تولید $i$ به ناحیه تقاضا $m$ در دوره زمانی $t$
$v_i^t$	مقدار ذخیره بایودیزل در سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$
$xn_i^t$	مقدار کود نیتروژن خریداری شده در سایت تولید $i$ در دوره $t$
$xp_i^t$	مقدار کود فسفر خریداری شده در سایت تولید $i$ در دوره $t$
$L_{q_f}^{f \rightarrow i}$	متغیر ۰-۱، برابر با ۱ در صورت ساخت خط لوله با ظرفیت $q_f$ بین منبع $f$ و سایت $i$ ، در غیر این صورت
$L_{q_w}^{w \rightarrow i}$	متغیر ۰-۱، برابر با ۱ در صورت ساخت خط لوله با ظرفیت $q_w$ بین منبع $w$ و سایت $i$ ، در غیر این صورت
$L_{q_c}^{c \rightarrow i}$	متغیر ۰-۱، برابر با ۱ در صورت ساخت خط لوله با ظرفیت $q_c$ بین منبع $c$ و سایت $i$ ، در غیر این صورت
$L_{q_s}^{s \rightarrow i}$	متغیر ۰-۱، برابر با ۱ در صورت ساخت خط لوله با ظرفیت $q_s$ بین منبع $s$ و سایت $i$ ، در غیر این صورت
$Y_{i,q}$	متغیر ۰-۱، برابر با ۱ در صورت ساخت سایت تولید با ظرفیت $q$ در ناحیه $i$ ، در غیر این صورت

## ۲-۳-۲ تابع هدف

هزینه‌های زنجیره تأمین جلیک‌ها شامل: هزینه‌های انتقال مواد اولیه از منبع‌ها به سایت‌های تولید (FC)، هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای لوله‌گذاری (PC)، هزینه تهیه مواد مغذی موردنیاز (EC)، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری سایت‌های تولید (PF)، هزینه‌های موجودی (IC) و هزینه‌های انتقال بایودیزل از سایت‌های تولید به نواحی تقاضا (BC) است. تابع هدف (۱)

هزینه‌های ذکر شده را در طول افق برنامه‌ریزی کمینه می‌کند.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z &= FC + PC + EC + PF + IC + BC \\
 FC &= \sum_f \sum_i \sum_t t \tilde{f}_{f \rightarrow i} x_{f \rightarrow i}^t + \sum_s \sum_i \sum_t t \tilde{s}_{s \rightarrow i} x_{s \rightarrow i}^t + \sum_w \sum_i \sum_t t \tilde{w}_{w \rightarrow i} x_{w \rightarrow i}^t \\
 &\quad + \sum_c \sum_i \sum_t t \tilde{c}_{c \rightarrow i} x_{c \rightarrow i}^t \\
 PC &= \sum_f \sum_i \sum_{q_f} \tilde{C}_{q_f}^{f \rightarrow i} L_{q_f}^{f \rightarrow i} + \sum_s \sum_i \sum_{q_s} \tilde{C}_{q_s}^{s \rightarrow i} L_{q_s}^{s \rightarrow i} + \sum_w \sum_i \sum_{q_w} \tilde{C}_{q_w}^{w \rightarrow i} L_{q_w}^{w \rightarrow i} \\
 &\quad + \sum_c \sum_i \sum_{q_c} \tilde{C}_{q_c}^{c \rightarrow i} L_{q_c}^{c \rightarrow i} \\
 EC &= \sum_i \sum_t \tilde{p}_n^t x_n^t + \sum_i \sum_t \tilde{p}_p^t x_p^t \\
 PF &= \sum_i \sum_m \sum_t \tilde{O}_i x_{b_{i \rightarrow m}}^t + \sum_i \sum_q \tilde{C}_{i,q} Y_{i,q} \\
 IC &= \sum_i \sum_t \tilde{h}_i v_i^t \\
 BC &= \sum_i \sum_m \sum_t t \tilde{b}_{i,m} x_{b_{i \rightarrow m}}^t
 \end{aligned} \tag{1}$$

## ۳-۳-۲ محدودیت‌ها

مقدار در دسترس مواد اولیه (آب شیرین، آب شور، فاضلاب و کربن دی‌اکسید) در مناطق مختلف و همچنین فصول متفاوت سال متغیر است. محدودیت‌های (۲) تا (۵) تضمین می‌کند که مقدار برداشت این مواد اولیه از منبعشان از حداکثر مقدار قابل در دسترس تجاوز نکند.

$$\sum_i x_{f \rightarrow i}^t \leq \tilde{c} p_f^t \quad \forall f, t \tag{2}$$

$$\sum_i x_{s \rightarrow i}^t \leq \tilde{c} p_s^t \quad \forall s, t, \tag{3}$$

$$\sum_i x_{w \rightarrow i}^t \leq \tilde{c} p_w^t \quad \forall w, t, \tag{4}$$

$$\sum_i xc_{c \rightarrow i}^t \leq \tilde{c}p_c^t \quad \forall c, t, \quad (5)$$

محدودیت (۶) تضمین می‌کند که مقدار آب موردنیاز در هر سایت تولید که برابر با ضرب مقدار جلبک تولیدی  $(\tilde{Q}_{i,t}^q \delta_q)$  در آب موردنیاز به ازای هر واحد جلبک تولیدی است، به‌وسیله آب‌های شیرین، آب‌های شور و فاضلاب تضمین شود. به‌علاوه از آنجا که سایت‌های تولید فقط می‌تواند بر اساس یکی از گونه‌های آب شیرین یا آب‌شور کار کند محدودیت (۷) تضمین می‌کند که فقط یکی از این دو نوع آب به سایت‌های تولید منتقل شود.

$$\sum_q \beta_w \tilde{Q}_{i,t}^q \delta_q Y_{i,q} \leq \sum_f x f_{f \rightarrow i}^t + \sum_s x s_{s \rightarrow i}^t + \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, \quad (6)$$

$$\sum_f \sum_{q_f} L_{q_f}^{f \rightarrow i} + \sum_s \sum_{q_s} L_{q_s}^{s \rightarrow i} \leq 1 \quad \forall i, \quad (7)$$

محدودیت (۸) تضمین می‌کند که مقدار نیتروژن موردنیاز در هر سایت و هر دوره از طریق فاضلاب منتقل شده به سایت تولید و نیتروژن خریداری از بازار آزاد تأمین شود. شرایط مشابهی برای فسفر وجود دارد که در محدودیت (۹) نشان داده شده است. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که مقدار کربن دی‌اکسید موردنیاز از کربن دی‌اکسید منتقل شده از نیروگاه‌ها تجاوز نکند.

$$\sum_q \beta_n \tilde{Q}_{i,t}^q \delta_q Y_{i,q} \leq \tilde{\varphi}_n \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t + x n_i^t \quad \forall i, t, \quad (8)$$

$$\sum_q \beta_p \tilde{Q}_{i,t}^q \delta_q Y_{i,q} \leq \tilde{\varphi}_p \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t + x p_i^t \quad \forall i, t, \quad (9)$$

$$\sum_q \beta_c \tilde{Q}_{i,t}^q \delta_q Y_{i,q} \leq \sum_c x c_{c \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, \quad (10)$$

