

## مدل بهینه‌سازی طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی تحت تقاضای خودرگسیون برداری میانگین متحرک

مونا اسدی<sup>۱</sup>، حمید قادری<sup>۲</sup>، سعید شوالپور<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

monaasadi86@gmail.com

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

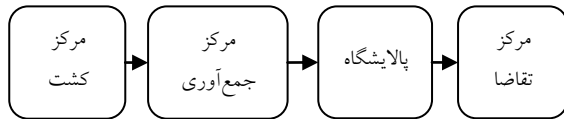
hamid.ghaderi777@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی پیشرفت، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

shavvalpour@iust.ac.ir

**چکیده:** سوخت زیستی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی در دهه اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. طراحی بهینه زنجیره تأمین، یک نیاز ضروری برای تجاری‌سازی تولید سوخت زیستی است. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی ارائه شده است که تقاضای آن از مدل‌های سری زمانی خودرگسیون برداری میانگین متحرک پیروی می‌کند. همچنین مطالعه می‌شود که چگونه ساختار سری‌های زمانی خودرگسیون برداری میانگین متحرک برای تقاضای سوخت زیستی، طراحی زنجیره تأمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یک مثال عددی برای طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی ارائه شده تا کاربرد مدل را نشان دهد و یک زنجیره تأمین بهینه را طراحی کند. سپس برای یک دوره زمانی هشت‌ساله پیش‌بینی صورت گرفته تا پیش‌بینی وسیع‌تر برای یک مدیریت کارآمد فراهم کرده و هزینه‌های کلی زنجیره را حداقل کند.

**واژه‌های کلیدی:** خودرگسیون برداری میانگین متحرک، زیست‌توده، زنجیره تأمین، سوخت زیستی، مدل‌سازی ریاضی.



شکل (۱): ساختار زنجیره تأمین سوخت زیستی

تعدادی از گزینه‌های تصمیم‌گیری و فعالیت‌های پی‌درپی از قبیل انتخاب زمین، کاشت و برداشت، حمل‌ونقل، تولید و توزیع سوخت زیستی در این زنجیره وجود دارد و این تصمیمات از طریق زنجیره تأمین مطرح و بررسی می‌شوند. برای فرایند تصمیم‌گیری بهینه و بررسی تولید سوخت زیستی، نیاز است تا مدل‌های بهینه‌سازی یا سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری فشرده توسعه یابند.

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۳</sup> یکی از شناخته‌شده‌ترین رویکردهای مدل‌سازی در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده است که در آن برخی از متغیرها عدد صحیح و برخی پیوسته‌اند. مکان‌یابی تسهیلات یکی از اهداف مهم برای استفاده کردن از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط محسوب می‌شود. متغیرهای تصمیم مکان‌یابی تسهیلات می‌توانند به هر دو صورت تکنولوژی و ظرفیت استفاده‌شده در یک تسهیل، به‌شکل باینری در نظر گرفته شوند. بدلیل آنکه طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده، لجستیک زیست‌توده را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ تصمیم‌گیران زنجیره، طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده و جریان مواد بین تسهیلات را به‌طور همزمان بهینه می‌کنند [۵]. در این باره، آن‌ها مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را توسعه داده و به‌طور همزمان طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده را بهینه کرده و جریان مواد بهینه بین تسهیلات را پیدا کرده‌اند [۶ و ۷].

برای اولین بار مول و همکاران [۸]، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توسعه داده‌اند که در آن، مکان سایت‌های پردازش بوسیله حداقل کردن هزینه‌های لجستیک زیست‌توده شامل هزینه‌های تأسیس پالایشگاه، تولید اتانول، تأمین مواد اولیه، حمل‌ونقل و... بهینه شده است. برنامه‌ریزی استراتژیک زنجیره تأمین زیست‌توده و تخصیص بهینه زیست‌توده تحت تصمیمات مکان‌یابی غیرقطعی [۹] و طراحی و تولید بهینه زنجیره تأمین اتانول زیستی همراه با تعیین برداشت [۱۰]، چند نمونه از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده هستند.

مانع اصلی برای تجاری‌سازی سوخت زیستی، فرایندهای تولید پیچیده آن است. این پیچیدگی به‌دلیل اشکال مختلفی از پارامترهای متنوع ساخته شده است. عدم قطعیت یکی از شکل‌های رایج تنوع در

## ۱. مقدمه

مصرف انرژی در جهان و به‌طور خاص در کشورهای صنعتی، به‌سبب تغییر در سبک زندگی و رشد جمعیت افزایش یافته است. علاوه‌براینکه مصرف سوخت‌های فسیلی با مشکلات مختلف اجتماعی و زیست‌محیطی همراه است، تجدیدنپذیر بودن این سوخت‌ها، نگرانی‌های مربوط به مصرف انرژی را افزایش داده است [۱]. در سال‌های اخیر، تولید سوخت‌های زیستی به‌عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده برای این مشکل مطرح شده و توجه بسیاری از محققان را به‌منظور توسعه زنجیره تأمین این سوخت‌ها به خود جلب کرده است. زیست‌توده<sup>۱</sup> به‌عنوان یک ماده اولیه شامل پسماندهای کشاورزی (متشکل از مواد گیاهی و حیوانی)، محصولات جنگلی و زباله‌های شهری و صنعتی برای تولید سوخت‌های زیستی و تولید حرارت و برق در زنجیره تأمین انرژی زیستی استفاده می‌شود [۲].

