

## ارایه مدل های مدیریت زنجیره تأمین به منظور توسعه تولید سوخت سبز از جلبک ها در کشور

شایان محسنی<sup>۱</sup>

میرسامان پیشوایی<sup>۲\*</sup>

[pishvae@iust.ac.ir](mailto:pishvae@iust.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۲۶

### چکیده

**زمینه و هدف:** آلودگی های زیست محیطی و وابستگی شدید به سوخت های آلاینده فسیلی از مهم ترین انگیزه های توسعه سوخت های سبز در کشور محسوب می شود. جلبک ها به عنوان یکی از جدیدترین مواد اولیه برای تولید سوخت سبز در دنیا معرفی شده اند. به علاوه در فرآیند رشد جلبک ها، گازهای انتشار یافته از نیروگاه های تولید برق به کار گرفته می شود که باعث کاهش بخش اعظم گازهای گلخانه ای انتشار یافته به اتمسفر می شود.

**روش بررسی:** این مطالعه برای بررسی توسعه چنین سوخت هایی در کشور به ارایه مدل های طراحی و مدیریت زنجیره تأمین سوخت سبز بر پایه جلبک ها می پردازد. بر این اساس در ابتدا یک مدل قطعی برای مدل سازی تمام فعالیت های زنجیره تأمین تولید سوخت سبز که شامل تأمین مواد اولیه لازم برای رشد جلبک ها، کشت جلبک ها و تبدیل آن ها به سوخت و نهایتاً عرضه سوخت در کشور است، توسعه داده می شود. سپس این مدل قطعی به یک مدل طراحی شبکه استوار برای دست یابی به تصمیمات زنجیره تأمین ایمن و استوار در برابر عدم قطعیت بسط داده می شود.

**یافته ها:** نتایج به کارگیری مدل پیشنهادی برای توسعه سوخت های جلبکی در کشور نشان می دهد که تولید هر لیتر سوخت سبز در حال حاضر ۸۸٫۵ هزار ریال می باشد.

**بحث و نتیجه گیری:** هزینه کنونی تولید سوخت از جلبک ها توانایی رقابت با سوخت های فسیلی را ندارد اما این هزینه با افزایش اندک میزان رشد جلبک ها و محتوای روغنی آنها در آینده می تواند به شدت کاهش پیدا کند.

**واژه های کلیدی:** انرژی تجدید پذیر، سوخت سبز، جلبک ها، بهینه سازی استوار، زنجیره تأمین زیست توده.

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانش گاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. \* (مسوول مکاتبات)

# **Supply Chain Management Models for the Development of Green Fuel Production from Microalgae in Iran**

**Shayan Mohseni**<sup>1</sup>

**Mir Saman Pishvae**<sup>2\*</sup>

[pishvae@iust.ac.ir](mailto:pishvae@iust.ac.ir)

Admission Date: April 20, 2016

Date Received: December 17, 2015

## **Abstract**

**Background and Objective:** Environmental pollution and dependency on fossil fuels are the most important incentives for the development of biofuels in Iran. Microalgae are introduced as one of the best raw materials for the production of biofuels in the world. In addition, for the production of microalgae, the emissions from power plants are used which leads to the reduction of greenhouse gas emissions to the atmosphere.

**Method:** This paper proposes a microalgae-based biofuel supply chain network design model to study the development of such fuels. First, a deterministic model was developed to model the all activities of the supply chain including provision of raw materials for the production of microalgae, microalgae cultivation, turning them into biofuel and eventually biofuel distribution. Then, the deterministic model was extended to a robust network design model to achieve a safe and stable supply chain decisions in the face of uncertainty.

**Findings:** Results of using the proposed model for the development of microalgal biofuel production show that the cost biofuel production from microalgae is 88.5 thousand Rials per liter.

**Discussion and Conclusion:** Current production cost of microalgae-based biofuel cannot compete with that of fossil fuel, but the cost can be significantly decreased with a slight increase in algae productivity or oil content in future.

**Keywords:** Sustainable energy, Green fuels, Microalgae, Robust optimization, Biomass supply chain.

---

1- Master, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. \* (Corresponding Author)

2- Associate Professor, Faculty of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

## مقدمه

آلودگی‌های زیست‌محیطی حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی، مصرف سریع و محدود بودن ذخایر نفتی و افزایش روزافزون تقاضای انرژی از مهم‌ترین انگیزه‌های توسعه انرژی‌های نو در کشور می‌باشند. در میان انواع انرژی‌های نو، سوخت‌های سبز بر پایه زیست‌توده اهمیت فراوانی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند. دلیل این موضوع این است که سوخت‌های زیست‌توده بدون تغییر در ناوگان حمل‌ونقل می‌توانند جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند (۱). به‌علاوه جذب کربن دی‌اکسید هنگام رشد، منجر به کاهش میزان خالص کربن دی‌اکسید ورودی به اتمسفر و به‌تبع آن کاهش مخاطرات زیست‌محیطی می‌شوند (۲). تا به امروز مواد اولیه مختلفی برای تولید سوخت‌های سبز به کار گرفته شده است. از مهم‌ترین مواد اولیه می‌توان به دانه ذرت، نیشکر، سویا و دانه‌های روغنی اشاره نمود (۳). اگرچه تولید سوخت از این مواد در بسیاری از نقاط دنیا به‌صورت اقتصادی انجام می‌گرفته است، اما در سال‌های اخیر به علت این‌که این سوخت‌ها از مواد غذایی خوراکی برای تولید استفاده می‌کنند و اثرات نامطلوبی بر بازار کشاورزی دارند، با انتقادهای شدیدی روبه‌رو بوده است (۴). چنین مشکلاتی باعث شده است که توجهات به استفاده از منابع اولیه غیر غذایی برای تولید سوخت جلب شود. از مهم‌ترین منابع اولیه غیر غذایی که به نسل دوم سوخت‌های فسیلی مشهور هستند می‌توان به منابعی هم‌چون غلاف ذرت، چمن، صنوبر، جاتروفا و بامبو اشاره نمود (۲). باوجود این‌که 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 عدم توانایی آن‌ها برای تولید در مقیاس وسیع سوخت سبز می‌شود. در بین انواع مواد اولیه بدون منشأ غذایی، ریز جلیک‌ها (گونه‌های تک‌سلولی جلیک‌ها) دارای خصوصیت‌ها و ویژگی‌های زیستی و فنی فراوانی هستند که باعث شده است به‌عنوان یکی از مطلوب‌ترین و نویدبخش‌ترین مواد اولیه برای تولید سوخت سبز در سال‌های آینده محسوب شوند. از مهم‌ترین مزیت‌های ریز جلیک‌ها

می‌توان به مواردی هم‌چون: (۱) میزان رشد بالا و هم‌چنین قابلیت ذخیره سازی روغن بالا، (۲) توانایی رشد در آب‌های شور و فاضلاب که می‌تواند به کاهش نیاز به آب شیرین کمک شایانی کند و (۳) قابلیت استفاده از گازهای گل‌خانه‌ای استخراجی از نیروگاه‌های تولید برق و تبدیل آن به سوخت، اشاره نمود (۵-۳).

با گسترش روز افزون توجهات به سوخت‌های سبز از جلیک‌ها در نقاط مختلف دنیا، اهمیت مدیریت و برنامه ریزی زنجیره تأمین سوخت‌های سبز بر پایه جلیک‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. مدل‌های بهینه و کارآمد طراحی شبکه زنجیره تأمین علاوه بر این‌که می‌توانند تصمیمات بهینه زنجیره تأمین سوخت سبز استخراجی از جلیک‌ها را مشخص کنند، نشان می‌دهند که تلاش‌های آینده در حوزه سوخت‌های جلیکی لازم است به سمت کدام بخش‌ها هدایت شود تا بهترین شرایط برای رشد هر چه سریع‌تر این صنعت فراهم شود. به‌طور کلی مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت‌های سبز استخراجی از زیست‌توده‌ها را می‌توان به سه دسته طبقه بندی نمود، (۱) ۶ دسته اول مربوط به مدل‌های زنجیره تأمین سوخت‌های سبز از مواد اولیه غذایی می‌باشد. این مدل‌ها فعالیت‌های زنجیره تأمین زیر را در بر می‌گیرد: مواد اولیه غذایی (برای مثال سویا) از مزارع موجود در نقاط مختلف جمع آوری 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. بر اساس این فعالیت‌های ذکر شده مدل‌های زنجیره تأمین این دسته به بهینه سازی تصمیماتی هم‌چون انتخاب تأمین کننده (۷) ظرفیت، مکان و نوع تکنولوژی پالایش‌گاه‌های تبدیل (۶، ۸، ۹) و روش حمل‌ونقل مواد اولیه و سوخت نهایی (۱۰، ۱۱) می‌پردازند. دسته دوم شامل مدل‌های زنجیره تأمین سوخت‌های سبز از مواد اولیه بدون منشأ غذایی می‌باشد. برخلاف مدل‌های دسته اول که در آن‌ها مواد اولیه از مزارع از پیش تعیین شده جمع آوری می‌شود، در مدل‌های دسته دوم

بودن صنعت سوخت‌های سبز، داده‌های تاریخی کافی در دسترس نمی‌باشد و نتیجتاً به دست آوردن توزیع احتمالی پارامترها مشکل است، (۲) بهینه‌سازی احتمالی بر پایه سناریو به‌عنوان یک روش مشهور در بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین برای مقابله با عدم قطعیت نیاز به در نظر گرفتن مجموعه‌ای بزرگ از سناریوها دارد که منجر به افزایش پیچیدگی مساله و به‌تبع آن افزایش زمان محاسباتی می‌شود (۵). به‌عنوان یک راه حل جایگزین، بهینه‌سازی استوار بر چنین مشکلاتی غلبه می‌کند و مهم‌تر از این، جوابی را فراهم می‌کند که به ازای تمام واقع‌نمایی‌های پارامترهای غیرقطعی، شدنی و استوار باقی می‌ماند (۱۴). بر این اساس، در این مطالعه یک مدل استوار طراحی شبکه زنجیره تأمین برای تولید سوخت از جلبک‌ها توسعه داده می‌شود. به کارگیری رویکرد بهینه‌سازی استوار در این مدل تضمین می‌کند که تصمیمات استراتژیکی و تاکتیکی زنجیره تأمین به دست آمده نسبت به نوسانات پارامترهای غیرقطعی حساسیت کم‌تری داشته باشد و هم‌چنین بر اثر نوسانات اندک پارامترهای ارزش خود را از دست ندهد.