محدودیت (۱۱) نشان می‌دهد که مقدار سوخت تولید شده در هر سایت و در هر دوره به‌علاوه موجودی سوخت ذخیره شده در انتهای دوره قبل بیشتر از سوخت منتقل شده از سایت تولید به نواحی تقاضا و موجودی در انتهای دوره فعلی است.

$$\sum_q \sigma \tilde{Q}_{i,t}^q \delta_q Y_{i,q} + v_i^{t-1} \geq \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t + v_i^t \quad \forall i, t, \quad (11)$$

محدودیت‌های (۱۲) تا (۱۵) تضمین می‌کند که در صورت ساخت خط لوله آب شیرین، شور، فاضلاب و کربن دی‌اکسید، مقدار ماده انتقالی در آن‌ها از ظرفیت خط لوله تجاوز نکند.

$$x f_{f \rightarrow i}^t \leq \sum_{q_f} c p_{q_f}^{f \rightarrow i} L_{q_f}^{f \rightarrow i} \quad \forall f, i, t, \quad (12)$$

$$x s_{s \rightarrow i}^t \leq \sum_{q_s} c p_{q_s}^{s \rightarrow i} L_{q_s}^{s \rightarrow i} \quad \forall s, i, t, \quad (13)$$

$$xw_{w \rightarrow i}^t \leq \sum_{q_w} cp_{q_w}^{w \rightarrow i} L_{q_w}^{w \rightarrow i} \quad \forall w, i, t, \quad (14)$$

$$xc_{c \rightarrow i}^t \leq \sum_{q_c} cp_{q_c}^{c \rightarrow i} L_{q_c}^{c \rightarrow i} \quad \forall c, i, t, \quad (15)$$

محدودیت‌های (۱۶) تا (۲۰) تضمین می‌کند که فقط یک سطح ظرفیت برای هر سایت تولید و هر خط لوله آب شیرین، آب شور و فاضلاب انتخاب شود.

$$\sum_q Y_{i,q} \leq 1 \quad \forall i, \quad (16)$$

$$\sum_{q_f} L_{q_f}^{f \rightarrow i} \leq 1 \quad \forall f, i, \quad (17)$$

$$\sum_{q_s} L_{q_s}^{s \rightarrow i} \leq 1 \quad \forall s, i, \quad (18)$$

$$\sum_{q_w} L_{q_w}^{w \rightarrow i} \leq 1 \quad \forall w, i, \quad (19)$$

$$\sum_{q_c} L_{q_c}^{c \rightarrow i} \leq 1 \quad \forall c, i, \quad (20)$$

محدودیت (۲۱) نشان می‌دهد که مقدار سوخت عرضه‌شده به نواحی تقاضا از میزان تقاضای آن نواحی در هر دوره بیشتر باشد.

$$\sum_i \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t \geq \tilde{d}_{m,t} \quad \forall m, t \quad \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (21)$$

### ۳- رویکردهای بهینه‌سازی استوار

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد در این مقاله از رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت مجموعه عدم قطعیت مربع (نرم بینهایت بردار داده‌های غیرقطعی) و رویکرد بهینه‌سازی استوار با بودجه عدم قطعیت (رویکرد برتسیماس و سیم) برای مقابله با عدم قطعیت استفاده شده است. در ادامه این دو رویکرد تشریح می‌شوند و سپس مدل‌های استوار زنجیره تأمین بر اساس آن‌ها فرمول‌بندی می‌شوند.

#### ۳-۱ رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت مجموعه عدم قطعیت مربع

برای توصیف رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت مجموعه عدم قطعیت مربع مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر بگیرید:

Min  $cx$

$$s.t : \sum_j a_{ij}x_j - \sum_{j \in J_i} \xi_{ij} \hat{a}_{ij}x_j \geq b_i \quad (22)$$

$x \in X$

که در آن ضرایب  $\tilde{a}_{ij}$  در معرض عدم قطعیت قرار گرفته‌اند. برای توسعه مدل استوار این مدل برنامه‌ریزی خطی، هر یک از ضرایب  $\tilde{a}_{ij}$  به‌صورت یک متغیر تصادفی که در بازه  $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$  مقدار می‌گیرد، مدل‌سازی می‌شوند. در این بازه،  $a_{ij}$  و  $\hat{a}_{ij}$  به ترتیب نشان‌دهنده مقدار اسمی و دامنه نوسان پارامتر غیرقطعی است. با توجه به این فرضیات، هر پارامتر غیرقطعی  $\tilde{a}_{ij}$  می‌تواند با مقدار معادل زیر جایگزین شود:

$$\tilde{a}_{ij} = a_{ij} + \xi_{ij} \hat{a}_{ij} \quad (23)$$

که در آن  $\xi_{ij}$  متغیر تصادفی مستقلی است که در بازه  $[-1, 1]$  به‌صورت متقارن مقدار می‌گیرد و  $J_i$  نشان‌دهنده مجموعه پارامترهای غیرقطعی محدودیت  $i$  است. با جایگزینی ضرایب  $\tilde{a}_{ij}$  با مقدار معادل، محدودیت  $i$  مدل برنامه‌ریزی (۲۲) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\sum_j a_{ij}x_j - \sum_{j \in J_i} \xi_{ij} \hat{a}_{ij}x_j \geq b_i \quad (24)$$

با تعریف مجموعه عدم قطعیت  $U$ ، مدل همزاد استوار محدودیت (۲۴) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_j a_{ij}x_j - \max_{\xi \in U} \left\{ \sum_{j \in J_i} \xi_{ij} \hat{a}_{ij}x_j \right\} \geq b_i \quad (25)$$

در این مدل، متغیر  $\xi$  در مجموعه عدم قطعیت  $U$  نوسان می‌کند. همان‌طور که آشکار است مدل همزاد استوار وابسته به نوع مجموعه عدم قطعیت است و تحت مجموعه‌های عدم قطعیت مختلف تغییر می‌کند.

قضیه ۱: مدل همزاد استوار (۲۵) تحت مجموعه عدم قطعیت مربع معادل فرم برنامه‌ریزی خطی زیر است:

$$\sum_j a_{ij}x_j - \left[ \psi \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j| \right] \geq b_i \quad (26)$$

اثبات: برای اثبات از فرم برنامه‌ریزی مخروطی مدل (۲۵) استفاده می‌شود. فرم برنامه‌ریزی مخروطی بخش بهینه‌سازی درونی مدل (۲۵) به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۱۵]:

$$\max_{\xi \in U} \left\{ \sum_{j \in J_i} \xi_j \hat{a}_{ij} x_j : P_\infty \xi + p_\infty \in K_\infty \right\} \quad (27)$$

با تعریف مجموعه عدم قطعیت  $U$  بر اساس نرم بینهایت و با معرفی پارامتر  $\psi$  به عنوان کنترل کننده ابعاد این مجموعه عدم قطعیت،  $U_\infty$ ،  $P_\infty$  و  $p_\infty$  به صورت زیر در فضای مخروطی در نظر گرفته می شوند:

$$U_\infty = \left\{ \xi \mid \|\xi_j\| \leq \psi, \forall j \in J_i \right\} \quad (28)$$

$$P_\infty = [I_{L \times L}; 0_{1 \times L}] \quad (29)$$

$$p_\infty = [0_{L \times 1}; \psi] \quad (30)$$

با تعریف متغیر دوگان  $y = [w_i; \tau_i] \in R^{L+1}$  و مخروط دوگان  $K_\infty = \left\{ [\theta_{L \times 1}; t] \in R^{L+1} \mid \|\theta\|_1 \leq t \right\}$  دوگان مدل برنامه ریزی مخروطی (27) به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$\min \left\{ \psi \tau_i : w_{ij} = \hat{a}_{ij} x_j \quad \forall j, \|w_i\|_1 \leq \tau_i \right\} \quad (31)$$