انواع زیست‌توده و سوخت‌های زیستی به سه نسل تقسیم می‌شوند: اولین نسل سوخت‌های زیستی از شکر و روغن‌های گیاهی به‌دست می‌آیند که از طریق تکنولوژی‌های متداول به سوخت زیستی تبدیل شده‌اند. بسیاری از مواد اولیه نسل اول را می‌توان به‌عنوان غذا استفاده کرد و استفاده از آن‌ها برای تبدیل به سوخت‌های زیستی می‌تواند امنیت تأمین مواد غذایی انسان‌ها را به خطر بیندازد. بنابراین استفاده از مواد اولیه غیر خوراکی برای تولید سوخت‌های زیستی افزایش یافته است. با این وجود، استفاده از مواد اولیه غیر خوراکی با چالش‌های بسیاری روبرو است [۳].

مواد اولیه زیست‌توده برای تولید نسل دوم سوخت‌های زیستی شامل زیست‌توده لیگنوسلولوزیک<sup>۲</sup>، پسماندهای کشاورزی و زباله‌ها و محصولات چوبی می‌شود. اخیراً جلبک‌ها مواد اولیه غیر خوراکی‌ای هستند که به‌عنوان نسل سوم زیست‌توده برای تولید سوخت زیستی معرفی شده‌اند. امروزه، تصمیم‌گیری برای استفاده زمین به‌منظور کشت مواد غذایی یا نسل اول مواد اولیه مورد بحث است. بنابراین محققان در حال مطالعه بر روی مواد اولیه زیست‌توده لیگنوسلولوزیک برای حل این مشکلات هستند [۴].

در این زنجیره تأمین، زیست‌توده از سایت‌های برداشت به مراکز تقاضای سوخت زیستی جریان می‌یابد. در طول این مسیر، زیست‌توده از برخی تسهیلات مانند سایت‌های برداشت، سایت‌های جمع‌آوری، پالایشگاه‌ها و مراکز توزیع عبور می‌کند. شکل (۱) فرایندهای اصلی را در زنجیره تأمین سوخت زیستی نشان می‌دهد.

1. Biomass
2. Lignocellulosic

شده است.

سیستم‌های پیش‌بینی دقیق در یک زنجیره، از ارزش بالایی برخوردارند. جهانی‌شدن منجر به پیچیدگی و اختلال در زنجیره تأمین خواهد شد. چان و همکاران [۱۷] تأثیر سیستم‌های پیش‌بینی سری‌های زمانی فازی را در یک زنجیره تأمین با اختلال، بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین نشان داده‌اند که یک راه مناسب برای تطبیق با مدل‌های خودرگرسیون برداری میانگین متحرک، استفاده از سری‌های زمانی فازی با مراتب بالاتر است. مرور مقالات موجود در ادبیات با محوریت زنجیره تأمین نشان می‌دهد که کاربرد مدل‌های سری زمانی در طراحی شبکه زنجیره تأمین تاکنون مورداستفاده قرار نگرفته است. در زنجیره تأمین سوخت زیستی، تقاضای سوخت زیستی یک پارامتر کلیدی است که بر طراحی بهینه زنجیره تأمین اثرگذار است.

تغییرپذیری تقاضای سوخت زیستی در طول زمان، باعث پیچیدگی تصمیم‌گیری درخصوص طراحی شبکه زنجیره تأمین می‌شود. بنابراین در این مقاله، یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی ارائه شده است که در آن، برای مدل‌سازی تغییرات تقاضای سوخت زیستی در طول زمانی از مدل‌های سری زمانی خودرگرسیون برداری میانگین متحرک استفاده شده است. نتایج مدل‌های خودرگرسیون برداری میانگین متحرک با عنوان مقادیر پیش‌بینی شده تقاضای سوخت زیستی در مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی به‌کار گرفته می‌شوند و بدین ترتیب طراحی بهینه زنجیره تأمین مورد مطالعه براساس مقادیر آینده یا پیش‌بینی شده تقاضا تعیین می‌شود.

ادامه مقاله بدین شرح است: در بخش بعدی تعریف مسئله بیان شده است. در بخش مدل‌سازی ریاضی، مدل‌سازی رویکرد پیشنهادشده به‌صورت گام‌به‌گام بیان شده و سپس مدل خودرگرسیون برداری میانگین متحرک توصیف شده است. در بخش بعدی، مدل پیشنهادشده روی یک مثال عددی اجرا شده است. سپس اعتبارسنجی صورت گرفته و نتیجه تحقیق بیان شده است. در انتها و در بخش علائم، فهرستی از شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم آورده شده است.

## ۲. تعریف مسئله

مسئله اصلی در این تحقیق، طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی است. این تحقیق، زنجیره تأمین سوخت زیستی را در چهار سطح مراکز کشت، مراکز جمع‌آوری، پالایشگاه‌ها، مراکز توزیع و مراکز تقاضا در نظر گرفته است. این مسئله یک مسئله تک‌هدفه و چنددوره است که در آن انتقال مواد و محصولات با استفاده از روش‌های حمل‌ونقل مختلف امکان‌پذیر است. همچنین در این مدل، ظرفیت تسهیلات به‌صورت پیوسته تعیین می‌شوند و در طول زمان باتوجهبه میزان تقاضا توسعه می‌یابند.