#### بیان مساله

#### فرایند تولید سوخت از جلبک‌ها

در یک نگاه کلی چرخه تولید سوخت سبز از جلبک‌ها از چند مرحله تشکیل شده است. 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 مورد نیاز 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 فساد پذیری آن‌ها جلوگیری شوند و هم برای مراحل بعدی تولید سوخت آماده گردد. برای این منظور، مخلوط آب و جلبک‌ها به ترتیب وارد مراحل برداشت و خشک کردن می‌شوند. در مرحله برداشت با استفاده از فرایند لخته‌سازی مقدار قابل توجهی آب از مخلوط آب و جلبک جداسازی شده و سپس در محله خشک کردن مقدار اندک آب باقی مانده نیز به‌وسیله حرارت تبخیر شده و

لازم است که مکان‌های بهینه برای کشت مواد اولیه نیز مشخص شوند (۱۲). بر این اساس، در مدل‌های دسته دوم علاوه بر تصمیمات زنجیره تأمین مدل‌های دسته اول، مکان و ظرفیت کشت محصولات نیز مشخص می‌شوند. در دسته سوم مدل‌های زنجیره تأمین سوخت‌های سبز استخراجی از جلبک‌ها قرار دارند. علت طبقه‌بندی سوخت‌های جلبکی در دسته‌ای جداگانه این است که ساختار شبکه زنجیره تأمین جلبک‌ها تفاوت‌های قابل توجهی با سایر شبکه‌های زنجیره تأمین سوخت‌های سبز دارد. به عبارت دقیق‌تر، رشد جلبک‌ها نیاز به مواد اولیه خاص هم‌چون کربن دی‌اکسید، آب و مواد مغذی دارد که باعث پیچیدگی زنجیره تأمین سوخت سبز جلبک‌ها می‌شود (۳). باوجود این که جلبک‌ها یکی از مهم‌ترین منابع برای تولید سوخت سبز محسوب می‌شوند، توجهات کم‌تری به مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین جلبک‌ها در نقاط مختلف دنیا شده است و اندک مطالعات انجام شده در این حیطه بخش‌های محدودی از فعالیت‌های مورد نیاز برای تولید سوخت سبز از جلبک‌ها را در بر می‌گیرد. این مطالعه برای پوشش این شکاف تحقیقاتی، به توسعه یک مدل جامع زنجیره تأمین که تمام مراحل مورد نیاز برای تولید سوخت از جلبک‌ها را در برمی‌گیرد، می‌پردازد.

عدم قطعیت موضوع مهمی در زنجیره تأمین سوخت‌های سبز به دست آمده از زیست‌توده‌ها می‌باشد که تصمیمات زنجیره تأمین را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸، ۱۳). باوجود اهمیت این موضوع، اغلب مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت‌های سبز قطعی هستند. در سال‌های اخیر با پررنگ‌تر شدن نقش عدم قطعیت در زنجیره تأمین سوخت‌های سبز، برخی از محققین به توسعه مدل‌های غیرقطعی پرداخته‌اند (۷). برنامه ریزی احتمالی روش به کار گرفته شده برای مقابله با عدم قطعیت در این مطالعات می‌باشد. اما این روش در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین با محدودیت‌های جدی رو به رو است. برای مثال (۱) برنامه ریزی احتمالی برای مدل‌سازی عدم قطعیت نیاز به تابع توزیع احتمالی پارامترهای غیرقطعی دارد حال آن‌که در زنجیره تأمین سوخت‌های سبز به علت نو پا

مورد نیاز است (۳). اگرچه از منابع مختلفی برای تأمین کربن دی اکسید می‌توان استفاده نمود، کربن دی اکسید منتشر شده از نیروگاه‌های تولید برق مورد توجه ویژه‌ای در بین منابع مختلف هستند. علت این موضوع این است که کربن دی اکسید منتشر شده از نیروگاه‌ها غلظت کافی در تمام فصول سال را دارند و همچنین با به‌کارگیری این کربن دی اکسید برای تولید سوخت سبز می‌توان از انتشار مقدار قابل توجهی کربن دی اکسید به اتمسفر جلوگیری نمود (۱۶). نیتروژن و فسفر دو ماده مغذی اصلی مورد نیاز برای رشد جلبک‌ها محسوب می‌شوند (۱۵، ۱۶). این دو ماده مغذی به‌وسیله تهیه کودهای کشاورزی تأمین می‌شوند. به‌علاوه از آن جایی که فاضلاب‌ها دارای مقادیر بالایی از مواد مغذی هستند، در صورت استفاده از فاضلاب، مواد مغذی مورد نیاز به‌وسیله کودهای کشاورزی و فاضلاب تأمین می‌شود.

#### سایت‌های تولید

در لایه میانه زنجیره تأمین مورد بحث سایت‌های تولید قرار دارند. با توجه به مراحل تشریح شده تولید سوخت، سایت‌های تولید از واحدهای مختلفی تشکیل می‌شوند. در مدل سازی ریاضی زنجیره تأمین فرض می‌شود که فرایند تولید سوخت در دو مرحله انجام می‌شوند. در مرحله اول حوضچه‌های تولید جلبک قرار دارند که به میزان رشد جلبک‌ها (مقدار ماده خشک به ازای هر هکتار) ضرب در مساحت کل حوضچه‌ها (هکتار) جلبک خشک تولید می‌کنند. در مرحله دوم جلبک‌های خشک تولید شده با یک میزان تبدیل به سوخت دیزل سبز تبدیل می‌شود.

یکی از مهم‌ترین مشکلات پیش روی سوخت‌های سبز این است که تقاضای سوخت در سرتاسر سال یکسان است اما تولید سوخت وابسته به شرایط آب و هوایی است و در فصول سرد به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند (۱). برای کاهش این مشکل، در مدل طراحی شبکه ذخیره سازی سوخت در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر در صورت وجود تقاضای سوخت به نواحی تقاضا منتقل می‌شود و در غیر این صورت، سوخت تولیدی ذخیره می‌شود تا در دوره‌های بعدی مصرف گردد.

جلبک‌ها به‌طور کامل خشک می‌شوند (۳، ۴). جلبک خشک شده می‌تواند توسط فرایندهای مختلفی به سوخت‌های مختلفی تبدیل شود، اما تولید سوخت دیزل از این ماده اولیه شناخته شده ترین روش می‌باشد و از طرفی سوخت بایودیزل ارزشمندترین سوخت در بین سوخت‌های مختلف سبز است (۵). برای دست یابی به سوخت دیزل، روغن موجود در جلبک‌های خشک شده استخراج شده و سپس این روغن توسط واکنش‌های شیمیایی به سوخت بایودیزل تبدیل می‌شود.

#### مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین

بر اساس فرایند تولید سوخت توصیف شده، می‌توان مدل شبکه زنجیره تأمینی را مطابق شکل (۱) برای تولید سوخت از جلبک‌ها در نظر گرفت. این زنجیره که کل فعالیت‌های مورد نیاز برای تولید سوخت از تأمین مواد اولیه تا عرضه سوخت به بازار نهایی را در برمی‌گیرد از لایه‌های زیر تشکیل شده است:

#### مواد اولیه مورد نیاز

رشد بهینه و بهره‌ور جلبک‌ها نیاز به تأمین کافی و پایدار موادی هم‌چون آب، کربن دی اکسید و مواد مغذی دارد، لذا لازم است در مدل طراحی شبکه، تأمین این مواد به‌طور دقیق در نظر گرفته شوند. آب لازمه اصلی رشد جلبک‌ها محسوب می‌شود که محیط مورد نیاز برای رشد و پرورش جلبک‌ها در کنار مواد مغذی را فراهم می‌کند. بر اساس تحقیقات مختلف انجام شده تولید هر لیتر سوخت از جلبک‌ها نیازمند ۴۰۰ لیتر آب می‌باشد (۱۵). این میزان آب مورد نیاز مانع عمده‌ای برای تولید در مقیاس عظیم سوخت جلبکی با توجه به کمبود منابع آب شیرین محسوب می‌شود. برای کاهش نگرانی این موضوع، می‌توان از قابلیت رشد جلبک‌ها در فاضلاب‌ها بهره برد. لذا در این مدل طراحی شبکه از فاضلاب علاوه بر آب شیرین برای تولید جلبک‌ها استفاده می‌شود. کربن دی اکسید 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 دی اکسید آن‌ها از اتمسفر به علت برگشت پذیری سطحی آب، برای رشد بهینه کافی نمی‌باشد، لذا استفاده از یک منبع کربن دی اکسید غلیظ

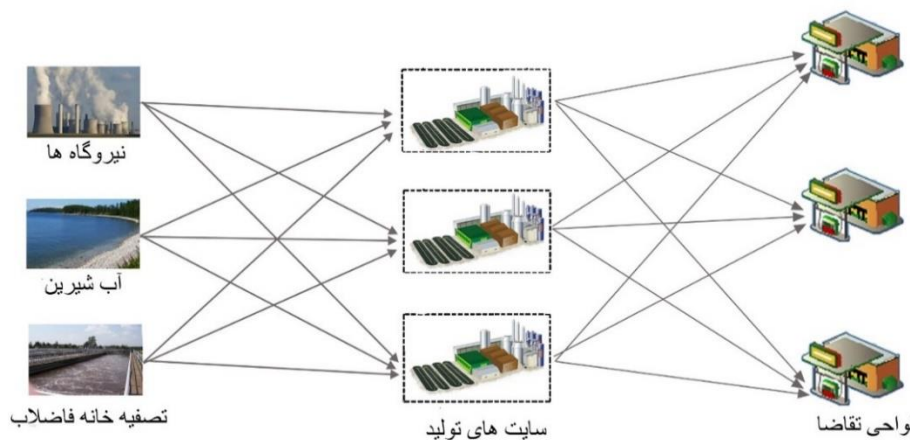
**نواحی عرضه سوخت**

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

**حمل و نقل**

برای برقراری ارتباط میان لایه‌های زنجیره تأمین ذکر شده، دو

روش حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود: انتقال به وسیله خط لوله و تانکر حمل. از آن جایی که لازم است آب، فاضلاب و کربن دی اکسید به صورت بی‌وقفه به سایت‌های تولید منتقل شود، خط لوله برای انتقال این مواد اولیه در نظر گرفته می‌شود. به علاوه با توجه به این که استفاده از تانکرهای حمل برای انتقال سوخت بنزین و دیزل عمل کرد مناسبی داشته است، تانکرهای حمل برای انتقال سوخت سبز تولیدی در سایت‌های تولید به بازارهای آزمایشی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت سبز بر پایه جلبک‌ها

Figure 1- Structure of microalgae-based biofuel supply chain

	مجموعه سطوح مختلف	مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین
$Q$	ظرفیت، $(q_f, q_s, q_w, q_c \in Q)$	نمادهای مدل
$M$	مجموعه مکان‌های تقاضا، $(m \in M)$	پیش از ارایه مدل ریاضی مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترها به کار گرفته شده در مدل طراحی شبکه در زیر لیست می‌شوند. لازم به ذکر است پارامترهای غیرقطعی با "~" نشان داده شده‌اند.
$T$	مجموعه دوره‌های زمانی، $(t \in T)$	مجموعه‌ها
	<b>پارامترها</b>	
$\widehat{cap}_f^t$	مقدار آب شیرین در دسترس در ناحیه $f$ در دوره زمانی $t$	$F$ مجموعه منبع‌های آب شیرین، $(f \in F)$
$\widehat{cap}_w^t$	مقدار فاضلاب در دسترس در ناحیه $w$ در دوره زمانی $t$	$W$ مجموعه منبع‌های فاضلاب، $(w \in W)$
$\widehat{cap}_c^t$	مقدار کربن دی اکسید در دسترس در ناحیه $c$ در دوره زمانی $t$	$C$ مجموعه منبع‌های کربن دی اکسید (نیروگاه‌های تولید برق)، $(c \in C)$
$\widetilde{tf}_{f \rightarrow i}$	هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد آب شیرین	$I$ مجموعه مکان‌های کاندید برای سایت‌های تولید، $(i \in I)$