با جایگزینی  $\|w_i\|_1 = \sum_{j \in J_i} w_{ij}$  به جای  $\tau_i$  در مدل (31)، مدل برنامه ریزی زیر حاصل می شود:

$$\min \left\{ \psi \sum_{j \in J_i} |w_{ij}| : w_{ij} = \hat{a}_{ij} x_j \right\} = \psi \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j| \quad (32)$$

همان طور که مشخص است این رویکرد هر یک از پارامترهای غیرقطعی را به اندازه  $\psi \hat{a}_{ij}$  به سمت بدترین مقدار محتملشان سوق می دهد. بنابراین پارامتر قابل تنظیم  $\psi$  مشخص می کند که پارامترهای غیرقطعی به چه میزان به سمت بدترین مقدارشان حرکت کنند.

### ۳-۲ رویکرد بهینه سازی استوار با بودجه عدم قطعیت

برای توصیف رویکرد بهینه سازی استوار با بودجه عدم قطعیت مدل برنامه ریزی خطی پایه (22) را مجدداً در نظر گرفته می شود. در این رویکرد نیز ضرایب غیرقطعی  $\tilde{a}_{ij}$  توزیع متقارنی در بازه  $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$  خواهند داشت. به علاوه در این رویکرد برای هر محدودیت  $i$  یک پارامتر  $\Gamma_i$  که بودجه عدم قطعیت نامیده می شود، معرفی می شود تا استحکام مدل را در برابر درجه محافظه کاری جواب نهایی تنظیم کند. پارامتر  $\Gamma_i$  که لزوماً عدد صحیح نیست در بازه  $[0, |J_i|]$

مقدار می‌گیرد که  $|j_i|$  نشان‌دهنده تعداد پارامترهای غیرقطعی محدودیت  $i$  ام مدل است (کاردینالیته مجموعه  $j_i$ ). نقش پارامتر  $\Gamma_i$  این است که تعداد  $[\Gamma_i]$  از ضرایب غیرقطعی را به‌صورت کامل به بدترین مقدارشان سوق می‌دهد و یک ضریب دیگر ( $\hat{a}_{ij}$ ) را به‌اندازه  $(\Gamma_i - [\Gamma_i])\hat{a}_{ij}$  به سمت بدترین مقدارشان تغییر می‌دهد. لازم به ذکر است در رویکرد بهینه‌سازی استوار تحت مجموعه عدم قطعیت مربع هر یک از پارامترهای غیرقطعی به‌اندازه  $\psi\hat{a}_{ij}$  به سمت بدترین مقدارشان تغییر داده می‌شوند. بر اساس توضیحات داده شده فرم غیر خطی مدل برنامه‌ریزی (۲۲) به‌صورت زیر است:

Min  $cx$

$$s.t.: \sum_j a_{ij}x_j - \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \in J_i, |S_i| = \Gamma_i, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij}x_j + (\Gamma_i - \Gamma_i)\hat{a}_{ij}x_j \right\} \geq b_i \quad (33)$$

$$X \geq 0$$

با فرض جواب بهینه  $x_j^*$ ، بخش بهینه‌سازی داخلی مدل (۳۳)، معادل با مدل برنامه‌ریزی خطی زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Max } & \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j^*| \eta_{ij} \\ \text{s.t. } & \sum_{j \in J_i} \eta_{ij} \leq \Gamma_i \\ & 0 \leq \eta_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J_i \end{aligned} \quad (34)$$

بر اساس قضیه قوی دوگان، با توجه به این‌که مدل (۳۴) به ازای تمام مقادیر  $\Gamma_i$  شدنی و محدود است، دوگان مدل (۳۴) نیز محدود و شدنی و با مقدار تابع هدف یکسان است. لذا مدل (۳۴) می‌تواند با مدل دوگانش جایگزین شود. با تعریف متغیرهای دوگان  $k_{ij}$  و  $\lambda_i$  دوگان آن به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \Gamma_i \lambda_i + \sum_{j \in J_i} k_{ij} \\ \text{s.t. } & \lambda_i + k_{ij} \geq \hat{a}_{ij} |x_j^*| \quad \forall i, j \in J_i \\ & k_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in J_i, \quad \lambda_i \geq 0 \quad \forall i \end{aligned} \quad (35)$$

## ۳-۳ عدم قطعیت در پارامترهای عرضه و تقاضا

از آنجایی که بخشی از محدودیت‌های مدل‌های طراحی شبکه فقط یک ضریب غیرقطعی در سمت راست دارند (محدودیت‌های عرضه و تقاضا)، در ادامه رویکرد بهینه‌سازی استوار در ارتباط با چنین محدودیت‌هایی در نظر گرفته می‌شود. برای این هدف، برای هر یک از ضرایب غیرقطعی سمت راست مدل برنامه‌ریزی خطی (۲۲) همانند سایر ضرایب عدم قطعیت توزیع متقارنی به شکل  $[b_i - \hat{b}_i, b_i + \hat{b}_i]$  در نظر گرفته و یک بودجه عدم قطعیت با محدوده  $[0, 1]$  به کار گرفته می‌شود. با توجه به این توضیحات، همزاد استوار مدل (۲۲) می‌تواند به صورت نشان داده شود:

$$\begin{aligned} & \text{Min } cx \\ & \text{s.t. : } \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \geq b_i + \max \hat{b}_i \eta_i \quad \forall i \\ & 0 \leq \eta_i \leq \Gamma'_i \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (36)$$

که معادل با مسئله برنامه‌ریزی خطی زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Min } cx \\ & \text{s.t. : } \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \geq b_i + \Gamma'_i \hat{b}_i \quad \forall i \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (37)$$

در این مدل زمانی که  $\Gamma'_i$  در مقادیر صفر و ۱ تنظیم می‌شود به ترتیب هیچ محافظت و محافظت کامل در برابر عدم قطعیت وجود دارد. به علاوه تغییر دادن  $\Gamma'_i$  در بازه  $(0, 1)$  کمک به کنترل درجه محافظه‌کاری جواب استوار می‌کند.