پارامترهای زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی است. تأمین ماده اولیه زیست‌توده، تولید سوخت زیستی و تقاضا، قیمت و لجستیک، پارامترهای متداولی هستند که همراه با عدم قطعیت هستند [۱۱].

با بررسی مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلف، می‌توان مطالعات بسیاری را مشاهده کرد که مرتبط با مدل‌های بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست‌توده تحت عدم قطعیت هستند. برای مثال، دال‌مس و همکاران [۱۲] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تصادفی پویا برای طراحی یک زنجیره تأمین سوخت زیستی تحت شرایط عدم قطعیت بازار طراحی کرده‌اند. گیارولا و همکاران [۱۳] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چنددوره‌ای - چندسطحی برای بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تأمین اتانول زیستی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بازار زیست‌توده و کربن پیشنهاد داده‌اند. مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که رویکردهای مختلفی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی به‌کار گرفته شده است. باوجوداین، هیچ‌یک از مطالعات به مدل‌های سری زمانی به‌عنوان نوع دیگری از تغییرپذیری در پارامترهای زنجیره تأمین نپرداخته‌اند. نیاز به استفاده از داده‌های سری زمانی در طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی، زمانی اهمیت پیدا می‌کند که به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین نیازمند مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای کلیدی هستند.

داده‌های سری زمانی، فرم دیگری از متغیرهای تعریف‌شده به‌شکل دنباله‌ای از داده‌های عددی در سفارش‌های مکرر هستند که معمولاً در فواصل یکنواخت رخ می‌دهند [۱۴]. مدل‌های خودرگرسیون میانگین متحرک (ARMA) <sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از مدل‌های سری زمانی، بینش‌های مدیریتی را درخصوص پویایی زنجیره تأمین فراهم کرده‌اند [۱۵]. گیلبرت [۱۵] یک مدل زنجیره تأمین چندسطحی بر پایه مدل‌های سری زمانی خودرگرسیون برداری میانگین متحرک تجمعی (ARIMA) <sup>۲</sup> پیشنهاد داده است. او ابتدا از کلاس عمومی مدل‌های سری زمانی خودرگرسیون برداری میانگین متحرک تجمعی برای مدل‌سازی تقاضای مشتری در زنجیره تأمین استفاده کرده و سپس مدل‌های خودرگرسیون برداری میانگین متحرک تجمعی را برای سری‌های زمانی سفارشات و موجودی پیشنهاد داده است. باتوجهبه اینکه تغییرات کوچک در سفارشات در سطوح پایین باعث ایجاد تغییرات بزرگ در سطوح بالا شده و نوسانات بزرگی در مجموعه زنجیره تأمین موسوم به اثر شلاقی ایجاد می‌کند، به‌وسیله این مدل، پدیده اثر شلاقی نیز مورد بحث قرار گرفته است. اثر شلاقی در زنجیره تأمین همچنین به‌وسیله لی و همکاران [۱۶] بررسی

1. Autoregressive Moving Average
2. Autoregressive Integrated Moving Average

می‌شود تا هزینه‌های کلی زنجیره تأمین سوخت زیستی را به‌وسیله تعیین سطوح بهینه متغیرهای تصمیم حداقل کند.

تابع هدف مدل، حداقل‌سازی هزینه‌های کل بوده و هزینه‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی شامل هزینه‌های ثابت و متغیر راه‌اندازی مراکز کشت و تسهیلات جمع‌آوری، پالایشگاه‌ها و مراکز توزیع، هزینه‌های تولید، هزینه‌های نگهداری موجودی و هزینه‌های حمل‌ونقل بین تسهیلات را حداقل می‌کند. عبارت (۱) تابع هدف مسئله را نمایش می‌دهد.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & \sum_{i=1}^L cfc_i ac_i + \sum_{j=1}^J cfc_{ol_j} y_j + \sum_{k=1}^K cfb_k u_k + \quad (1) \\ & \sum_{i=1}^L cfd_i v_i + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T cvcol_j capcol_j^t + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T cvb_j capb_k^t + \sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^T cvd_i capd_i^t + \\ & \sum_{i=1}^L cc_i ac_i + \sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^T chr_ahr_i^t + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T cfuel_k pfuel_k^t + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T chbio_j invbio_j^t + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T chfuel_k invfuel_k^t + \sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^T chfuel_i invfuel_i^t + \\ & \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T ctbio_{ijn} tbio_{ijn}^t d_{ijn} + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T ctbio_{jkn} tbio_{jkn}^t d_{jkn} + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T ctfuel_{kln} tfuel_{kln}^t d_{kln} + \\ & \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T ctfuel_{lmn} tfuel_{lmn}^t d_{lmn} \end{aligned}$$

رابطه ارضای تقاضا

رابطه (۲) برآورده شدن تقاضای سوخت زیستی هر مرکز تقاضا در هر دوره زمانی را تضمین می‌کند.