$\beta_c$	کربن دی اکسید موردنیاز به ازای هر واحد جلبک تولیدی		از منبع $f$ به سایت تولید $i$
$\tilde{\varphi}_n$	نیترژن در دسترس به ازای هر واحد فاضلاب	$\tilde{t}w_{w \rightarrow i}$	هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد فاضلاب از منبع $w$ به سایت تولید $i$
$\tilde{\varphi}_p$	فسفر در دسترس به ازای هر واحد فاضلاب		
$\tilde{p}_n^t$	قیمت نیترژن در دوره زمانی $t$	$\tilde{t}c_{c \rightarrow i}$	هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد کربن دی اکسید از منبع $c$ به سایت تولید $i$
$\tilde{p}_p^t$	قیمت فسفر در دوره زمانی $t$		
$\tilde{h}_i$	هزینه نگهداری بایودیزل در سایت تولید $i$	$\tilde{t}b_{i \rightarrow m}$	هزینه حمل و نقل به ازای هر واحد بایودیزل از سایت تولید $i$ به مکان تقاضا $m$
$\sigma$	میزان تبدیل جلبک خشک شده به بایودیزل		
$\tilde{d}_{m,t}$	میزان تقاضا در ناحیه $m$ در دوره $t$	$\tilde{c}_{i,q}$	هزینه سرمایه‌گذاری سالانه سایت تولید $i$ با ظرفیت $q$
	<b>متغیرهای تصمیم</b>	$\tilde{O}_i$	هزینه تولید بایودیزل در سایت تولید $i$
$x_{ff \rightarrow i}^t$	مقدار آب شیرین منتقل شده از منبع $f$ به سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$	$\tilde{c}_{q_f}^{f \rightarrow i}$	هزینه سرمایه‌گذاری سالانه خط لوله $f \rightarrow i$ با ظرفیت $q_f$
$x_{ww \rightarrow i}^t$	مقدار فاضلاب منتقل شده از منبع $w$ به سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$	$\tilde{c}_{q_w}^{w \rightarrow i}$	هزینه سرمایه‌گذاری سالانه خط لوله $w \rightarrow i$ با ظرفیت $q_w$
$x_{cc \rightarrow i}^t$	مقدار کربن دی اکسید منتقل شده از منبع $c$ به سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$	$\tilde{c}_{q_c}^{c \rightarrow i}$	هزینه سرمایه‌گذاری سالانه خط لوله $c \rightarrow i$ با ظرفیت $q_c$
$x_{bi \rightarrow m}^t$	مقدار بایودیزل منتقل شده از سایت تولید $i$ به ناحیه تقاضا $m$ در دوره زمانی $t$	$cap_{q_f}^{f \rightarrow i, t}$	حداکثر ظرفیت خط لوله $f \rightarrow i$ با ظرفیت $q_f$ در دوره زمانی $t$
$v_i^t$	مقدار ذخیره بایودیزل در سایت تولید $i$ در دوره زمانی $t$	$cap_{q_w}^{w \rightarrow i, t}$	حداکثر ظرفیت خط لوله $w \rightarrow i$ با ظرفیت $q_w$ در دوره زمانی $t$
$xn_i^t$	مقدار کود نیترژن خریداری شده در سایت تولید $i$ در دوره $t$	$cap_{q_c}^{c \rightarrow i, t}$	حداکثر ظرفیت خط لوله $c \rightarrow i$ با ظرفیت $q_c$ در دوره زمانی $t$
$xp_i^t$	مقدار کود فسفر خریداری شده در سایت تولید $i$ در دوره $t$	$\delta_q$	مساحت حوضچه‌های سایت تولید با ظرفیت $q$
$Y_{i,q}$	متغیر ۰-۱، برابر با ۱ در صورت ساخت سایت تولید با ظرفیت $q$ ، در غیر این صورت ۰		مقدار حاصل‌خیزی (تولید) جلبک خشک به ازای هر واحد سطح در ناحیه $i$ در دوره زمانی $t$
$L_{q_f}^{f \rightarrow i}$	لوله با ظرفیت $q$ بین منبع $f$ و سایت $i$ ، در غیر این صورت ۰	$\tilde{\theta}_i^t$	
$L_{q_w}^{w \rightarrow i}$	متغیر ۰-۱، برابر با ۱ در صورت ساخت خط لوله با ظرفیت $q_w$ بین منبع $f$ و سایت $i$ ، در غیر این صورت ۰	$\beta_w$	آب موردنیاز به ازای هر واحد جلبک تولیدی
$L_{q_c}^{c \rightarrow i}$	متغیر ۰-۱، برابر با ۱ در صورت ساخت خط	$\beta_n$	نیترژن موردنیاز به ازای هر واحد جلبک تولیدی
		$\beta_p$	فسفر موردنیاز به ازای هر واحد جلبک تولیدی

$$BC = \sum_i \sum_m \sum_t \tilde{t}b_{i,m}xb_{i \rightarrow m}^t$$

**محدودیت‌های مدل**

مقدار در دسترس مواد اولیه (آب شیرین، فاضلاب و کربن دی اکسید) در مناطق مختلف و هم‌چنین فصول مختلف سال متغیر است. محدودیت‌های (۲) تا (۴) تضمین می‌کند که مقدار برداشت این مواد اولیه از منبعشان از حداکثر مقدار قابل در دسترس تجاوز نکند.

$$\sum_i xf_{f \rightarrow i}^t \leq \widetilde{cap}f_f^t \quad \forall f, t, \tag{2}$$

$$\sum_i xw_{w \rightarrow i}^t \leq \widetilde{cap}w_w^t \quad \forall w, t, \tag{3}$$

$$\sum_i xc_{c \rightarrow i}^t \leq \widetilde{cap}c_c^t \quad \forall c, t, \tag{4}$$

محدودیت (۵) تضمین می‌کند که مقدار آب مورد نیاز در هر سایت تولید که برابر با ضرب مقدار جلبک تولیدی ( $\tilde{\vartheta}_{i,t}\delta q$ ) در میزان آب مورد نیاز است، به‌وسیله آب شیرین و فاضلاب تضمین شود.

$$\sum_q \beta_w \tilde{\vartheta}_{i,t} \delta q Y_{i,q} \leq \sum_f xf_{f \rightarrow i}^t + \sum_w xw_{w \rightarrow i}^t \quad \forall i, t, \tag{5}$$

محدودیت (۶) تضمین می‌کند که مقدار نیتروژن موردنیاز 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 (۷) نشان داده شده است. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که مقدار کربن دی اکسید موردنیاز در هر سایت و هر دوره از کربن دی اکسید منتقل شده از نیروگاه‌ها فراهم شود.

$$\sum_q \beta_n \tilde{\vartheta}_{i,t} \delta q Y_{i,q} \leq \tilde{\varphi}_n \sum_w xw_{w \rightarrow i}^t + xn_i^t \quad \forall i, t, \tag{6}$$

لوله با ظرفیت  $q_c$  بین منبع  $f$  و سایت  $i$ ، در غیر این صورت •

با توجه به پارامترها و متغیرهای توصیف شده در بالا، تابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی طراحی شبکه جلبک‌ها در زیر ارائه می‌شوند.

**تابع هدف**

در زیر تابع هدف مربوط به مدل طراحی شبکه نشان داده شده است. این تابع هدف هزینه‌های کل زنجیره تأمین را در طول افق برنامه ریزی کمینه می‌کند. این هزینه‌ها شامل: هزینه‌های انتقال مواد اولیه از منبع‌ها به سایت‌های تولید (FC)، هزینه ثابت سرمایه‌گذاری برای لوله گذاری (PC)، هزینه تهیه مواد مغذی (EC)، هزینه‌های سایت‌های تولید (هزینه‌های عملیاتی و سرمایه گذاری) (PF)، هزینه‌های موجودی (IC) و هزینه‌های انتقال بایوبیزل از سایت‌های تولید به نواحی تقاضا (BC) می‌باشد.

$$Min Z = FC + PC + EC + PF + IC + BC \tag{1}$$

$$FC = \sum_f \sum_i \sum_t \tilde{t}f_{f \rightarrow i} xf_{f \rightarrow i}^t +$$

$$\sum_w \sum_i \sum_t \tilde{t}w_{w \rightarrow i} xw_{w \rightarrow i}^t +$$

$$\sum_c \sum_i \sum_t \tilde{t}c_{c \rightarrow i} xc_{c \rightarrow i}^t$$

$$PC = \sum_f \sum_i \sum_{q_f} \tilde{c}_{q_f}^{f \rightarrow i} L_{q_f}^{f \rightarrow i} +$$

$$\sum_w \sum_i \sum_{q_w} \tilde{c}_{q_w}^{w \rightarrow i} L_{q_w}^{w \rightarrow i} +$$

$$\sum_c \sum_i \sum_{q_c} \tilde{c}_{q_c}^{c \rightarrow i} L_{q_c}^{c \rightarrow i}$$

$$EC = \sum_i \sum_t \tilde{p}_n^t xn_i^t + \sum_i \sum_t \tilde{p}_p^t xp_i^t$$

$$PF = \sum_i \sum_m \sum_t \sum_i \sum_q \tilde{c}_{i,q} Y_{i,q} + \sum_i \sum_m \sum_t \tilde{O}_i xb_{i \rightarrow m}^t$$

$$IC = \sum_i \sum_q \sum_t \tilde{h}_i v_i^t$$



$$\sum_q Y_{i,q} \leq 1 \quad \forall i, \quad (13)$$

$$\sum_{q_f} L_{q_f}^{f \rightarrow i} \leq 1 \quad \forall f, i, \quad (14)$$

$$\sum_{q_w} L_{q_w}^{w \rightarrow i} \leq 1 \quad \forall w, i, \quad (15)$$

$$\sum_{q_c} L_{q_c}^{c \rightarrow i} \leq 1 \quad \forall c, i, \quad (16)$$

محدودیت (۱۷) تضمین می‌کند که مقدار سوخت عرضه شده به استان‌های کاندید از میزان تقاضا در آن استان‌ها در هر دوره بیش‌تر باشد. نهایتاً محدودیت‌های (۱۸) نامنفی بودن متغیرهای تصمیم ذکر شده را تضمین می‌کند.

$$\sum_i \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t \geq \tilde{d}_{m,t} \quad \forall m, t \quad (17)$$

$$x f_{f \rightarrow i}^t, x w_{w \rightarrow i}^t, x c_{c \rightarrow i}^t, x b_{i \rightarrow m}^t, v_i^t \quad (18)$$

$$, x n_i^t, x p_i^t \geq 0$$

$$\forall f, w, c, i, t,$$

**رویکرد بهینه سازی استوار با بودجه عدم قطعیت**

بهینه سازی استوار با داده‌های غیرقطعی فاصله‌ای نخستین بار به وسیله سویستر توسعه داده شده است (۱۷). این مدل بدترین مقدار محتمل پارامترهای غیرقطعی را در نظر می‌گیرد، نتیجتاً حداکثر حفاظت را در برابر عدم قطعیت فراهم می‌کند. اما نقص این رویکرد آن است که احتمال این که تمام پارامترهای غیرقطعی هم زمان بدترین مقدار خود را بگیرند به کمی احتمالی مقدار گرفتن هم زمان پارامترهای غیرقطعی در مقدار اسمی می‌باشد. برای کاهش محافظه کاری این روش، بنتال و نمیروفسکی به توسعه مدل بهینه سازی استوار تحت مجموعه عدم قطعیت بیضوی شکل پرداختند (۱۸). اگر چه رویکرد آن‌ها توانایی مناسبی در کنترل محافظه کاری مدل دارد اما مدل برنامه ریزی خطی اولیه را به مدل برنامه ریزی غیرخطی تبدیل می‌کند که از لحاظ محاسباتی بسیار پیچیده‌تر

$$\sum_q \beta_p \tilde{\theta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad (7)$$

$$\leq \tilde{\varphi}_p \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t$$

$$+ x p_i^t \quad \forall i, t,$$

$$\sum_q \beta_c \tilde{\theta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad (8)$$

$$\leq \sum_c x c_{c \rightarrow i}^t \quad \forall i, t,$$

محدودیت (۹) تضمین می‌کند که مقدار بایودیزل تولید شده در هر سایت تولید در هر دوره به علاوه موجودی بایودیزل ذخیره شده در انتهای دوره قبل بیش‌تر از بایودیزل منتقل شده از سایت تولید به بازارهای تقاضا و موجودی در انتهای دوره فعلی باشد.