موضوع مهم دیگر در مدل‌های بهینه‌سازی استوار نحوه کنترل درجه محافظه‌کاری جواب استوار است. همان‌طور که مشاهده شد پارامترهای قابل تنظیم  $\psi$  و  $\Gamma$  تعیین‌کننده میزان نقض محدودیت‌ها است. مقادیر بالاتر این پارامترهای قابل تنظیم، پارامترها را به مقدار بیشتری به سمت بدترین مقدارشان (در مدل استوار تحت مجموعه عدم قطعیت مربع) و تعداد بیشتری از پارامترها را به سمت بدترین مقدارشان (در مدل استوار با بودجه عدم قطعیت) سوق می‌دهد و نتیجتاً احتمال نقض محدودیت‌ها به ازای مقادیر مختلف پارامترهای غیرقطعی کمتر می‌شود. برای تنظیم مقدار پارامترهای  $\psi$  و  $\Gamma$  می‌توان از حد بالای محاسبه شده برای احتمال نقض محدودیت‌ها استفاده نمود. حد بالای احتمال نقض محدودیت  $i$  در رویکرد استوار تحت مجموعه عده قطعیت مربع و رویکرد استوار با بودجه عدم قطعیت به ترتیب به صورت  $\kappa = \exp(-\psi_i^2 / 2)$



و  $\kappa = \exp(-\Gamma_i^r / 2|j_i|)$  محاسبه شده است. بنابراین قابلیت اطمینان برای هر محدودیت به‌صورت  $(1 - \kappa)$  محاسبه می‌شود [۱۵].

#### ۴- مدل‌های استوار طراحی شبکه زنجیره تأمین

در این بخش مدل‌های همزاد استوار برای مدل قطعی طراحی زنجیره تأمین جلبک‌ها ارائه می‌شوند. در ابتدا تابع هدف و محدودیت‌هایی با بیش از یک پارامتر غیرقطعی بر اساس رویکردهای بهینه‌سازی توصیف شده در بخش ۳ فرمول‌بندی می‌شوند و در انتها همزاد استوار محدودیت‌های عرضه و تقاضا (محدودیت‌ها با یک پارامتر غیرقطعی) توسعه داده می‌شود.

#### ۴-۱ مدل استوار زنجیره تأمین تحت مجموعه قطعیت مربع

##### ۴-۱-۱ محدودیت‌ها

برای محدودیت (۶) که بیش از یک پارامتر غیرقطعی را در برمی‌گیرد، مدل همزاد استوار به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_q \beta_w \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \psi \sum_q \beta_w \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \leq \sum_f x f_{f \rightarrow i}^t + \sum_s x s_{s \rightarrow i}^t + \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, \quad (38)$$

به طریقه مشابهی همزاد استوار محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\sum_q \beta_c \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \psi \sum_q \beta_c \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \leq \sum_c x c_{c \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, \quad (39)$$

$$\sum_q \sigma \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} - \psi \sum_q \sigma \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + v_i^{t-1} \geq \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t + v_i^t \quad \forall i, t, \quad (40)$$

برای به دست آوردن همزاد استوار محدودیت‌ها (۸) و (۹)، یک متغیر کمکی  $x_o = -1$  برای انتقال ضریب سمت راست به سمت چپ به کار گرفته شده و سپس محدودیت‌های اصلی به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} & \sum_q \beta_n \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \varphi_n x_o \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \\ & + \psi \left( \sum_q \beta_n \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \varphi_n \hat{x}_o \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \right) \leq x n_i^t \quad \forall i, t \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} & \sum_q \beta_p \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \varphi_p x_o \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \\ & + \psi \left( \sum_q \beta_p \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \varphi_p \hat{x}_o \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \right) \leq x p_i^t \quad \forall i, t \end{aligned} \quad (41)$$

## ۴-۱-۲ تابع هدف

در این بخش همزاد استوار تابع هدف ارائه می‌شود. برای قابل کنترل بودن ابعاد فرمول‌بندی، فرم فشرده برداری تابع هدف را در نظر بگیرید:

$$\text{Min } \tilde{t}x + \tilde{c}y \quad (43)$$

که در آن بردارهای غیرقطعی  $\tilde{t}$  و  $\tilde{c}$  به ترتیب متناظر با هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری است؛ به علاوه بردارهای  $x$  و  $y$  به ترتیب نشان‌دهنده متغیرهای پیوسته و دودویی است. برای این که بتوان با تابع هدف همانند محدودیت‌ها برای به دست آوردن همزاد استوار برخورد کرد، تابع هدف به صورت معادل به محدودیت (۴۵) منتقل می‌شود:

$$\text{Min } Z \quad (44)$$

$$\tilde{t}x + \tilde{c}y \leq Z \quad (45)$$

حال محدودیت (۴۵) به فرم استوار زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$tx + cy + \psi(\tilde{t}x + \tilde{c}y) \leq Z \quad (46)$$

## ۴-۲ مدل استوار زنجیره تأمین با بودجه عدم قطعیت

## ۴-۲-۱ محدودیت‌ها

با تعریف متغیرهای دوگان  $k_{i,q}$  و  $\lambda_{i,t}$ ، همزاد استوار محدودیت (۶) بر اساس رویکرد بهینه‌سازی استوار با بودجه عدم قطعیت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_q \beta_w \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \sum_q k_{i,t,q} + \Gamma_{i,t} \lambda_{i,t} \leq \sum_f x f_{f \rightarrow i}^t + \sum_s x s_{s \rightarrow i}^t \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, \quad (47)$$

$$\lambda_{i,t} + k_{i,t,q} \geq \beta_w \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad \forall i, t, q, \quad (48)$$

$$k_{i,t,q}, \lambda_{i,t} \geq 0 \quad \forall i, t, q, \quad (49)$$

که در آن  $\Gamma_{i,t}$  بودجه عدم قطعیت است که در بازه  $[0, q]$  مقدار می‌گیرد؛  $q$  تعداد ضرایب غیرقطعی محدودیت (۶) است. به طریقه مشابهی همزاد استوار محدودیت‌ها (۱۰) و (۱۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_q \beta_c \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \sum_q k'_{i,t,q} + \Gamma'_{i,t} \lambda'_{i,t} \leq \sum_c x c_{c \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, \quad (50)$$

$$\lambda_{i,t}^{\downarrow} + k_{i,t,q}^{\downarrow} \geq \beta_c \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad \forall i, t, q, \quad (51)$$

$$k_{i,t,q}^{\downarrow}, \lambda_{i,t}^{\downarrow} \geq 0 \quad \forall i, t, q, \quad (52)$$

$$\sum_q \sigma \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} - \sum_q k_{i,t,q}^{\downarrow} - \Gamma_{i,t}^{\downarrow} \lambda_{i,t}^{\downarrow} + v_i^{t-1} \geq \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t + v_i^t \quad \forall i, t, \quad (53)$$

$$\lambda_{i,t}^{\uparrow} + k_{i,t,q}^{\uparrow} \geq \sigma \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad \forall i, t, q, \quad (54)$$

$$k_{i,t,q}^{\uparrow}, \lambda_{i,t}^{\uparrow} \geq 0 \quad \forall i, t, q, \quad (55)$$