$$\sum_{i=1}^L \sum_{n=1}^N tfuel_{imn}^t \geq dm_m^t \quad \forall m, t \quad (2)$$

روابط جریان

رابطه (۳) تضمین می‌کند تمامی زیست‌توده برداشت‌شده در هر دوره به‌طور کامل به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شود.

$$r_i^t ahr_i^t = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N tbio_{ijn}^t \quad \forall i, t \quad (3)$$

رابطه (۴) تضمین می‌کند که مجموع مقدار زیست‌توده ارسال‌شده از مرکز جمع‌آوری  $j$  به پالایشگاه‌ها در هر دوره از مقدار زیست‌توده موجود در آن مرکز که در طول نگهداری با نرخ  $lw^t$  دچار کاهش وزن می‌شود، بیشتر نباشد.

در زنجیره تأمین مورد مطالعه تنها مکان مراکز کشت و مراکز تقاضا از پیش تعیین شده و مشخص است و مکان‌های سایر تسهیلات در لایه‌های دیگر زنجیره تأمین بایستی از بین مکان‌های کاندید انتخاب شوند.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، زیست‌توده در مراکز کشت، کاشت و برداشت می‌شود. زیست‌توده تولیدشده در مراکز کشت با روش‌های مختلف حمل‌ونقل به مراکز جمع‌آوری منتقل می‌شوند. سپس مقادیر مختلف زیست‌توده برای تولید سوخت زیستی به پالایشگاه‌ها منتقل می‌شوند. پس از تولید سوخت زیستی در پالایشگاه‌ها، این سوخت با روش‌های مختلف به مراکز توزیع منتقل می‌گردد و در نهایت برای عرضه به مصرف‌کننده‌هایی از مراکز توزیع به مراکز تقاضا ارسال می‌شود.

تصمیمات اصلی در مدل توسعه داده‌شده شامل تعیین مکان، ظرفیت هر یک از مراکز کشت و تسهیلات زنجیره تأمین است. ظرفیت تسهیلات به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود، بنابراین مقادیر دقیق ظرفیت تسهیلات به‌وسیله مدل تعیین می‌گردد. این نوع تعیین ظرفیت، نسبت به مدل‌هایی که ظرفیت تسهیلات را به‌صورت گسسته تعیین می‌کنند، از نظر محاسباتی برتر است [۱۸]. تصمیمات تاکتیکی در این مدل شامل تعیین مقدار تولید، سطوح موجودی، جریان مواد بین تسهیلات و روش مناسب برای حمل‌ونقل در دوره‌های مختلف است.

## ۱.۲. فرضیات مسئله

فرضیات مدل ارائه‌شده به‌صورت زیرند:

- برداشت زیست‌توده به‌صورت عدل‌های مربعی بزرگ در وزن ۳۹۷ کیلوگرم که حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آسان دارند، فرض شده است [۴ و ۱۹].
- مطالعات نشان می‌دهد که برداشت‌های متعدد در طول یک سال به دلیل تضعیف ریشه، مقدار کل زیست‌توده تولیدشده را کاهش می‌دهد. بنابراین یک برداشت (دوره‌های زمانی یک‌ساله)، بلافاصله پس از اولین فصل سرما در این مدل استفاده شده که در تحقیقات به‌عنوان سازگارترین روش برداشت با محیط زیست و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش شناخته شده است [۲۰].
- فرض بر این است که تقاضای سرانه سوخت زیستی در هر منطقه تقاضا، معلوم و قطعی است.

## ۳. مدل‌سازی ریاضی

در این بخش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، پیشنهاد

ارسال شده به مراکز تقاضا در دوره فعلی است.

$$invfuel'_l = invfuel'_l{}^{-1} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N tfuel'_{kln} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N tfuel'_{lmn} \quad (10)$$

$$\forall l, t$$

روابط ظرفیت

رابطه (۱۱) تضمین می‌کند که در هر مرکز کشت، مقدار زمین‌هایی که برای کشت زیست‌توده تخصیص داده می‌شود، از مقدار زمین‌های موجود بیشتر نخواهد بود. همچنین این مقدار از حداقل نرخ استفاده از زمین موجود کمتر نخواهد بود.

$$\omega_i x_i ua_i \leq ac_i \leq x_i ua_i \quad \forall i \quad (11)$$

رابطه (۱۲) تضمین می‌کند که میزان مساحت زمین برداشت شده از میزان زمین کشت شده بیشتر نخواهد بود.

$$ahr'_i \leq ac_i \quad \forall i, t \quad (12)$$

رابطه (۱۳) تضمین می‌کند که موجودی زیست‌توده در هر مرکز جمع‌آوری در هر دوره بین حد بالا و پایین استفاده از ظرفیت آن قرار خواهد داشت.

$$\beta_j capcol'_j y_j \leq invbio'_j \leq capcol'_j y_j \quad \forall j, t \quad (13)$$

رابطه (۱۴) تضمین می‌کند که تولید سوخت زیستی در هر پالایشگاه در هر دوره زمانی بین حد بالا و پایین ظرفیت آن قرار خواهد گرفت.

$$\lambda_k capb'_k u_k \leq pfuel'_k \leq capb'_k u_k \quad \forall k, t \quad (14)$$