$$\sum_q \sigma \tilde{\theta}_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + v_i^{t-1} \quad (9)$$

$$\geq \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t$$

$$+ v_i^t \quad \forall i, t,$$

محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۲) تضمین می‌کند که در صورت ساخت خط لوله، مقدار آب شیرین، فاضلاب و کربن دی اکسید انتقالی از منبع‌های مواد اولیه به سایت‌های تولید در هر دوره از ظرفیت خط لوله تجاوز نکند.

$$x f_{f \rightarrow i}^t \quad (10)$$

$$\leq \sum_{q_f} cap_{q_f}^{f \rightarrow i, t} L_{q_f}^{f \rightarrow i} \quad \forall f, i, t,$$

$$x w_{w \rightarrow i}^t \quad (11)$$

$$\leq \sum_{q_w} cap_{q_w}^{w \rightarrow i, t} L_{q_w}^{w \rightarrow i} \quad \forall w, i, t,$$

$$x c_{c \rightarrow i}^t \quad (12)$$

$$\leq \sum_{q_c} cap_{q_c}^{c \rightarrow i, t} L_{q_c}^{c \rightarrow i} \quad \forall c, i, t,$$

محدودیت‌های (۱۳) تا (۱۶) تضمین می‌کند که فقط یک سطح ظرفیت برای هر سایت تولید و هر خط لوله آب شیرین، فاضلاب و کربن دی اکسید انتخاب شود.

1- Soyster

2- Ben-Tal and Nemirovski

پارامترهای غیرقطعی محدودیت  $i$  ام مدل می‌باشد. نقش پارامتر  $\Gamma_i$  این است که تعداد  $[\Gamma_i]$  از ضرایب غیرقطعی بدترین مقدار خود را بگیرند و یک ضریب دیگر  $(\tilde{a}_{it_i})$  به اندازه  $(\Gamma_i - [\Gamma_i])\hat{a}_{it_i}$  به بدترین مقدارش تغییر داده شود. بر اساس توضیحات داده شده فرم غیرخطی مدل برنامه ریزی اولیه به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } c'x \quad (20)$$

$$s. t: \sum_j a_{ij}x_j -$$

$$\max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = [\Gamma_i], t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} x_j + (\Gamma_i - [\Gamma_i])\hat{a}_{it_i} x_j \right\} \geq b_i \quad \forall i$$

$$X \geq 0.$$

در این مدل  $S_i$  نشان دهنده ضرایبی است که به طور کامل تغییر می‌کنند و  $t_i$  دلالت بر یک ضریبی دارد که به اندازه  $(\Gamma_i - [\Gamma_i])\hat{a}_{it_i}$  تغییر می‌کند در صورتی که  $\Gamma_i$  عدد صحیح نباشد. با فرض جواب بهینه  $x_j^*$  بخش حفاظتی مدل

$$\max_{\{S_i \cup \{t_i\}\}} \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} x_j + (\Gamma_i - [\Gamma_i])\hat{a}_{it_i} x_j \right\} \quad (20)$$

$$\text{Max } \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j^*| \eta_{ij}$$

$$s. t: \sum_{j \in J_i} \eta_{ij} \leq \Gamma_i$$

$$0 \leq \eta_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J_i \quad (21)$$

بر اساس قضیه قوی دوگان، از آن جایی که مدل (۲۱) شدنی و محدود به ازای تمام مقادیر  $\Gamma_i$  می‌باشد، دوگان مدل (۲۱) نیز محدود و شدنی با مقدار تابع هدف یکسان می‌باشد. لذا مدل (۲۱) می‌تواند با مدل دوگانش که به صورت زیر است جایگزین شود:

$$\text{Min } \Gamma_i \lambda_i + \sum_{j \in J_i} k_{ij} \quad (22)$$

است. در ادامه مدل‌های بهینه سازی هم‌زاد استوار بر اساس مجموعه عدم قطعیت‌های متفاوتی هم‌چون لوزی، ترکیب مربع و لوزی، ترکیب مربع و بیضی و ترکیب مربع، بیضی و لوزی برای مدل‌های برنامه ریزی عدد صحیح مختلط توسعه داده شده است (۱۹). در سال‌های اخیر یکی از مناسب‌ترین رویکردهای بهینه سازی استوار به نام رویکرد بهینه سازی استوار با بودجه عدم قطعیت توسط برتسیماس و سیم‌ارایه شده است (۲۰). علت این موضوع این است که مدل آن‌ها علاوه بر این که از خطی بودن مساله اصلی را حفظ می‌کند، کنترل کاملی بر درجه محافظه‌کاری جواب مدل به وسیله مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت فراهم می‌کند. بر این اساس رویکرد بهینه سازی استوار برتسیماس و سیم برای توسعه مدل زنجیره تأمین استوار جلبک‌ها به کار گرفته می‌شود.

در این قسمت رویکرد بهینه سازی استوار با بودجه عدم قطعیت تشریح می‌شود. برای انجام این کار مدل برنامه ریزی خطی زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\text{Min } c'x \quad (19)$$

$$s. t: \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \geq b_i \quad \forall i$$

$$x \in X$$

که در آن ضرایب  $\tilde{a}_{ij}$  در معرض عدم قطعیت قرار گرفته‌اند. برای توسعه مدل استوار این مدل برنامه ریزی خطی هر یک از ضرایب  $\tilde{a}_{ij}$  به صورت یک متغیر تصادفی که در بازه  $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$  مقدار می‌گیرد، مدل سازی می‌شود. در این بازه،  $a_{ij}$  و  $\hat{a}_{ij}$  به ترتیب نشان دهنده مقدار اسمی و دامنه نوسان پارامتر غیرقطعی می‌باشد. به علاوه برای هر محدودیت  $i$  یک پارامتر  $\Gamma_i$  که بودجه عدم قطعیت نامیده می‌شود، معرفی می‌شود تا استحکام مدل را در برابر درجه محافظه‌کاری جواب نهایی تنظیم کند. پارامتر  $\Gamma_i$  که لزوماً عدد صحیح نمی‌باشد در بازه  $[0, |J_i|]$  مقدار می‌گیرد که  $|J_i|$  نشان دهنده تعداد

موضوع مهم دیگر در مدل‌های بهینه سازی استوار نحوه کنترل درجه محافظه کاری جواب استوار می‌باشد. همان طور که ذکر شد بوجه عدم قطعیت، تعیین کننده میزان نقض محدودیت‌ها می‌باشد. مقادیر بالاتر بوجه عدم قطعیت تعداد بیش‌تری از پارامترها را به سمت بدترین مقدارشان سوق می‌دهد و نتیجتاً احتمال نقض محدودیت‌ها کم‌تر می‌شود. برای تنظیم مقدار این بوجه می‌توان از حد احتمالی نقض محدودیت‌ها استفاده نمود. برتسیماس و سیم نشان دادند که حد بالای احتمال نقض محدودیت  $i$  به صورت  $\exp(-\Gamma_i^2/2|j_i|)$  محاسبه می‌شود (۲۰).

مدل استوار طراحی زنجیره تأمین بر پایه تولید پیوسته

تابع هدف

در ابتدا هم‌زاد استوار تابع هدف مدل قطعی تشکیل می‌شود. برای قابل کنترل بودن ابعاد فرمول بندی، فرم فشرده برداری تابع هدف (۱) را در نظر بگیرید:

$$\text{Min } \tilde{t}x + \tilde{c}y \quad (26)$$

که در آن بردارهای غیرقطعی  $\tilde{t}$  و  $\tilde{c}$  به ترتیب متناظر با هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری می‌باشد، به‌علاوه بردارها  $x$  و  $y$  به ترتیب نشان دهنده متغیرهای پیوسته و دودویی هستند. برای این که بتوان با تابع هدف همانند محدودیت‌ها برای به دست آوردن هم‌زاد استوار برخورد کرد، تابع هدف به‌صورت معادل به محدودیت (۲۸) منتقل می‌شود:

$$\text{Min } Z \quad (27)$$

$$\tilde{t}x + \tilde{c}y \leq Z \quad (28)$$

حال با معرفی بردارهای دوگان  $t^1$  و  $c^1$  محدودیت (۲۸) به‌صورت هم‌زاد استوار زیر فرمول بندی می‌شود:

$$tx + cy + t^1 + c^1 + \Gamma^z p^z \leq Z \quad (29)$$

$$p^z + t^1 \geq \hat{t}x \quad (30)$$

$$p^z + c^1 \geq \hat{c}y \quad (31)$$

$$p^z, t^1, c^1 \in \mathcal{R}^+ \quad (32)$$

محدودیت‌های مدل

$$s.t: \lambda_i + k_{ij} \geq \hat{a}_{ij}|x_j^*| \quad \forall i, j$$

$$\in j_i$$

$$k_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in j_i$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad \forall i$$

بعد از جایگزینی مدل (۲۲) در مدل (۲۰)، هم‌زاد استوار خطی مدل اولیه به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{Min } c'x \quad (23)$$

$$s.t: \sum_j a_{ij} x_j - \Gamma_i \lambda_i - \sum_{j \in j_i} k_{ij} \geq b_i \quad \forall i$$

$$\lambda_i + k_{ij} \geq \hat{a}_{ij} x_j \quad \forall i, j \in j_i$$

$$k_{ij}, \lambda_i, x_j \geq 0$$

از آن جایی که بخشی از محدودیت‌های مدل‌های طراحی شبکه فقط یک ضریب غیرقطعی در سمت راست دارند (محدودیت‌های عرضه و تقاضا)، در ادامه رویکرد بهینه سازی استوار در ارتباط با چنین محدودیت‌هایی در نظر گرفته می‌شود. برای این هدف هر یک از ضرایب غیرقطعی سمت راست همانند سایر ضرایب عدم قطعیت توزیع متقارنی به شکل  $[b_i - \hat{b}_i, b_i + \hat{b}_i]$  دارند اما بوجه عدم قطعیت در بازه  $[0, 1]$  مقدار می‌گیرد. با توجه به این توضیحات هم‌زاد استوار مدل (۱۹) می‌تواند به‌صورت نشان داده شود:

$$\text{Min } c'x$$

$$s.t: \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \geq b_i + \max \hat{b}_i \eta_i \quad \forall i$$

$$0 \leq \eta_i \leq \Gamma_i'$$

$$x \geq 0$$

$$(24)$$

که معادل با مساله برنامه ریزی خطی زیر است:

$$\text{Min } c'x$$

$$s.t: \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \geq b_i + \Gamma_i' \hat{b}_i \quad \forall i$$

$$x \geq 0$$

$$(25)$$

در این حالت زمانی که  $\Gamma_i'$  در مقادیر ۰ و ۱ تنظیم می‌شود به ترتیب هیچ محافظت و محافظت کامل در برابر عدم قطعیت وجود دارد. به‌علاوه تغییر دادن  $\Gamma_i'$  در بازه  $(0, 1)$  به کنترل درجه محافظه کاری جواب استوار کمک می‌کند.