برای به دست آوردن همزاد استوار محدودیت‌ها (۸) و (۹)، یک متغیر کمکی  $x_o = -1$  برای انتقال ضریب سمت راست به سمت چپ به کار گرفته شده و سپس محدودیت‌های اصلی به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$\sum_q \beta_n \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \varphi_n x_o \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t + \sum_q k_{i,t,q}^{\downarrow} + \sum_w k_{w \rightarrow i}^{\downarrow} + \Gamma_{i,t}^{\downarrow} \lambda_{i,t}^{\downarrow} \leq x n_i^t \quad \forall i, t, \quad (56)$$

$$\lambda_{i,t}^{\downarrow} + k_{i,t,q}^{\downarrow} \geq \beta_n \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad \forall i, t, q, \quad (57)$$

$$\lambda_{i,t}^{\downarrow} + k_{w \rightarrow i}^{\downarrow} \geq \hat{\varphi}_n x w_{w \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, w, \quad (58)$$

$$\lambda_{i,t}^{\downarrow}, k_{i,t,q}^{\downarrow}, k_{w \rightarrow i}^{\downarrow} \geq 0 \quad \forall i, t, q, w, \quad (59)$$

$$\sum_q \beta_p \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \varphi_p x_o \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t + \sum_q k_{i,t,q}^{\uparrow} + \sum_w k_{w \rightarrow i}^{\uparrow} + \Gamma_{i,t}^{\uparrow} \lambda_{i,t}^{\uparrow} \leq x p_i^t \quad \forall i, t, \quad (60)$$

$$\lambda_{i,t}^{\uparrow} + k_{i,t,q}^{\uparrow} \geq \beta_p \hat{\vartheta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad \forall i, t, q, \quad (61)$$

$$\lambda_{i,t}^{\uparrow} + k_{w \rightarrow i}^{\uparrow} \geq \hat{\varphi}_p x w_{w \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, w, \quad (62)$$

$$\lambda_{i,t}^{\uparrow}, k_{i,t,q}^{\uparrow}, k_{w \rightarrow i}^{\uparrow} \geq 0 \quad \forall i, t, q, w, \quad (63)$$

در اینجا  $\lambda_{i,t}^{\downarrow/\uparrow}, k_{i,t,q}^{\downarrow/\uparrow}, k_{w \rightarrow i}^{\downarrow/\uparrow}$  متغیرهای دوگان هستند و بودجه‌های  $\Gamma_{i,t}^{\downarrow/\uparrow}$  در بازه  $[0, q+w]$  مقدار می‌گیرند.

#### ۲-۲-۴ تابع هدف

برای به دست آوردن همزاد استوار تابع هدف در اینجا نیز تابع هدف در ابتدا به‌صورت معادل به محدودیت منتقل شده و سپس با معرفی بردارهای دوگان  $t^1$  و  $c^1$  فرم‌های استوار زیر حاصل می‌شود:

$$t x + c y + t^1 + c^1 + \Gamma^z p^z \leq Z \quad (64)$$

$$p^z + t^1 \geq \hat{t}x \quad (65)$$

$$p^z + c^1 \geq \hat{c}y \quad (66)$$

$$p^z, t^1, c^1 \in \mathcal{R}^+ \quad (67)$$

۳-۴ فرم استوار محدودیت‌های عرضه و تقاضا

در هر یک از محدودیت‌های (۲) تا (۵) و (۲۱) فقط ضریب سمت راست دارای عدم قطعیت می‌باشد. بنابراین بودجه‌های عدم قطعیت با مقدار در بازه  $[0, 1]$  معرفی شده و سپس محدودیت‌های اصلی به محدودیت‌های استوار زیر تبدیل می‌شود:

$$\sum_i x f_{f \rightarrow i}^t \leq c p f_f^t - \Gamma^{f,t} c \hat{p} f_f^t \quad \forall f, t, \quad (68)$$

$$\sum_i x w_{w \rightarrow i}^t \leq c p w_w^t - \Gamma^{w,t} c \hat{p} w_w^t \quad \forall w, t, \quad (69)$$

$$\sum_i x s_{s \rightarrow i}^t \leq c p s_s^t - \Gamma^{s,t} c \hat{p} s_s^t \quad \forall s, t, \quad (70)$$

$$\sum_i x c_{c \rightarrow i}^t \leq c p c_c^t - \Gamma^{c,t} c \hat{p} c_c^t \quad \forall c, t, \quad (71)$$

$$\sum_i \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t \geq d_{m,t} + \Gamma_{m,t} \hat{d}_{m,t} \quad \forall m, t, \quad (72)$$

#### ۵- مطالعه موردی

در این بخش برای ارزیابی عملکرد مدل طراحی شبکه پیشنهادی، یک مطالعه موردی در ارتباط با تولید سوخت سبز در کشور انجام گرفته است. لازم به ذکر است کلیه مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار GAMZ (solver CPLEX) بر روی کامپیوتر با مشخصات Core i7, 6GB RAM حل شده است.

#### ۵-۱ مفروضات و داده‌ها

برای این مطالعه موردی مفروضات و داده‌های زیر در نظر شده است:

(۱) برای مکان‌های کاندید سایت‌های تولید، ۱۴ منطقه (۳ منطقه در استان مازندران، ۳ منطقه در گیلان، ۲ منطقه در گلستان، ۲ منطقه در شیراز، ۱ منطقه در قزوین، ۱ منطقه در یزد، ۱ منطقه در کرج و ۱ منطقه در اصفهان بر اساس آنالیزهای GIS انتخاب شده‌اند. میزان رشد جلبک‌ها در این مناطق بر اساس مدل پوآسن با توجه به دما و تابش خورشید سالانه تخمین زده شده‌اند [۲۱].

(۲) هزینه‌های مراحل مختلف تولید سوخت به‌وسیله مطالعات اقتصادی-تکنولوژیکی انجام گرفته برای حوضچه‌هایی تولید به مساحت ۴۰۰ هکتار محاسبه شده‌اند [۱۸].

(۳) هزینه‌های مربوط به لوله‌گذاری آب بر اساس فهرست بهای واحد پایه رشته شبکه توزیع آب سال ۱۳۹۳ محاسبه شده است. این محاسبات بر اساس لوله‌گذاری با قطر ۲۰۰ میلی‌متر انجام شده است.

(۴) هزینه‌های مربوط به لوله‌گذاری گاز بر اساس فهرست بهای اختصاصی تأسیسات نفت و گاز سال ۱۳۹۰ تخمین زده شده است. این محاسبات بر اساس لوله‌های فولادی ۱۲ اینچی انجام شده است. به‌علاوه از آنجا که لوله‌های انتقال گاز نیاز به ساخت واحدهای تسخیر و نگهداری کربن دی‌اکسید در محل نیروگاه‌های تولید برق می‌باشد، ۲۰ درصد به هزینه‌های بالا اضافه می‌شود.

(۵) در مدل طراحی شبکه پیشنهادی سطوح ظرفیتی مختلفی برای خطوط انتقال لوله و سایت‌های تولید در نظر گرفته می‌شود. هزینه ظرفیت پایه برای آن‌ها بر اساس محاسبات بالا انجام گرفته و هزینه‌های ظرفیت بالاتر به‌وسیله رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$Cost_u = Cost_r \times \left( \frac{Cp}{Cp_r} \right)^\alpha$$

در این رابطه  $Cost_r$  هزینه سرمایه‌گذاری خط لوله با ظرفیت پایه  $Cp_r$ ،  $Cost_u$  هزینه سرمایه‌گذاری خط لوله با ظرفیت‌های بالاتر  $Cp$  و  $\alpha$  فاکتور مقیاس است [۹].

(۶) تعداد ۸ استان (شیراز، تهران، کرج، کرمان، قم، یزد، خراسان رضوی و تبریز) از میان استان‌های کشور با بیشترین سرانه انتشار  $CO_2$  [۲۲] به‌عنوان استان‌های کاندید برای عرضه سوخت در نظر گرفته شده و تأمین ۵٪ مصرف سوخت در این استان‌ها مورد هدف مدل طراحی شبکه قرار گرفته شده است.