رابطه (۱۵) تضمین می‌کند که میزان نگهداری سوخت زیستی در مرکز توزیع در هر دوره زمانی بین حد بالا و پایین ظرفیت آن قرار خواهد گرفت.

$$\phi_i capd'_i v_i \leq invfuel'_i \leq capd'_i v_i \quad \forall i, t \quad (15)$$

رابطه (۱۶) تضمین می‌کند که مجموع مقدار زیست‌توده ارسالی به هر مرکز جمع‌آوری در هر دوره از ظرفیت آن مرکز بیشتر نخواهد بود.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N tbio'_{ijn} \leq capcol'_j \quad \forall j, t \quad (16)$$

رابطه (۱۷) تضمین می‌کند که مجموع مقدار زیست‌توده ارسالی به هر پالایشگاه در هر دوره از ظرفیت آن پالایشگاه در آن دوره بیشتر نخواهد بود.

$$\gamma_k \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N tbio'_{jkn} \leq capb'_k \quad \forall t, k \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N tbio'_{jkn} \leq invbio'_j (1 - lw^t) \quad \forall j, t \quad (4)$$

رابطه (۵) تضمین می‌کند که مجموع مقدار سوخت زیستی ارسالی شده از پالایشگاه  $k$  به مراکز توزیع در هر دوره از مقدار سوخت زیستی تولیدشده در آن پالایشگاه در آن دوره بیشتر نخواهد بود.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N tfuel'_{kln} \leq pfuel'_k \quad \forall k, t \quad (5)$$

رابطه (۶) تضمین می‌کند که مجموع مقدار سوخت زیستی ارسالی شده از مرکز توزیع  $l$  به مراکز تقاضا در هر دوره از مقدار سوخت زیستی موجود در آن مرکز توزیع در آن دوره بیشتر نخواهد بود.

$$invfuel'_l \geq \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N tfuel'_{lmn} \quad \forall l, t \quad (6)$$

رابطه تولید

رابطه (۷) تضمین می‌کند که مقدار تولید سوخت زیستی در هر پالایشگاه در هر دوره برابر با حاصلضرب مجموع زیست‌توده دریافتی از مراکز جمع‌آوری در آن دوره و نرخ تولید سوخت در پالایشگاه  $\gamma_k$  است.

$$pfuel'_k = \gamma_k \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N tbio'_{jkn} \quad \forall k, t \quad (7)$$

روابط موجودی

رابطه (۸) تضمین می‌کند که مقدار زیست‌توده موجود در هر مرکز جمع‌آوری برابر مجموع موجودی دوره قبل و مقدار زیست‌توده جمع‌آوری شده در دوره فعلی منهای مقدار ارسالی شده به پالایشگاه‌هاست.

$$invbio'_j = invbio'_j{}^{-1} + \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N tbio'_{ijn} - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N tbio'_{jkn} \quad (8)$$

$$\forall j, t$$

رابطه (۹) تضمین می‌کند که مقدار موجودی سوخت زیستی در هر پالایشگاه در هر دوره برابر مجموع موجودی دوره قبل و مقدار تولید در دوره فعلی منهای مقدار ارسالی شده به مراکز توزیع در دوره فعلی است.

$$invfuel'_k = invfuel'_k{}^{-1} + pfuel'_k - \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N tfuel'_{kln} \quad \forall k, t \quad (9)$$

رابطه (۱۰) تضمین می‌کند که مقدار موجودی سوخت زیستی در هر مرکز توزیع برابر مجموع موجودی دوره قبل و مقدار سوخت زیستی دریافتی از پالایشگاه‌ها در دوره فعلی منهای مقدار سوخت زیستی

$$u_k lcapb'_k \leq capb'_k \leq u_k ucapb'_k \quad (25)$$

$$capd'_i = capd'^{t-1}_i + ecapd'_i \quad (26)$$

$$v_l lcapd'_l \leq capd'_l \leq v_l ucapd'_l \quad (27)$$

روابط ضروری و منطقی

روابط (۲۸) و (۲۹) نشان‌دهنده روابط ضروری و منطقی روی متغیرهای پیوسته و گسسته مسئله‌اند.

$$ac_i, ahr'_{ih}, pds'_{ij}, peth'_k, invsg'_{ih}, invdsg'_{ij}, \quad (28)$$

$$inveth'_k, inveth'_l, tlcs'_{ijn}, tbl'_{ikm}, tds'_{jkn},$$

$$teth'_{km}, teth'_{lmn} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, m, h, n, t$$

$$x_i, y_{jq}, u_{kp}, v_{lr} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l, m, q, p, r, h, n, t \quad (29)$$

### ۱.۳. مدل خودرگرسیون برداری میانگین متحرک

مدل خودرگرسیون میانگین متحرک مدلی است که غالباً برای سنجش داده‌های سری زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌توان برای پیش‌بینی مقادیر آتی این سری‌ها، از آن استفاده کرد. این مدل شامل دو بخش خودرگرسیون (AR) و میانگین متحرک (MA) است که به ترتیب به شکل درجات  $p$  و  $q$  در مدل نشان داده می‌شوند. معادله (۳۰) فرم کلی مدل  $ARMA(p,q)$  را نشان می‌دهد.

$$Z_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i Z_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (30)$$