$$k_{i,t,q}^1, \lambda_{i,t}^1 \geq 0 \quad \forall i, t, q, \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \sum_q \sigma \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} - \sum_q k_{i,t,q}^2 \\ - \Gamma_{i,t}^2 \lambda_{i,t}^2 + v_i^{t-1} \\ \geq \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t \\ + v_i^t \quad \forall i, t, \end{aligned} \quad (42)$$

$$\lambda_{i,t}^2 + k_{i,t,q}^2 \geq \sigma \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad (43)$$

$$\forall i, t, q,$$

$$k_{i,t,q}^2, \lambda_{i,t}^2 \geq 0 \quad \forall i, t, q, \quad (44)$$

برای به دست آوردن همزاد استوار محدودیت‌ها (۶) و (۷)، یک متغیر کمکی  $x_0 = -1$  برای انتقال ضریب سمت راست به سمت چپ به کار گرفته شده و سپس محدودیت‌های اصلی به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} \sum_q \beta_n \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \varphi_n x_0 \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \\ + \sum_q k_{i,t,q}^4 + \sum_w k_{w \rightarrow i}^{1t} \\ + \Gamma_{i,t}^4 \lambda_{i,t}^4 \leq x n_i^t \end{aligned} \quad (45)$$

$$\forall i, t,$$

$$\lambda_{i,t}^4 + k_{i,t,q}^4 \geq \beta_n \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad (46)$$

$$\forall i, t, q,$$

$$\lambda_{i,t}^4 + k_{w \rightarrow i}^{1t} \geq \hat{\varphi}_n x w_{w \rightarrow i}^t \quad (47)$$

$$\forall i, t, w,$$

$$\lambda_{i,t}^4, k_{i,t,q}^4, k_{w \rightarrow i}^{1t} \geq 0 \quad (48)$$

$$\forall i, t, q, w,$$

$$\begin{aligned} \sum_q \beta_p \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \varphi_p x_0 \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \\ + \sum_q k_{i,t,q}^5 + \sum_w k_{w \rightarrow i}^{2t} \\ + \Gamma_{i,t}^5 \lambda_{i,t}^5 \leq x p_i^t \end{aligned} \quad (49)$$

$$\forall i, t,$$

$$\lambda_{i,t}^5 + k_{i,t,q}^5 \geq \beta_p \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad (50)$$

$$\forall i, t, q,$$

در هر یک از محدودیت‌های (۲) تا (۴) فقط ضریب سمت راست آلوده به 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:

$$\sum_i x f_{f \rightarrow i}^t \quad (33)$$

$$\leq \text{cap} f_f^t - \Gamma^{f,t} \cdot \widehat{\text{cap}} f_f^t \quad \forall f, t,$$

$$\sum_i x w_{w \rightarrow i}^t \quad (34)$$

$$\leq \text{cap} w_w^t - \Gamma^{w,t} \cdot \widehat{\text{cap}} w_w^t \quad \forall w, t,$$

$$\sum_i x c_{c \rightarrow i}^t \quad (35)$$

$$\leq \text{cap} c_c^t - \Gamma^{c,t} \cdot \widehat{\text{cap}} c_c^t \quad \forall c, t,$$

برای محدودیت (۵) که بیش از یک پارامتر غیرقطعی را در برمی‌گیرد، محدودیت‌های همزاد استوار زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \sum_q \beta_w \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \sum_q k_{i,t,q} \\ + \Gamma_{i,t} \lambda_{i,t} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\leq \sum_f x f_{f \rightarrow i}^t + \sum_w x w_{w \rightarrow i}^t \quad \forall i, t,$$

$$\lambda_{i,t} + k_{i,t,q} \quad (37)$$

$$\geq \beta_w \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad \forall i, t, q,$$

$$k_{i,t,q}, \lambda_{i,t} \geq 0 \quad \forall i, t, q, \quad (38)$$

که در آن‌ها  $k_{i,t,q}$  و  $\lambda_{i,t}$  متغیرهای دوگان هستند و  $\Gamma_{i,t}$  بودجه عدم قطعیت می‌باشد که در بازه  $[0, q]$  مقدار می‌گیرد،  $q$  تعداد ضرایب غیرقطعی محدودیت (۵) می‌باشد. به طریقه مشابهی همزاد استوار محدودیت‌ها (۸) و (۹) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_q \beta_c \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} + \sum_q k_{i,t,q}^1 \quad (39)$$

$$+ \Gamma_{i,t}^1 \lambda_{i,t}^1 \leq \sum_c x c_{c \rightarrow i}^t \quad \forall i, t,$$

$$\lambda_{i,t}^1 + k_{i,t,q}^1 \quad (40)$$

$$\geq \beta_c \vartheta_{i,t} \delta_q Y_{i,q} \quad \forall i, t, q,$$

برخی گونه‌های جلبک‌ها می‌باشد و (۴) وجود نیروگاه‌های تولید برق در مناطق مناسب آب و هوایی که می‌توانند به عنوان منبع کربن دی‌اکسید برای رشد جلبک‌ها به کار گرفته شوند و از انتشار بخش اعظمی از گازهای گل‌خانه‌ای به اتمسفر جلوگیری شود (۲۱، ۲۲). لازم به ذکر است که صنعت تولید سوخت سبز از جلبک‌ها صنعتی بسیار نوپا محسوب می‌شود و فازهای اولیه توسعه آن در کشور های استرالیا، آمریکا و ژاپن در حال شکل‌گیری است (۴، ۱۶). با توجه به این که تا به حال آنالیزهای اقتصادی در ارتباط با تولید سوخت سبز از جلبک‌ها در کشور انجام نگرفته است، لذا در این مطالعه موردی داده‌های مورد نیاز مدل با استفاده از آنالیزهای اقتصادی انجام گرفته در سایر کشورها تخمین زده می‌شود.

#### مفروضات و داده‌های مدل

در این مطالعه موردی، مفروضات و داده‌های زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

(۱) افق برنامه ریزی به مدت یک سال متشکل از ۱۲ ماه در نظر گرفته شده است.

(۲) یکی از مهم‌ترین عوامل اقتصادی تاثیرگذار در مدل توسعه داده شده، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی لوله‌گذاری آب می‌باشد. با توجه به این که نحوه لوله‌گذاری برای انتقال آب به سایت‌های تولید جلبک‌ها بسیار شبیه به لوله‌گذاری آب شهری است، هزینه‌های مربوط به لوله‌گذاری آب بر اساس فهرست بهای رشته شبکه توزیع آب سال ۱۳۹۳ محاسبه شده است. این محاسبات بر اساس لوله‌گذاری با قطر ۲۰۰ میلی‌متر انجام شده است. هم‌چنین قیمت لوله‌گذاری برای کم‌ترین شیب موجود در این فهرست بها (کمتر از ۸ درجه) در نظر گرفته شده است.

(۳) در ارتباط با لوله‌گذاری مورد نیاز برای انتقال کربن دی‌اکسید از نیروگاه‌های تولید برق به سایت‌های تولید، شباهت بسیاری بین این نوع لوله‌گذاری و لوله‌گذاری گاز شهری وجود دارد، لذا هزینه‌های مربوط به انتقال کربن دی‌اکسید بر اساس فهرست بهای اختصاصی تأسیسات نفت و گاز سال ۱۳۹۰ تخمین زده شده است. این محاسبات بر اساس لوله‌های فولادی

$$\lambda_{i,t}^5 + k_{w \rightarrow i}^{2t} \geq \hat{\varphi}_p x w_{w \rightarrow i}^t \quad (51)$$

$$\forall i, t, w,$$

$$\lambda_{i,t}^5, k_{i,t,q}^5, k_{w \rightarrow i}^{2t} \geq 0 \quad (52)$$

$$\forall i, t, q, w,$$

در اینجا  $\lambda_{i,t}^{4/5}$ ،  $k_{i,q}^{4/5}$ ،  $k_{w \rightarrow i}^{t1/2}$  متغیرهای دوگان هستند و بودجه‌های  $\Gamma_{i,t}^{4/5}$  در بازه  $[0, q + w]$  مقدار می‌گیرند. برای محدودیت تقاضا (۱۷)، بودجه‌های عدم قطعیت با مقدار در بازه  $[0, 1]$  در نظر گرفته شده و محدودیت‌های زیر اضافه می‌شود:

$$\sum_i \sum_m x b_{i \rightarrow m}^t \geq d_t + \Gamma_{m,t} \hat{d}_{m,t} \quad (53)$$

$$\forall m, t,$$

#### مطالعه موردی

در این بخش عمل‌کرد مدل توسعه داده با استفاده از یک مطالعه موردی به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین تولید توسعه سوخت سبز از جلبک‌ها در کشور ارزیابی و آنالیز می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به این که مطالعه حاضر اولین مطالعه در راستای توسعه مدل زنجیره تأمین تولید سوخت سبز جلبک در کشور می‌باشد، کل کشور در مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. با توسعه هر چه بیشتر این نوع سوخت در کشور می‌توان برای استان‌های مختلف به طور مجزا مدل‌های زنجیره تأمین مطالعه شوند. در میان کشور های آسیایی، ایران دارای قابلیت‌ها و انگیزه‌های مختلفی برای تولید سوخت سبز از جلبک‌ها می‌باشد که باعث می‌شود به کارگیری مدل در کشور به عنوان یک مطالعه موردی کاربردی در نظر گرفته شود. از مهم‌ترین انگیزه‌های تولید سوخت سبز جلبکی در ایران می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: (۱) گستردگی جغرافیایی وسیع که موجب در دسترس بودن حالت‌های مختلف آب و هوایی در طول سال می‌شود (برای مثال استان‌های جنوبی کشور حتی در فصول سرد سال از دمای بالایی برخوردارند که رشد جلبک‌ها و تولید سوخت در سرتاسر سال را امکان‌پذیر می‌سازد)، (۲) وجود زمین‌های ماسه‌ای و نمکی گسترده در کشور که می‌تواند برای ساخت حوضچه‌های رشد جلبک‌ها استفاده شوند، (۳) در دسترس بودن منابع آب‌های شور فراوان در دریای مازندران و خلیج فارس که ماده اولیه مناسبی برای رشد

مختلف تولید سوخت و میزان نیتروژن و فسفر موجود در فاضلاب در جدول (۱) نشان داده شده است.

(۷) برای احداث سایت‌های رشد جلبک‌ها ۲۰ مکان پیشنهادی در استان‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

(۸) برای نواحی عرضه سوخت (تقاضا)، ۸ استان تهران، قزوین، اصفهان، شیراز، قم، مرکزی، کرمانشاه و یزد به عنوان استان های آزمایشی در فاز های اولیه توسعه سوخت سبز در نظر گرفته شده است.