(۷) مدل مربوطه برای بازه زمانی ۱ ساله متشکل از ۱۲ ماه بکار گرفته شده است.

(۸) سایر پارامترهای موردنیاز در جدول ۱ خلاصه شده است.

## ۵-۲ عملکرد مدل‌های قطعی و استوار

در ابتدا مدل‌های پیشنهادی قطعی و استوار طراحی شبکه زنجیره تأمین ریز جلیک‌ها از منظر هزینه کل زنجیره تأمین و عملکرد محاسباتی مقایسه شوند. جدول (۲) هزینه کل زنجیره تأمین و زمان محاسباتی مدل‌های زنجیره تأمین در حالت قطعی و استوار را نشان می‌دهد. در این آزمایش برای مدل‌های بهینه‌سازی استوار دامنه نوسان پارامترهای غیرقطعی در سطوح ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ تنظیم می‌شود. همچنین سطح محافظه‌کاری (قابلیت اطمینان) دو رویکرد

بهینه‌سازی استوار که به وسیله پارامترهای  $\Gamma$  و  $\Psi$  کنترل می‌شود در مقادیر  $0.70\%$ ،  $0.85\%$  و  $0.99\%$  تنظیم می‌شود.

جدول (۱): پارامتر و نرخ‌های تبدیل موردنیاز مدل

پارامتر	مقدار	مرجع
نرخ تبدیل جلبک خشک به بایودیزل	۰.۲۵٪	[۱۸]
نیترژن موجود در فاضلاب	۴۲ میلی‌گرم/لیتر	[۲۳]
فسفر موجود در فاضلاب	۶,۹ میلی‌گرم/لیتر	[۲۳]
آب موردنیاز تولید جلبک	۱۵۰ لیتر/کیلوگرم جلبک	[۲۰]
نیترژن موردنیاز تولید جلبک	۰,۰۸ کیلوگرم/کیلوگرم جلبک	[۲۰]
فسفر موردنیاز تولید جلبک	۰,۰۱۱ کیلوگرم/کیلوگرم جلبک	[۲۰]
کربن دی‌اکسید موردنیاز تولید جلبک	۲ کیلوگرم/کیلوگرم جلبک	[۲۰]

جدول (۲): هزینه کل زنجیره تأمین و زمان محاسباتی در مدل‌های قطعی و استوار

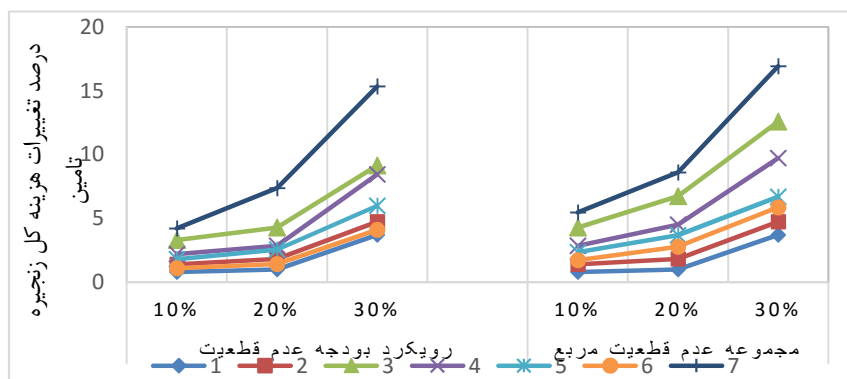
زمان محاسباتی (ثانیه)-هزینه کل زنجیره تأمین ( $\times 10^1$ ریال)		مدل بهینه‌سازی استوار		مدل قطعی		رویکردهای استوار
						دامنه
						نوسان
۷۰٪	۸۵٪	۹۹٪	۶۲۵	۴۳۶/۸۱		
۱۰٪	۷۰۲	۴۹۸/۴۵	۷۴۵	۵۲۷/۱۵	۵۷۴	۵۶۶/۲۵
۲۰٪	۵۱۱	۵۱۶/۱۴	۶۱۸	۵۷۴/۱۲	۶۱۴	۶۱۱/۲۴
۳۰٪	۷۲۵	۶۰۱/۱۴	۶۲۵	۶۶۰/۱۲	۷۲۵	۷۴۹/۲۵
۱۰٪	۵۲۴	۵۵۷/۴۵	۵۸۷	۵۷۸/۱۴	۵۸۷	۶۱۶/۴۵
۲۰٪	۸۱۱	۶۰۷/۱۸	۶۴۴	۶۴۹/۱۵	۵۴۷	۶۹۴/۱۴
۳۰٪	۸۲۱	۷۱۲/۱۴	۵۹۷	۷۷۴/۱۴	۷۱۱	۸۶۲/۱۴

همان‌طور که انتظار می‌رفت نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های استوار هزینه زنجیره تأمین بالاتری در مقایسه با مدل قطعی دارند. این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که مدل‌های استوار برای افزایش استواری زنجیره تأمین در برابر عدم قطعیت، پارامترهای غیرقطعی را به سمت بدترین مقادیر محتملشان سوق می‌دهد که منجر به افزایش هزینه کل زنجیره تأمین می‌شود. مقایسه هزینه دو

رویکرد استوار نشان می‌دهد که مجموعه عدم قطعیت مربع در مقایسه با رویکرد استوار با بودجه عدم قطعیت هزینه بالاتری برای زنجیره تأمین در نظر می‌گیرد. برای مثال با در نظر گرفتن درجه محافظه‌کاری ۰.۹۹٪، ۰.۳۰٪ نوسان داده در مدل استوار مجموعه عدم قطعیت مربع هزینه‌ای برابر با ۸۶۲،۱۴ (×۱۰<sup>۱۰</sup> ریال) به همراه خواهد داشت که ۰.۱۵٪ بیشتر از هزینه مدل استوار دیگر می‌باشد. از دیگر نتایج قابل تأمل این است که رویکردهای استوار خللی در رابطه با زمان محاسباتی ایجاد نکرده‌اند که مزیت مهمی برای رویکردهای مدل‌سازی عدم قطعیت محسوب می‌شود.