در معادله (۳۰)،  $\varphi$  و  $\theta$  پارامترهای مدل،  $c$  عدد ثابت و  $\varepsilon$  خطای مدل در دوره  $t$  است. در صورتی که داده‌های سری زمانی پایا نباشند، به جای مدل  $ARMA(p,q)$  از مدل  $ARIMA(p,d,q)$  استفاده می‌شود که در آن  $d$  تعداد مراتب تفاضل‌گیری برای پایا شدن داده‌هاست. واضح است که اگر  $d$  برابر صفر باشد، مدل خودرگرسیون برداری میانگین متحرک تجمعی به خودرگرسیون برداری میانگین متحرک تبدیل خواهد شد. معمولاً برای تخمین مدل خودرگرسیون برداری میانگین متحرک تجمعی و خودرگرسیون برداری میانگین متحرک از روش باکس-جنکینز استفاده می‌شود که دارای مراحل زیر است:

شناسایی: در این مرحله، چندین مدل از گروه مدل‌های خودرگرسیون برداری میانگین متحرک تجمعی انتخاب می‌شود. این بدان معنی است که با در نظر گرفتن توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی، مقادیر نمونه برای  $p$  و  $q$  تعیین می‌شود.

برآورد: در این گام، مدل (یا مدل‌هایی) که برای اولین بار انتخاب شده‌اند، روی داده‌ها پردازش شده و پارامترهای آن‌ها تخمین زده می‌شود.

رابطه (۱۸) تضمین می‌کند که مقدار سوخت زیستی ارسالی به هر مرکز توزیع در هر دوره از ظرفیت آن در آن دوره بیشتر نخواهد بود.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N t fuel'_{kln} \leq capd'_i \quad \forall l, t \quad (18)$$

رابطه (۱۹) تضمین می‌کند که مقدار موجودی زیست‌توده در هر مرکز جمع‌آوری در هر دوره از ظرفیت آن مرکز در آن دوره بیشتر نخواهد بود.

$$invbio'_j \leq capcol'_j \quad \forall j, t \quad (19)$$

رابطه (۲۰) تضمین می‌کند که مقدار موجودی سوخت زیستی در هر پالایشگاه در هر دوره از ظرفیت آن پالایشگاه در آن دوره بیشتر نخواهد بود.

$$invfuel'_k \leq capb'_k \quad \forall k, t \quad (20)$$

رابطه (۲۱) تضمین می‌کند که در هر دوره زمانی، مجموع ظرفیت تولید همه پالایشگاه‌ها بزرگ‌تر مساوی مجموع تقاضای سوخت زیستی در مراکز تقاضاست.

$$\sum_{m=1}^M dm'_m \leq \sum_{k=1}^K capb'_k \quad \forall t \quad (21)$$

گفتنی است با در نظر گرفتن این فرض که برداشت زیست‌توده تنها بعد از دو سال از زمان کاشت آن امکان‌پذیر است و همچنین به دلیل نیاز به برداشت بدون وقفه زیست‌توده، در این مطالعه فرض شده است که مساحت نواحی کشت مستقل از زمان است. از طرف دیگر به دلیل افزایش تقاضای سوخت زیستی در بعضی از دوره‌های زمانی و نیاز به توسعه ظرفیت تسهیلات تولیدی، در این مطالعه ظرفیت تسهیلات وابسته به دوره‌های زمانی در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل ملاحظات اقتصاد به مقیاس، حد پایین ظرفیت و به دلیل ملاحظات زیست‌محیطی، حد بالای ظرفیت در نظر گرفته شده است. بدین منظور روابط (۲۲) و (۲۳) به ترتیب توسعه ظرفیت و همچنین حدود بالا و پایین ظرفیت مراکز جمع‌آوری را نشان می‌دهند. همان‌طور که رابطه (۲۲) نشان می‌دهد، ظرفیت در هر دوره برابر ظرفیت دوره قبل به علاوه میزان توسعه ظرفیت در دوره فعلی است. از رابطه (۲۳) نیز درمی‌یابید که این ظرفیت در هر دوره بین حدود بالا و پایین از پیش تعیین شده است. روابط (۲۴) تا (۲۷) به ترتیب بیانگر توسعه ظرفیت و حد بالا و پایین ظرفیت در پالایشگاه‌ها و مراکز توزیع هستند.

$$capcol'_j = capcol'^{t-1}_j + ecapcol'_j \quad (22)$$

$$y_j lcapcol'_j \leq capcol'_j \leq y_j ucapcol'_j \quad (23)$$

$$capb'_k = capb'^{t-1}_k + ecapb'_k \quad (24)$$

ارزیابی: در آخرین مرحله، میزان مطلوبیت مدلی که در دور اول انتخاب و در دور دوم برآورد شده است، ارزیابی می‌شود. این ارزیابی براساس معیارهایی که برای هدف مشابه در نظر گرفته شده، انجام می‌گیرد [۲۱].