(۹) هدف مطالعه جایگزینی مصرف ۵ درصد سوخت کنونی با سوخت سبز تعیین شده است و میزان مصرف در استان های ذکر شده بر اساس اطلاعات شرکت توزیع فرآورده های نفتی ایران تخمین زده شده است (۲۷).

(۱۰) ۲۵ نیروگاه تولید برق در کشور، ۳۰ تصفیه خانه فاضلاب، ۳۵ منبع آب شیرین و ۱۳ منبع آب شور بر اساس آنالیز های GIS شناسایی شده و در مدل به کار گرفته می شوند.

#### نتایج مدل

در این بخش مهم‌ترین نتایج به دست آمده از به کارگیری مدل‌های قطعی و استوار زنجیره تامین توسعه داده شده در مطالعه موردی تحلیل شده و تفاوت‌های بین آن‌ها بررسی می‌شود. لازم به ذکر است مدل‌های قطعی و استوار توسط حل کننده CPLEX نرم افزار بهینه سازی GAMS 24.1.2 حل شده‌اند.

#### هزینه کل زنجیره تأمین و عمل کرد محاسباتی

در ابتدا لازم است مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین جلبک‌ها در حالت‌های قطعی و استوار از منظر هزینه کل زنجیره تأمین و عمل کرد محاسباتی مقایسه شوند. جدول (۲) هزینه کل زنجیره تأمین و زمان محاسباتی مدل زنجیره تأمین در حالت قطعی و استوار را نشان می‌دهد. در این آزمایش برای مدل‌های بهینه سازی استوار، دامنه نوسان پارامترهای غیرقطعی در سطوح ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ تنظیم می‌شود و هم‌چنین سطح محافظه‌کاری که به وسیله بودجه عدم قطعیت  $\Gamma$  کنترل می‌شود در مقادیر ۷۰٪، ۸۵٪ و ۹۹٪ تنظیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های استوار منجر به هزینه‌های زنجیره تأمین

۱۲ اینچی انجام شده است. لازم به ذکر است از آنجا که برای انتقال کربن دی اکسید از نیروگاه های تولید برق لازم است در محل نیروگاه ها واحد های ذخیره و نگهداری کربن دی اکسید علاوه بر لوله گذاری احداث شود، به هزینه های محاسبه شده بر اساس لوله گذاری شهری ۲۰ درصد افزوده شده است (۲۳).

(۴) هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی مراحل مختلف تولید سوخت (کشت جلبک ها، جداسازی جلبک ها از بستر آبی، خشک کردن جلبک ها، استخراج روغن، تبدیل روغن به سوخت) بر اساس آخرین بررسی‌های اقتصادی-تکنولوژیکی مرتبط با تولید سوخت از جلبک‌ها در آمریکا که توسط لندکوئیست<sup>۱</sup> و همکاران انجام شده است تخمین زده شده است (۲۳). لازم به ذکر است در این مطالعات اقتصادی ظرفیت سایت های تولید با توجه به ظرفیت مرحله اول فرایند تولید (حوضچه های کشت جلبک ها) در نظر گرفته شده است و هزینه ها مراحل مختلف وابسته به حوضچه‌هایی به مساحت ۴۰۰ تخمین زده شده است.

(۵) در محاسبات بالا هزینه‌های سرمایه‌گذاری خطوط انتقال آب، کربن دی اکسید و سایت‌های تولید برای ظرفیت پایه محاسبه شده است. برای تخمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری خطوط انتقال و سایت‌های تولید با ظرفیت بالاتر رابطه زیر به کار گرفته می‌شود.

$$Cost = Cost_{ref} \times \left( \frac{Cap}{Cap_{ref}} \right)^{\beta} \quad (54)$$

در این رابطه  $Cost_{ref}$  هزینه سرمایه‌گذاری خطوط انتقال و سایت‌های تولید با ظرفیت پایه  $Cap_{ref}$ ،  $Cost$  هزینه سرمایه‌گذاری خطوط انتقال و سایت‌های تولید با ظرفیت پایه با ظرفیت بالاتر  $Cap$  و  $\beta$  ضریب مقیاس است. لازم به ذکر است ضریب مقیاس در این محاسبات برای خطوط انتقال آب و کربن دی اکسید به ترتیب ۰٫۸ (۲۴) و ۰٫۹ (۲۵) و برای سایت‌های تولید ۰٫۸۵ (۲۳) در نظر گرفته شده است.

(۶) پارامترهای دیگر مدل که شامل میزان مواد اولیه موردنیاز به ازای هر واحد تولید سوخت، میزان‌های تبدیل در مراحل

دامنه نوسان ۱۰٪ منجر به افزایش هزینه زنجیره تأمین به میزان ۱۳ درصد می‌شوند که هزینه‌ای به نسبت معقول محسوب می‌شود. نکته حایز اهمیت این است که میزان محافظه‌کاری را درجه ریسک پذیری تصمیم گیرنده تعیین می‌کند. در واقع تصمیم گیرنده به شدت ریسک گریز از سطوح عدم قطعیت بالاتری استفاده می‌کند و نتیجتاً لازم است برای آن هزینه بالاتری را بپردازد. در مقابل تصمیم گیرندگان ریسک پذیر افزایش قابلیت اطمینان با یک هزینه معقول را ترجیح می‌دهند. از مهم‌ترین نتایج این جدول می‌توان به این نکته اشاره نمود که مدل‌های استوار خلی در ارتباط با زمان حل مدل ایجاد نکرده و زمان محاسباتی مناسبی در مقایسه با مدل‌های قطعی فراهم می‌کند.

بالاتری در مقایسه با مدل‌های قطعی می‌شوند. گرچه از پیش انتظار می‌رفت که مدل‌های بهینه سازی استوار به علت افزایش پایداری زنجیره تأمین و تسخیر عدم قطعیت‌های محیط زنجیره تأمین، هزینه بالاتری در مقایسه با مدل‌های قطعی داشته باشند، اما لازم است میزان اختلاف هزینه بررسی شود. برای نمونه یک نسخه به شدت محافظه کار مدل استوار (درجه محافظه کار=۹۹٪، دامنه نوسان=۳۰٪) منجر به افزایش هزینه ۷۱٪ مدل تولید دسته‌ای می‌شود. با وجود این که هزینه استوار بودن برای این نمونه به شدت بالاست، استفاده از سطوح محافظه‌کاری و دامنه نوسان پایین‌تر که یک تعادلی بین استوار بودن و افزایش هزینه فراهم می‌کند منجر به افزایش هزینه معقول‌تری می‌شوند. برای نمونه درجه محافظه‌کاری ۷۰٪ و

#### جدول ۱- پارامترها و مقادیر تبدیل موردنیاز

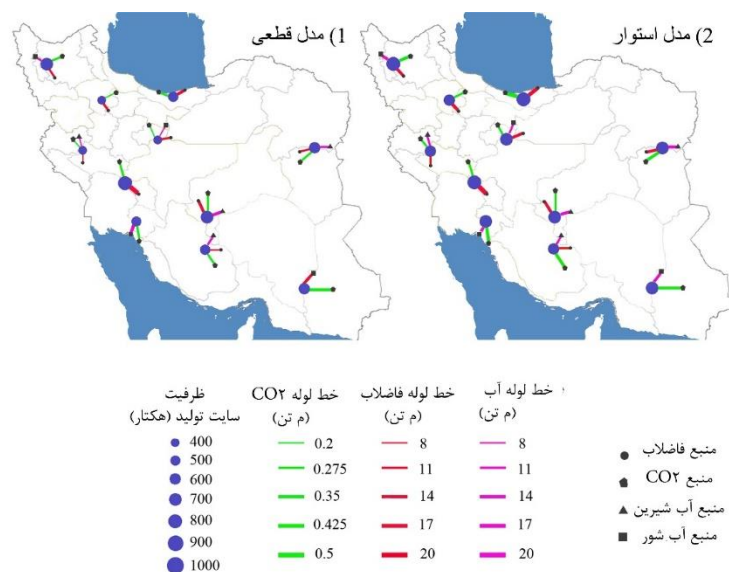
Table 1- Input parameters and conversion rates.

مقدار	پارامتر	مرجع
۲۵٪	میزان تبدیل جلبک خشک به بایودیزل	(۲۳)
۴۲ میلی‌گرم/لیتر	نیترژن موجود در فاضلاب	(۲۶)
۶٫۹ میلی‌گرم/لیتر	فسفر موجود در فاضلاب	(۲۶)
۴۰۰ لیتر/ کیلوگرم جلبک	آب موردنیاز تولید جلبک	(۱۶)
۱٫۶ کیلوگرم/ کیلوگرم جلبک	نیترژن موردنیاز تولید جلبک	(۱۶)
۳٫۲ کیلوگرم/ کیلوگرم جلبک	فسفر موردنیاز تولید جلبک	(۱۶)
۶٫۲ کیلوگرم/ کیلوگرم جلبک	کربن دی اکسید موردنیاز تولید جلبک	(۱۶)

جدول ۲- عمل کرد مدل های قطعی و استوار از منظر هزینه کل و زمان محاسباتی

Table 2- Total cost and computational time of deterministic and robust models.

مدل قطعی		مدل بهینه سازی استوار						دامنه نوسان
		سطح محافظه کاری						
۵۲۰.۸	۴۲۴	۹۹٪	۸۵٪	۷۰٪				
		۶۱۶,۸۶	۵۸۵	۵۷۸,۵۱	۵۸۷	۵۵۸,۱۲	۵۲۳	۱۰٪
		۶۹۴,۱۲	۴۳۵	۶۴۶,۶۲	۶۵۵	۶۰۸,۱۹	۶۳۲	۲۰٪
		۸۶۲,۱۵	۴۹۹	۸۷۸,۱۲	۵۹۷	۷۱۲,۵۸	۶۵۰	۳۰٪



شکل ۲- طراحی بهینه زنجیره تامین در حالت قطعی و استوار

Figure 2- Optimal supply chain design for deterministic and robust models.