### ۵-۳ آنالیز عدم قطعیت در پارامترهای مختلف

در بخش ۵-۲ اثر هم‌زمان عدم قطعیت در تمام پارامترهای غیرقطعی بر هزینه کل زنجیره تأمین بررسی شد. در این بخش اثر هر یک از پارامترهای غیرقطعی بر هزینه زنجیره تأمین به‌صورت مجزا تحلیل می‌شود. انجام این کار آشکار می‌کند که عدم قطعیت در کدام پارامترهای زنجیره تأمین اثر نامطلوب‌تری بر هزینه کل دارد. نتیجتاً تصمیم‌گیرنده می‌تواند بخش‌های زنجیره تأمین را که لازم است تلاش‌های کاهش عدم قطعیت (تخمین دقیق‌تر مقدار پارامترها) بیشتر بر آن متمرکز شود را شناسایی کند تا اثرات نامطلوب عدم قطعیت را تا به‌صورت مناسب‌تری مهار کند. شکل (۲) اثر عدم قطعیت در پارامترهای غیرقطعی: (۱) میزان رشد جلبک‌ها، (۲) هزینه سرمایه‌گذاری لوله‌گذاری، (۳) هزینه عملیاتی انتقال خط لوله، (۴) هزینه سرمایه‌گذاری سایت‌های تولید، (۵) هزینه عملیاتی سایت‌های تولید، (۶) تقاضا و (۷) میزان در دسترس مواد اولیه را بر هزینه کل زنجیره تأمین تحت مقادیر مختلف نوسان داده نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، عدم قطعیت در پارامتر میزان رشد جلبک‌ها اثر بسیار قابل توجه بر هزینه کل دارد. برای مثال مدل استوار تحت مجموعه عدم قطعیت مربع نشان می‌دهد که نوسان‌های ۰.۱۰٪، ۰.۲۰٪ و ۰.۳۰٪ در پارامتر رشد منجر به ترتیب منجر به افزایش ۰.۵٪، ۰.۹٪ و ۱.۷٪ در هزینه کل زنجیره تأمین می‌شود. در میان سایر پارامترهای غیرقطعی، نوسان در داده‌های هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی سایت‌های تولید اثر قابل توجهی بر هزینه کل دارد؛ به‌طوری‌که منجر به افزایش ۸٪-۱۳٪ هزینه کل می‌شود. یک نتیجه‌گیری مهم از نتایج این بخش این است که تلاش هر چه بیشتر لازم است در جهت تخمین مقدار دقیق‌تر میزان رشد جلبک و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی سایت‌های تولید انجام گیرد؛ زیرا انحرافات اندک در این پارامترها هزینه کل را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد.



شکل (۲): اثر عدم قطعیت در پارامترهای مختلف غیرقطعی بر هزینه کل زنجیره تأمین تحت سطوح مختلف نوسان داده (درجه محافظه‌کاری ۰.۹۹٪)

#### ۴-۵ طراحی بهینه زنجیره تأمین در مدل‌های قطعی و استوار

از مهم‌ترین تصمیمات زنجیره تأمین جلبک‌ها موقعیت و ظرفیت سایت‌های تولید است. جدول (۳) موقعیت و ظرفیت بهینه سایت‌ها در مدل‌های قطعی و استوار را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج رویکردهای قطعی و استوار مکان‌های نسبتاً مشابهی را برای سایت‌ها تعیین می‌کند.

جدول (۳): موقعیت و ظرفیت سایت‌های تولید در مدل‌های قطعی و استوار.

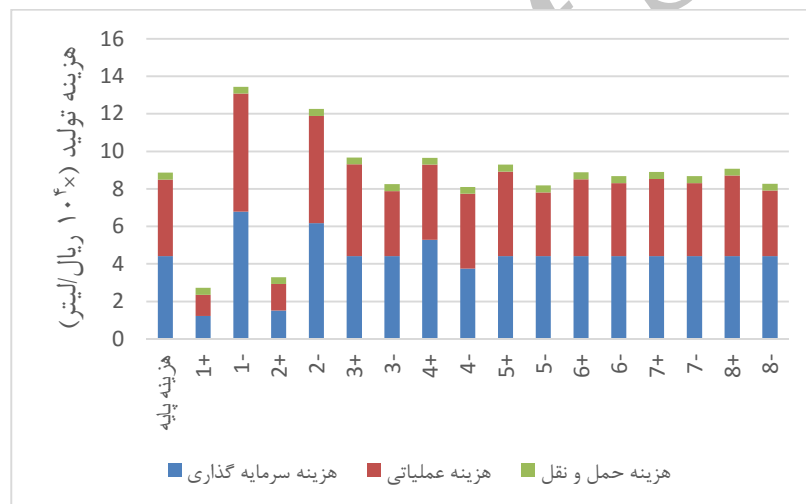
مدل قطعی		استوار با بودجه عدم قطعیت		استوار مجموعه عدم قطعیت مربع	
موقعیت	ظرفیت	موقعیت	ظرفیت	موقعیت	ظرفیت
مازندران (۱)	۵۰۰	مازندران (۱)	۶۰۰	مازندران (۱)	۷۰۰
مازندران (۳)	۴۰۰	مازندران (۳)	۸۰۰	مازندران (۳)	۸۰۰
گلستان (۱)	۶۰۰	گلستان (۱)	۷۰۰	گلستان (۱)	۷۰۰
گیلان (۱)	۵۰۰	گیلان (۱)	۶۰۰	گیلان (۱)	۶۰۰
گیلان (۲)	۵۰۰	کرج (۱)	۵۰۰	کرج (۱)	۶۰۰
کرج (۱)	۴۰۰	شیراز (۲)	۴۰۰	شیراز (۲)	۵۰۰
شیراز (۲)	۶۰۰	قزوین (۱)	۶۰۰	قزوین (۱)	۶۰۰
قزوین (۱)	۴۰۰				



این موضوع نشان می‌دهد که موقعیت سایت‌ها در برابر عدم قطعیت تا حد بالایی استوار است و با نوسانات پارامترها بهینگی خود را از دست نمی‌دهد. موضوع جالب این است که رویکردهای قطعی و استوار در ارتباط با ظرفیت سایت‌ها به‌صورت متفاوتی رفتار می‌کنند. در واقع رویکردهای استوار تعداد سایت‌های کمتر اما با ظرفیت بالاتر در مقایسه با مدل قطعی مشخص می‌کنند. دلیل این موضوع این است که رویکردهای استوار با افزایش ظرفیت به دنبال فراهم کردن شرایطی برای تضمین ارضای مقادیر مختلف پارامترهای غیرقطعی (انحرافات از مقدار اسمی به سمت بدترین مقدار) است.

## ۵-۵ آنالیز حساسیت

از مهم‌ترین موضوعات سوخت‌های سبز هزینه تولید به ازای هر لیتر سوخت و یافتن راهکارهای کاهش هزینه می‌باشد. در این بخش اثر مهم‌ترین پارامترهای زنجیره تأمین جلبک‌ها بر هزینه هر لیتر سوخت تحلیل می‌شود. شکل (۳) اثر  $\pm 25\%$  تغییر در پارامترهای (۱) میزان رشد جلبک‌ها، (۲) نرخ تبدیل جلبک خشک به بایودیزل (میزان روغن جلبک‌ها)، (۳) هزینه‌های سرمایه‌گذاری لوله‌گذاری، (۴) هزینه عملیاتی خط لوله، (۵) آب موردنیاز، (۶) نیتروژن موردنیاز، (۷) فسفر موردنیاز و (۸) کربن دی‌اکسید موردنیاز را بر هزینه هر لیتر نشان می‌دهد. ن



شکل (۳): نتایج آنالیز حساسیت

تایج نشان می‌دهد که هزینه پایه تولید هر سوخت ۸۸۵۰۰ ریال می‌باشد. مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار برای کاهش هزینه، افزایش میزان رشد جلبک‌ها و محتوای روغنی آنها است. بنابراین

یافتن گونه‌های جلبک با سرعت رشد بالاتر و قابلیت ذخیره‌سازی میزان روغن بیشتر می‌توان هزینه هر لیتر سوخت را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. از دیگر پارامترهای مهم تأثیرگذار، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انتقال خطوط انتقال می‌باشد. در نتیجه لازم است در آینده تصفیه خانه‌های فاضلاب و نیروگاه‌های تولید برق در نزدیکی مناطق مناسب احداث سایت‌های تولید جلبک‌ها ساخته شود تا هزینه انتقال مواد اولیه کاهش یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که کاهش میزان آب و کربن دی‌اکسید موردنیاز می‌تواند هزینه کل را کاهش دهد. لذا توسعه فناوری‌هایی برای استفاده بهره‌ورتر از این دو ماده اولیه هنگام تولید موردنیاز است.