باتوجه به اینکه اضافه شدن وقفه به مدل باعث افزایش ضریب تعیین ( $R^2$ ) شده و عملکرد مدل را بهبود می‌بخشد و از سوی دیگر وقفه بیش از اندازه درجه آزادی را کاهش داده و تخمین را غیرممکن می‌سازد، لازم است بین این دو تعادلی برقرار شود. لذا برای انتخاب وقفه بهینه، معیارهایی توسط محققان ارائه شده که در این تحقیق از معیار شوارتز-بیزین<sup>۱</sup> استفاده و مدلی انتخاب شده که معیار شوارتز-بیزین آن حداقل بوده است. همچنین فرض شده که تقاضای سوخت زیستی از الگوی  $ARMA(p,q)$  پیروی می‌کند. بنابراین با بهره‌گیری از مدل خودرگرسیون برداری میانگین متحرک، رابطه تقاضا برآورد شده و میزان تقاضا برای دوره‌های بعد، مورد پیش‌بینی قرار گرفته است. سپس براساس داده‌های پیش‌بینی شده و با استفاده از مدل ارائه‌شده برای زنجیره تأمین سوخت زیستی، مساحت ناحیه حاشیه‌ای مورد استفاده، مکان و حجم تولید بهینه پالایشگاه‌ها و جریان بهینه در زنجیره برای دوره‌های بعد، تعیین شده است.

#### ۴. مثال عددی

در این بخش، یک مثال عددی برای تجزیه و تحلیل مدل ارائه‌شده براساس تقاضای خودرگرسیون برداری میانگین متحرک، آورده شده است. ده منطقه عرضه برای کشت زیست‌توده در نظر گرفته شده و در هر منطقه یک مرکز جمع‌آوری زیست‌توده برداشت‌شده قرار دارد. همچنین هر منطقه، یک نقطه بالقوه برای تأسیس پالایشگاه است و مکان بهینه پالایشگاه‌ها توسط مدل تعیین می‌شود. فرض شده که پالایشگاه‌ها باید تقاضای سوخت زیستی را واقع در این ده ناحیه تأمین کنند.

#### ۱.۴ پارامترهای ورودی

برای این مثال عددی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۱. افق مدل‌سازی ۳۲ ساله بوده و هر سال به‌عنوان یک دوره زمانی فرض شده است ( $t=1, \dots, 32$ ).
۲. ده بخش به‌عنوان مکان‌های بالقوه برای کشت زیست‌توده ( $i=1, \dots, 10$ )، مراکز جمع‌آوری ( $j=1, \dots, 10$ )، نقاط بالقوه برای ساخت پالایشگاه ( $k=1, \dots, 10$ )، مکان‌های بالقوه برای ساخت مراکز توزیع ( $l=1, \dots, 10$ ) و مکان تقاضای سوخت زیستی ( $m=1, \dots, 10$ ) در نظر گرفته شده‌اند.

۳. برای تمام دوره‌ها هیچ اثر فصلی فرض نشده است.
۴. فرض شده که نسبت جمعیت در سال‌های مختلف در طول افق زمانی ثابت است و تقاضای هر منطقه، به نسبت جمعیت آن ناحیه است.
۵. تمامی هزینه‌ها در طول افق زمانی، ثابت در نظر گرفته شده است.

به دلیل تعداد زیاد پارامترهای ورودی مدل و محدودیت فضا از ارائه مقادیر پارامترهای ورودی در مقاله صرف نظر شده است.

#### ۲.۴ نتایج

ابتدا مدل خطی عدد صحیح مختلط پیشنهادشده با نرم‌افزار GAMS براساس داده‌های مثال عددی، اجرا شده است تا امکان پیاده‌سازی آن، برای نمونه‌های واقعی نمایان شود. خروجی نرم‌افزار برای این داده‌ها، به شکل زیر است:

هزینه کل زنجیره تأمین برابر  $52378/9$  میلیون دلار است. از میان ۱۰ مکان بالقوه برای ایجاد مراکز کشت و احداث هریک از تسهیلات، ۳ مکان بالقوه برای کشت زیست‌توده، ۳ مکان بالقوه برای احداث مراکز جمع‌آوری، ۴ مکان بالقوه برای احداث پالایشگاه، ۵ مکان بالقوه برای احداث مراکز توزیع انتخاب می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در دوره‌های ۲۵ و ۲۷ ظرفیت تمامی تسهیلات زنجیره تأمین توسعه می‌یابد. این افزایش ظرفیت به دلیل افزایش ناگهانی تقاضای سوخت زیستی در مراکز تقاضا در دوره‌های مذکور است.

افق مدل‌سازی در این مسئله ۳۲ سال فرض شده و داده‌های تقاضای طی ۳۲ سال، یک سری زمانی را تشکیل می‌دهند که می‌توان مقادیر آن‌ها را برای سال‌های بعد، از طریق مدل‌سازی خودرگرسیون برداری میانگین متحرک پیش‌بینی کرد. بنابراین برای تقاضا از طریق نرم‌افزار Eviews8، مدل‌سازی خودرگرسیون برداری میانگین متحرک انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که داده‌های در نظر گرفته‌شده برای تقاضا، از فرایند  $ARMA(2,1)$  پیروی می‌کنند و براساس معیار شوارتز-بیزین دو وقفه به‌عنوان وقفه بهینه برای این مدل انتخاب شد (معادله ۳۱).

$$Z_t = c + \varepsilon_t + \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} \quad (31)$$

روابط (۳۲) تا (۴۱)، معادلات خودرگرسیون برداری میانگین متحرک به ترتیب برای بخش‌های  $i=1$  تا  $i=10$  در مثال عددی است.