به ازای تقریباً تمام مقادیر پارامترهای غیرقطعی بهینه باقی می ماند. نتیجه مهم دیگر از شکل (۳) می تواند به وسیله مقایسه ظرفیت بهینه سایت های تولید در مدل های قطعی و استوار استخراج شود. به طور کلی مدل های استوار در مقایسه با مدل های قطعی تجهیزات تولید با ظرفیت بالاتر و یا تجهیزات بیشتر با ظرفیت کم تر تعیین می کنند به علت این که توانایی رضای بدترین مقادیر محتمل پارامترهای غیرقطعی را فراهم کنند. همان طور که نتایج نشان می دهد در مورد زنجیره تامین جلبک ها به کار گیری تجهیزات با ظرفیت بالاتر پیشنهاد داده شده است. این موضوع در ارتباط با خطوط انتقال لوله نیز

### طراحی بهینه زنجیره تامین در حالت قطعی و استوار

به عنوان یکی از مهم ترین تصمیمات شبکه زنجیره تامین جلبک ها، موقعیت و ظرفیت سایت های تولید و نیز خطوط انتقال در این بخش بررسی می شود. شکل (۳) ظرفیت و موقعیت سایت های تولید و خطوط لوله را تحت مدل قطعی و مدل استوار (نوسان داده ۲۰٪ و درجه محافظه کاری ۹۹٪) نشان می دهد. همان طور که آشکار است مدل های قطعی و استوار مکان های کاندید مشابهی را برای سایت های تولید پیشنهاد می کنند، لذا می توان گفت که موقعیت بهینه سایت ها تا حد زیادی استوار است. به عبارت دیگر بهینه بودن این تصمیمات تحت نوسان داده ها تغییر نکرده و موقعیت سایت ها



+25	هزینه عملیاتی لوله گذاری	4+
-25	هزینه عملیاتی لوله گذاری	4-
+25	هزینه سرمایه‌گذاری سایت‌های تولید	5+
-25	هزینه سرمایه‌گذاری سایت‌های تولید	5-
+25	هزینه عملیاتی سایت‌های تولید	6+
-25	هزینه عملیاتی سایت‌های تولید	6-
+25	در دسترس بودن آب شیرین	7+
-25	در دسترس بودن آب شیرین	7-
+25	در دسترس بودن فاضلاب	8+
-25	در دسترس بودن فاضلاب	8-
+25	در دسترس بودن کربن دی اکسید	9+
-25	در دسترس بودن کربن دی اکسید	9-
+25	هزینه حمل‌ونقل	10+
-25	هزینه حمل‌ونقل	10-

برای بررسی اثر پارامترهای ذکر شده بر هزینه کل زنجیره تولید پیوسته، هر یک از پارامترها به‌طور مستقل بر اساس حدود نشان داده‌شده در جدول (۳) تغییر داده می‌شوند. شکل (۳) نتایج مرتبط با این آزمایش را برای هر یک از این پارامترها نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که هزینه تولید سوخت در حالت پایه ۸۸,۵ هزار ریال به ازای هر لیتر می‌باشد. برای کاهش این هزینه، میزان رشد جلبک‌ها و میزان تبدیل جلبک خشک به بایودیزل اهمیت ویژه‌ای دارند. به‌طوری‌که یک افزایش مثبت ۲۵ درصدی در این پارامترها به ترتیب منجر به هزینه تولید به ازای هر لیتر ۲۶,۹ و ۳۲,۶ هزار ریال می‌شود که به مقدار قابل توجهی از هزینه پایه کمتر می‌باشد. بر اساس این نتیجه می‌توان گفت که گرچه قیمت اولیه تولید سوخت از جلبک‌ها بسیار بالاتر از قیمت کنونی سوخت‌های فسیلی در کشور می‌باشد اما با افزایش حاصل‌خیزی و محتوای روغنی جلبک‌ها (میزان تبدیل جلبک خشک به بایودیزل) می‌توان این قیمت را به‌صورت چشم‌گیری به قیمت سوخت دیزلی نزدیک کرد. اثر قوی‌تر تغییر در میزان حاصل‌خیزی نسبت به مقدار روغن یک نتیجه مهم برای تحقیقات آینده بیولوژیکی فراهم می‌کند. به این صورت که تمرکز بر بهبود حاصل‌خیزی مزیت اقتصادی بالاتری از تمرکز بر بهبود روغن فراهم می‌کند از آن جا که در واقعیت یک رابطه معکوسی بین این دو مقدار وجود

مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر در مدل استوار خطوط انتقال لوله با ظرفیت بالاتری در مقایسه با مدل قطعی پیشنهاد شده است.

### آنالیز حساسیت

در زنجیره تأمین ریز جلبک‌ها پارامترهای عملیاتی و هزینه‌ای مختلفی وجود دارند که می‌توانند نقش مهمی در کاهش هزینه داشته باشند. همان‌طور که می‌دانیم روش آنالیز حساسیت به دنبال تغییر مقدار پارامترهای ورودی مختلف و بررسی اثر آن بر تابع هدف می‌باشد. انجام این روش برای پارامترهای عملیاتی و هزینه‌ای زنجیره تأمین جلبک‌ها اهمیت هر یک از آن‌ها را بر هزینه تولید آشکار کرده و هم‌چنین مشخص می‌کند که با تغییر کدام یک از پارامترها می‌توان به هزینه سوخت پایین‌تری دست پیدا کرد. با مشخص شدن مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار آشکار می‌شود که تلاش‌های کاهش هزینه لازم است به سمت کدام پارامترها و بخش‌های زنجیره تأمین ریز جلبک‌ها متمرکز شود. در این بخش اثرات مهم‌ترین عوامل مهم زنجیره تأمین ریز جلبک‌ها که شامل (۱) میزان رشد جلبک‌ها، (۲) میزان تبدیل جلبک خشک به بایودیزل، (۳) هزینه سرمایه‌گذاری لوله گذاری، (۴) هزینه عملیاتی لوله گذاری، (۵) هزینه سرمایه‌گذاری سایت‌های تولید، (۶) هزینه عملیاتی سایت‌های تولید، (۷) میزان آب شیرین در دسترس، (۸) میزان فاضلاب در دسترس، (۹) میزان کربن دی اکسید در دسترس و (۱۰) هزینه‌های حمل‌ونقل است، بر هزینه تولید هر لیتر سوخت تحلیل می‌شود.

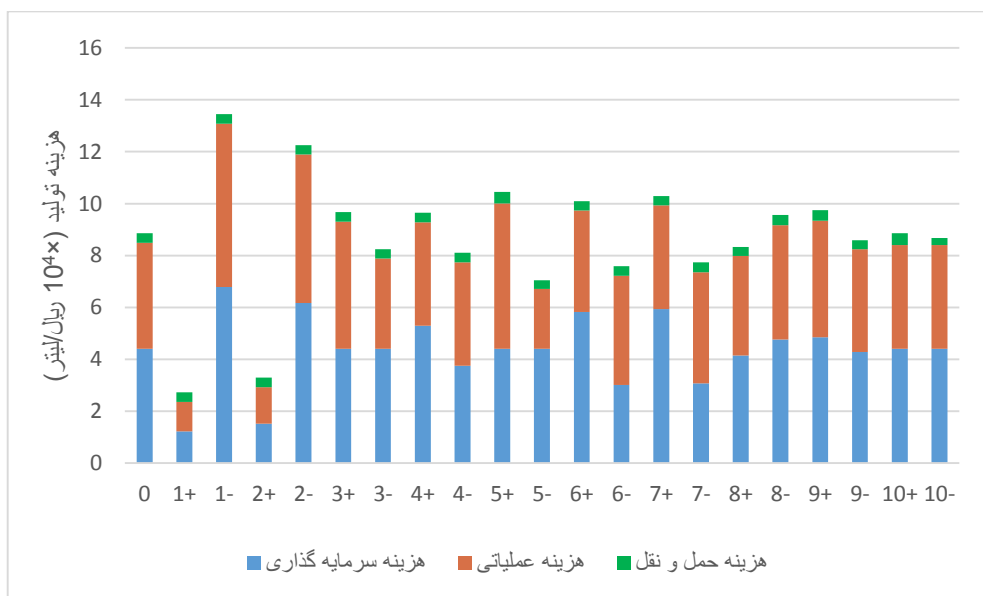
### جدول ۳- محدوده تغییر پارامترهای تحلیل حساسیت

Table 3- Variation range of sensitivity analysis parameters.

شماره	پارامتر	حدود
0	مدل پایه	
1+	رشد جلبک‌ها	+25
1-	رشد جلبک‌ها	-25
2+	میزان تبدیل جلبک به بایودیزل	+25
2-	میزان تبدیل جلبک به بایودیزل	-25
3+	هزینه سرمایه‌گذاری لوله گذاری	+25
3-	هزینه سرمایه‌گذاری لوله گذاری	-25

اکسید تغییر قابل توجهی نمی‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل زنجیره تأمین توسعه داده شده با در نظر گرفتن آب شیرین و فاضلاب امنیت مناسبی در ارتباط با تأمین آب فراهم می‌کند، اما تغییرات در دسترس بودن کربن دی اکسید باعث تغییرات بیش تری بر هزینه می‌شود، لذا لازم است تجهیزات پیشرفته‌تری برای تسخیر و ذخیره کربن دی اکسید انتشاری در محل نیروگاه‌های تولید برق توسعه داده شود تا به وسیله آن بتوان مقدار بالاتری با بهره‌وری بالاتر کربن دی اکسید فراهم نمود. از طرفی نتایج نشان می‌دهد تغییرات هزینه حمل‌ونقل نقش پر رنگی بر هزینه کل ندارد. این موضوع از آن جا ناشی می‌شود که حمل‌ونقل فقط محدود به حمل‌ونقل بایودیزل بین سایت‌های تولید سوخت و مشتریان می‌شود و هزینه حمل‌ونقل بخش کوچکی از زنجیره تأمین را در برمی‌گیرد.

دارد و افزایش یکی از این دو مقدار منجر به کاهش مقدار دیگر می‌شود (۴). از دیگر پارامترهای تأثیرگذار می‌توان به هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی سایت‌های تولید اشاره نمود. به عبارت دقیق‌تر کاهش ۲۵ درصدی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی به ترتیب منجر به هزینه ۷۰,۴ و ۷۵,۹ هزار ریالی به ازای هر لیتر می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد برخلاف این که انتظار می‌رفت کاهش هزینه‌های سایت‌های تولید بیش‌ترین تأثیر را برای کاهش هزینه دارد، حاصل‌خیزی و میزان محتوای روغنی نقش بسیار پررنگ‌تری دارند. در بین پارامترهای دیگر اثر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی خطوط انتقال قابل تأمل است. این نتیجه اهمیت ساخت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و نیروگاه‌های تولید برق در مناطق مناسب برای رشد جلبک‌ها به‌منظور کاهش هزینه انتقال مواد اولیه را نشان می‌دهد. آنالیز حساسیت هم‌چنین نشان می‌دهد که هزینه کل نسبت به تغییرات در دسترس بودن آب شیرین، فاضلاب و کربن دی



شکل ۳- نتایج آنالیز حساسیت

Figure 3- Results of sensitivity analysis.

#### اعتبار سنجی مدل های توسعه داده شده

مطلوبیت (استحکام) جواب ها به دست آمده از آن ها ارزیابی گردد. برای این هدف از روش اعتبار سنجی مدل های برنامه ریزی استوار که توسط پیشوایی و همکاران ارایه شده است استفاده می شود (۲۷). این روش که به دنبال تولید واقعیت

همان طور که در بخش نتایج مدل ها مشاهده شد، جواب های به دست آمده از مدل های قطعی و استوار طراحی شبکه زنجیره تامین متفاوت است. لذا لازم است جواب های به دست آمده از مدل های قطعی و استوار بررسی و مقایسه شوند و

تولید شده حل شده و مقادیر تابع هدف به دست آمده ( $Z$ ) ذخیره می‌شوند.

(۴) میانگین و انحراف معیار مقادیر تابع هدف ( $Z$ ) به عنوان شاخص‌های ارزیابی برای مقایسه مدل‌ها محاسبه می‌شوند.