## ۶- نتیجه‌گیری

با گسترش توجهات به سوخت‌های سبز، نیاز به طراحی و بهینه‌سازی سوخت‌های سبز روزبه‌روز افزایش می‌یابد. برای توسعه سوخت‌های سبز از جلبک‌ها در کشور این مطالعه به توسعه مدل طراحی شبکه برای جلبک‌ها می‌پردازد. از آنجاکه یکی از دغدغه‌های مدل‌های زنجیره تأمین موضوع عدم قطعیت می‌باشد، دو رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مقابله با عدم قطعیت به کار گرفته شده است. نتایج مدل‌های استوار نشان می‌دهد که می‌توان با یک افزایش معقول در هزینه کل زنجیره تأمین، استواری تصمیمات زنجیره تأمین را به مقدار قابل توجه بهبود بخشید. با این وجود تصمیم‌گیرندگان با درجات محافظه‌کاری بالا لازم است هزینه بالایی را برای استواری زنجیره تأمین بپردازند. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که قیمت سوخت تولیدی به ازای هر لیتر از جلبک‌ها در حال حاضر قابل رقابت با سوخت‌های فسیلی نیست اما با بهبود مقادیر اندکی در میزان رشد جلبک‌ها و محتوای روغنی آن‌ها می‌توان هزینه هر لیتر سوخت را به مقدار قابل توجه کاهش داد. نتیجتاً با بهبود نرخ رشد و محتوای روغنی می‌توان جلبک‌ها را به‌عنوان یکی از منابع مناسب برای مشارکت در تأمین انرژی کشور در نظر گرفت.

منابع

- فهرست بهای اختصاصی تأسیسات نفت و گاز سال ۱۳۹۰،  
[http://www.naft.info/content\\_management.php/show/fehrest\\_baha](http://www.naft.info/content_management.php/show/fehrest_baha)
  - فهرست بهای واحد پایه رشته شبکه توزیع آب سال ۱۳۹۳،  
<http://www.qom.ac.ir/Portal/File/ShowFile.aspx?ID=6f01aff2-b8cf-4ba1-bd0d-ac956c5676c8>
- [1] Yue, D., You, F., and Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, **66**, 36-56.
  - [2] Awudu, I., and Zhang, J. (2012). Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16(2)**, 1359-1368.
  - [3] Sims, R. E., Mabee, W., Saddler, J. N., and Taylor, M. (2010). An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresour Technol*, **101(6)**, 1570-1580.
  - [4] Mata, T. M., Martins, A. A., and Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, **14(1)**, 217-232.
  - [5] An, H., Wilhelm, W. E., and Searcy, S. W. (2011). A mathematical model to design a lignocellulosic biofuel supply chain system with a case study based on a region in Central Texas. *Bioresour Technol*, **102(17)**, 7860-7870.
  - [6] Awudu, I., and Zhang, J. (2013). Stochastic production planning for a biofuel supply chain under demand and price uncertainties. *Applied Energy*, **103**, 189-196.
  - [7] Azadeh, A., Arani, H. V., and Dashti, H. (2014). A stochastic programming approach towards optimization of biofuel supply chain. *Energy*, **76**, 513-525.
  - [8] Ekşioğlu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., and Arora, S. (2009). Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, **57(4)**, 1342-1352.
  - [9] Osmani, A., and Zhang, J. (2014). Economic and environmental optimization of a large scale sustainable dual feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain in a stochastic environment. *Applied Energy*, **114**, 572-587.

- [10] Pishvae, M. S., Rabbani, M., and Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, **35(2)**, 637-649.
- [11] Ben-Tal, A., and Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical programming*, **88(3)**, 411-424.
- [12] Soyster, A. L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, **21(5)**, 1154-1157.
- [13] Ben-Tal, A., Goryashko, A., Guslitzer, E., and Nemirovski, A. (2004). Adjustable robust solutions of uncertain linear programs. *Mathematical programming*, **99(2)**, 351-376.
- [14] Verderame, P. M., and Floudas, C. A. (2010). Multisite planning under demand and transportation time uncertainty: Robust optimization and conditional value-at-risk frameworks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50(9)**, 4959-4982.
- [15] Li, Z., Ding, R., and Floudas, C. A. (2011). A comparative theoretical and computational study on robust counterpart optimization: I. Robust linear optimization and robust mixed integer linear optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50(18)**, 10567-10603.
- [16] Bertsimas, D., and Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations Research*, **52(1)**, 35-53.
- [17] Mohseni, S., and Pishvae, M. S. (2016). A robust programming approach towards design and optimization of microalgae-based biofuel supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, **100**, 58-71.
- [18] Lundquist, T. J., Woertz, I. C., Quinn, N., and Benemann, J. R. (2010). A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. *Energy Biosciences Institute*, **1**.
- [19] Yang, J., Xu, M., Zhang, X., Hu, Q., Sommerfeld, M., and Chen, Y. (2011). Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance. *Bioresour Technol*, **102(1)**, 159-165.
- [20] Pate, R., Klise, G., and Wu, B. (2011). Resource demand implications for US algae biofuels production scale-up. *Applied Energy*, **88(10)**, 3377-3388.

[21] Béchet, Q., Shilton, A., and Guieysse, B. (2013). Modeling the effects of light and temperature on algae growth: State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation. *Biotechnology advances*, **31(8)**, 1648-1663.

[۲۲] فلاحی، فیروز؛ حکمتی فرید، صمد (۱۳۹۲). بررسی عوامل مؤثر بر میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در استان‌های کشور (رهیافت داده‌های تابلویی). *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، دوره ۲، بهار ۶، صص ۱۵۰-۱۲۹.

[23] Wigmosta, M. S., Coleman, A. M., Skaggs, R. J., Huesemann, M. H., and Lane, L. J. (2011). National microalgae biofuel production potential and resource demand. *Water Resources Research*, **47(3)**.

Archive of SID

## **Robust Programming Models for Design and Optimization of Microalgae-Based Biofuel Supply Chain Under Uncertainty**

Shayan Mohseni and Mir Saman Pishvaei

Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

### **Abstract**

The sharp decline in oil resources and environmental pollutions are the most important motivations for the development of green fuels in Iran. Among the different raw materials used for the production of green fuels, microalgae is considered as one of the most important resources and have attracted a lot of attentions globally. In order to accelerate the development of this industry, it is essential to design an efficient microalgae-based biofuel supply chain. For this purpose, this paper proposes robust programming approaches for the design and optimization of the microalgae biofuel supply chain under uncertainty. The proposed supply chain optimization model is formulated based on two robust optimization approaches under different uncertainty sets. In a case study, the performance of the two robust supply chain design models is evaluated by considering the different degrees of conservatism level of decision makers. The results of the robust models and sensitivity analysis show that the developed supply chain model can be used for the development of microalgae biofuel in the future.

**Keywords:** Green fuels, Microalgae, Robust optimization, Supply chain design.

**Mathematics Subject Classification (2010):** 90C15, 90B06

Archive of SID