نتایج حاصل از این آزمایش برای ارزیابی جواب‌های قطعی و استوار در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، مقدار میانگین نشان می‌دهد که در تمام موارد مدل استوار عمل کرد بهتری در مقایسه با مدل قطعی داشته است. نکته حایز اهمیت این است که با افزایش محدوده نوسانی اختلاف مقدار میانگین دو مدل افزایش پیدا می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد مدل‌های استوار در محیط‌های به شدت غیر قطعی که در آن‌ها پیش‌بینی مقدار دقیق پارامترها به شدت مشکل است، در مقایسه با مدل قطعی بهتر عمل می‌کنند. از طرفی شکل (۴) نشان می‌دهد که مقدار انحراف معیار مدل استوار تحت مقادیر واقع‌نمایی (شبه‌سازی واقعیت) بسیار کمتر از انحراف معیار مدل قطعی است. این نتیجه آشکار می‌کند که جواب به دست آمده از مدل استوار در صورت انحراف و نوسان پارامترها، نزدیک مقدار بهینه باقی می‌ماند (مفهوم استواری جواب مدل استوار)، این در حالی است که در صورت نوسان پارامترها به کارگیری مدل استوار در محیط‌های غیر قطعی که احتمال نوسان پارامترها به شدت بالا است انتخاب مناسب‌تری می‌باشد. لازم به ذکر است اگر چه مدل استوار در این مطالعه موردی نسبت به مدل قطعی عمل کرد مناسب‌تری داشته است، اما لزومی ندارد که در سایر مطالعات نیز عمل کرد مدل استوار بهتر باشد. در واقع میزان ریسک محیط مورد مطالعه معیار مهمی است که مدل مطلوب را مشخص می‌نماید.

محتمل در آینده برای ارزیابی نتایج استوار از مراحل زیر تشکیل می‌شود:

(۱) مدل‌های قطعی و استوار تحت داده‌های اسمی حل شده و جواب مدل قطعی ( $x_a^*, y_a^*$ ) و مدل استوار ( $x_r^*, y_r^*$ ) ذخیره می‌شوند.

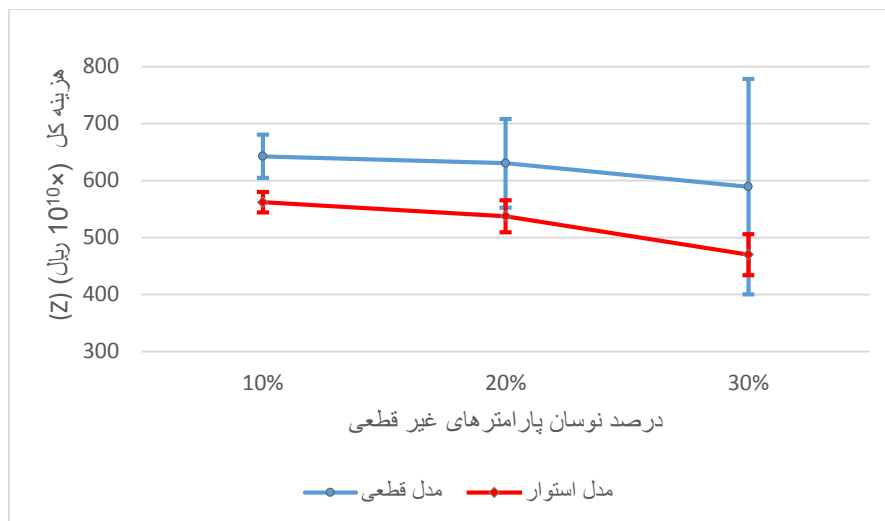
(۲) جواب‌های به دست آمده از مدل‌های قطعی و استوار مستقلاً در "مدل واقع‌نمایی" زیر جایگزین می‌شود:

$$\text{Min } Z = t^{\text{Real}} x^* + c^{\text{Real}} y^* + \sum_i \pi R_i \quad (55)$$

$$\sum_j a_{ij}^{\text{Real}} x^* + R_i \leq b_i \quad \forall i \quad (56)$$

در این مدل برنامه‌ریزی خطی که فرم فشرده مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین است، ضرایب تابع هدف و محدودیت‌ها به صورت تصادفی از بازه محتمل متناظرشان تولید می‌شوند. برای مثال در ارتباط با  $\tilde{a}_{ij}$  که یک ضریب غیر قطعی در محدودیت‌ها است، یک مقدار تصادفی بین حد بالا و پایین محتمل آن،  $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ ، به صورت تصادفی تولید می‌شود. لازم به ذکر است از آنجا که ممکن است به ازای برخی از جواب‌های ( $x^*, y^*$ )، محدودیت‌های مدل نشدنی شوند، متغیر لقی  $R_i$  در نظر گرفته می‌شود، اما در مقابل جریمه‌ای برای نقض این محدودیت در نظر گرفته می‌شود. نتیجتاً در این مدل،  $R$  تنها متغیر تصادفی می‌باشد و سایر مقادیر به صورت پارامتر در مدل جای‌گذاری می‌شود.

(۳) مرحله دو (تولید مقدار تصادفی برای ضرایب غیر قطعی) به تعداد ۵۰ بار تکرار شده و مدل بالا به ازای هر مقدار تصادفی



شکل ۴- میانگین و واریانس تابع هدف مدل واقع نمایی تحت جواب های مدل های قطعی و استوار

Figure 4- Mean and variance of objective function of realization model under solution of deterministic and robust model.

#### نتیجه گیری

بحث به ازای فاصله های محدود نوسانی اندک است. نتایج مربوط به هزینه های تولید نشان می دهد که هزینه تولید هر لیتر سوخت سبز از جلبک ها در مقایسه با سوخت های فسیلی بالا می باشد اما این هزینه با بهبود اندک در میزان رشد جلبک ها و میزان تبدیل جلبک خشک به بایودیزل به صورت چشم گیری کاهش پیدا می کند. نتیجتاً با کاهش ذخایر سوخت های فسیلی در آینده و به تبع آن افزایش قیمت سوخت، می توان جلبک ها را به عنوان یکی از مناسب ترین جایگزین ها برای مصرف سوخت های فسیلی در کشور به حساب آورد.

#### Reference

1. Yue D, You F, Snyder SW. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*. 2014;66:36-56.
2. Sims RE, Mabee W, Saddler JN, Taylor M. An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource technology*. 2010;101(6):1570-80.
3. Mata TM, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review.

افزایش روزافزون تقاضای سوخت های فسیلی، محدود بودن منابع نفتی و آلودگی های زیست محیطی از مهم ترین انگیزه های توسعه سوخت های سبز در کشور هستند. در بین انواع مواد اولیه برای تولید سوخت سبز، ریز جلبک ها به عنوان یکی از بهره ورترین منابع توجهات زیادی را در سال های اخیر در دنیا به خود جلب کرده است. این مطالعه برای بررسی توسعه چنین سوخت هایی در کشور به ارایه مدل طراحی

شبکه زنجیره تأمین جلبک ها می پردازد. بر این اساس یک مدل طراحی شبکه که تمام فعالیت های مرتبط با تولید سوخت از تأمین مواد اولیه تا تولید سوخت و سپس عرضه سوخت را در برمی گیرد توسعه داده شده است. یکی از مهم ترین دغدغه های مدل های طراحی شبکه سوخت های سبز موضوع عدم قطعیت می باشد. این موضوع از آن جا ناشی می شود که تولید سوخت های سبز در فازهای اولیه توسعه می باشد و تعیین مقدار دقیق پارامترهای مورد نیاز مدل زنجیره تأمین مشکل است. در این مورد برای مقابله با عدم قطعیت زنجیره تأمین جلبک ها از روش بهینه سازی استوار استفاده شده است.

نتایج نشان می دهد که با افزایش اندکی در هزینه کل زنجیره تأمین می توان پایداری زنجیره تأمین جلبک ها را بهبود بخشید. به عبارت دقیق تر هزینه استوار بودن برای زنجیره تأمین مورد

- towards optimization of biofuel supply chain. *Energy*. 2014;76:513-25.
12. Zhang J, Osmani A, Awudu I, Gonela V. An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain. *Applied Energy*. 2013;102:1205-17.
  13. Osmani A, Zhang J. Economic and environmental optimization of a large scale sustainable dual feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain in a stochastic environment. *Applied Energy*. 2014;114:572-87.
  14. Sadjadi S, Omrani H. Data envelopment analysis with uncertain data: An application for Iranian electricity distribution companies. *Energy Policy*. 2008;36(11):4247-54.
  15. Yang J, Xu M, Zhang X, Hu Q, Sommerfeld M, Chen Y. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance. *Bioresource technology*. 2011;102(1):159-65.
  16. Pate R, Klise G, Wu B. Resource demand implications for US algae biofuels production scale-up. *Applied Energy*. 2011;88(10):3377-88.
  17. Soyster AL. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations research*. 1973;21(5):1154-7.
  18. Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical programming*. 2000;88(3):411-24.
  19. Li Z, Ding R, Floudas CA. A comparative theoretical and computational study on robust counterpart optimization: I. Robust Renewable and sustainable energy reviews. 2010;14(1):217-32.
  4. Davis R, Aden A, Pienkos PT. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Applied Energy*. 2011;88(10):3524-31.
  5. Maity JP, Bundschuh J, Chen C-Y, Bhattacharya P. Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives—A mini review. *Energy*. 2014;78:104-13.
  6. Balaman ŞY, Selim H. A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems. *Applied Energy*. 2014;130:289-304.
  7. Sokhansanj S, Kumar A, Turhollow AF. Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL). *Biomass and Bioenergy*. 2006;30(10):838-47.
  8. Awudu I, Zhang J. Stochastic production planning for a biofuel supply chain under demand and price uncertainties. *Applied Energy*. 2013;103:189-96.
  9. An H, Wilhelm WE, Searcy SW. A mathematical model to design a lignocellulosic biofuel supply chain system with a case study based on a region in Central Texas. *Bioresource technology*. 2011;102(17):7860-70.
  10. Shabani N, Sowlati T, Ouhimmou M, Rönnqvist M. Tactical supply chain planning for a forest biomass power plant under supply uncertainty. *Energy*. 2014;78:346-55.
  11. Azadeh A, Arani HV, Dashti H. A stochastic programming approach

25. Doctor R, Palmer A, Coleman D, Davison J, Hendriks C, Kaarstad O, et al. Chapter 4: Transport of CO<sub>2</sub>. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, R. Pichs-Madruga, S. Timashev, Eds., Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge; 2005.
26. Wigmosta MS, Coleman AM, Skaggs RJ, Huesemann MH, Lane LJ. National microalgae biofuel production potential and resource demand. *Water Resources Research*. 2011;47(3).
27. Iran Statistical Yearbook of oil products consumption. National Iranian Oil Products Distribution Company (NIOPDC) 2012.
28. Pishvaei MS, Rabbani M, Torabi SA. A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*. 2011;35(2):637-49.
- linear optimization and robust mixed integer linear optimization. *Industrial & engineering chemistry research*. 2011;50(18):10567-603.
20. Bertsimas D, Sim M. The price of robustness. *Operations research*. 2004;52(1):35-53.
21. Najafi G, Ghobadian B, Yusaf TF. Algae as a sustainable energy source for biofuel production in Iran: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(8):3870-6.
22. Tabatabaei M, Tohidfar M, Jouzani GS, Safarnejad M, Pazouki M. Biodiesel production from genetically engineered microalgae: Future of bioenergy in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(4):1918-27.
23. Lundquist TJ, Woertz IC, Quinn N, Benemann JR. A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. *Energy Biosciences Institute*. 2010:1.
24. Kally E, Fishelson G. *Water and peace: water resources and the Arab-Israeli peace process*: Praeger; 1993.