جدول (۱): نتایج داده‌های واقعی با داده‌های پیش‌بینی شده (بر حسب لیتر)

دوره	تقاضای واقعی	تقاضای پیش‌بینی شده
۱	۳۱۸۲۸۱۹	*
۲	۴۱۸۲۴۱۹	*
۳	۴۱۵۶۴۱۳	*
۴	۵۱۸۲۴۱۳	۹۵۱۹۴۴۴
۵	۴۰۷۲۹۶۵۱	۲۱۳۹۲۵۵۱
۶	۵۱۸۲۴۱۲۹	۲۷۷۳۱۹۲
۷	۵۱۸۲۴۱۲۹	۳۶۲۲۶۴۰۴
۸	۴۱۴۵۹۳۰۳	۴۷۷۴۹۲۹۶
۹	۴۱۴۵۹۳۰۳	۴۳۸۹۰۲۲۴
۱۰	۳۱۰۹۴۴۷۷	۴۰۷۴۷۱۲۸
۱۱	۴۱۴۵۹۳۰۳	۴۰۶۲۱۵۱۷
۱۲	۵۱۸۲۴۱۲۹	۴۴۲۱۳۱۰۵
۱۳	۵۱۸۲۴۱۲۹	۴۷۸۲۷۶۲۶
۱۴	۶۲۱۸۸۹۵۴	۵۲۳۶۲۳۵۱
۱۵	۶۲۱۸۸۹۵۴	۵۳۴۸۱۲۲۲
۱۶	۴۱۴۵۹۳۰۳	۵۷۱۰۹۰۸۰
۱۷	۴۱۴۵۹۳۰۳	۵۲۰۶۰۶۵۰
۱۸	۴۱۴۵۹۳۰۳	۴۵۸۰۶۲۱۸
۱۹	۴۱۴۵۹۳۰۳	۵۱۱۳۹۸۶۵
۲۰	۵۱۸۲۴۱۲۹	۵۳۵۹۸۵۸۱
۲۱	۶۲۱۸۸۹۵۴	۶۷۳۴۰۹۷۲
۲۲	۸۲۹۱۸۶۰۶	۸۰۴۶۹۹۲۰
۲۳	۹۳۲۸۳۴۳۲	۱۰۰۶۳۰۱۴۴
۲۴	۸۲۹۱۸۶۰۶	۱۱۸۱۰۶۶۰۹
۲۵	۱۸۶۵۶۶۸۶۳	۱۴۵۰۱۲۰۶۶
۲۶	۱۸۶۵۶۶۸۶۳	۲۰۵۳۴۷۵۳۹
۲۷	۲۲۸۰۲۶۱۶۶	۲۲۴۷۸۹۱۵۹
۲۸	۲۶۹۴۸۵۴۶۹	۲۵۱۵۸۴۷۳۷
۲۹	۲۹۰۲۱۵۱۲۱	۲۷۵۷۶۲۸۹۷
۳۰	۳۰۰۵۷۹۹۴۷	۳۰۳۰۶۹۸۷۱
۳۱	۳۱۰۹۴۴۷۷۲	۳۱۵۰۶۸۶۳۲
۳۲	۳۲۱۳۰۹۵۹۸	۳۲۶۰۱۳۶۹۴

$$Z_t = 105000000 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (32)$$

$$Z_t = 83793584 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (33)$$

$$Z_t = 123000000 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (34)$$

$$Z_t = 504000000 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (35)$$

$$Z_t = 67538276 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (36)$$

$$Z_t = 30091535 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (37)$$

$$Z_t = 159000000 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (38)$$

$$Z_t = 86295559 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (39)$$

$$Z_t = 16926017 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (40)$$

$$Z_t = 48449406 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \quad (41)$$

از طریق فرایند خودرگرسیون برداری میانگین متحرک، مقادیر تقاضا برای ۸ دوره بعد از افق زمانی، پیش‌بینی شده و مدل خطی عدد صحیح مختلط ارائه شده، مجدد برای این داده‌ها اجرا شده است. خروجی نرم‌افزار نشان‌دهنده نتایج پیش‌بینی شده مکان بهینه مناطق کشت زیست توده، مراکز جمع‌آوری زیست توده، پالایشگاه‌ها و مراکز توزیع و همچنین مقادیر تولید بهینه در هریک از مراکز و جریان بهینه بین سطوح مختلف زنجیره در ۸ دوره بعد خواهد بود. خروجی به دست آمده از مدل از طریق نرم‌افزار GAMS به صورت زیر است:

هزینه بهینه پیش‌بینی شده برای زنجیره تأمین برابر ۱۳۱۹۵/۷ میلیون دلار بوده و از میان ۱۰ مکان بالقوه برای ایجاد مراکز کشت و احداث هریک از تسهیلات، ۴ مکان بالقوه برای کشت زیست توده، ۴ مکان بالقوه برای احداث مراکز جمع‌آوری، ۶ مکان بالقوه برای احداث پالایشگاه، ۵ مکان بالقوه برای احداث مراکز توزیع انتخاب می‌شود.

## ۵. اعتبارسنجی

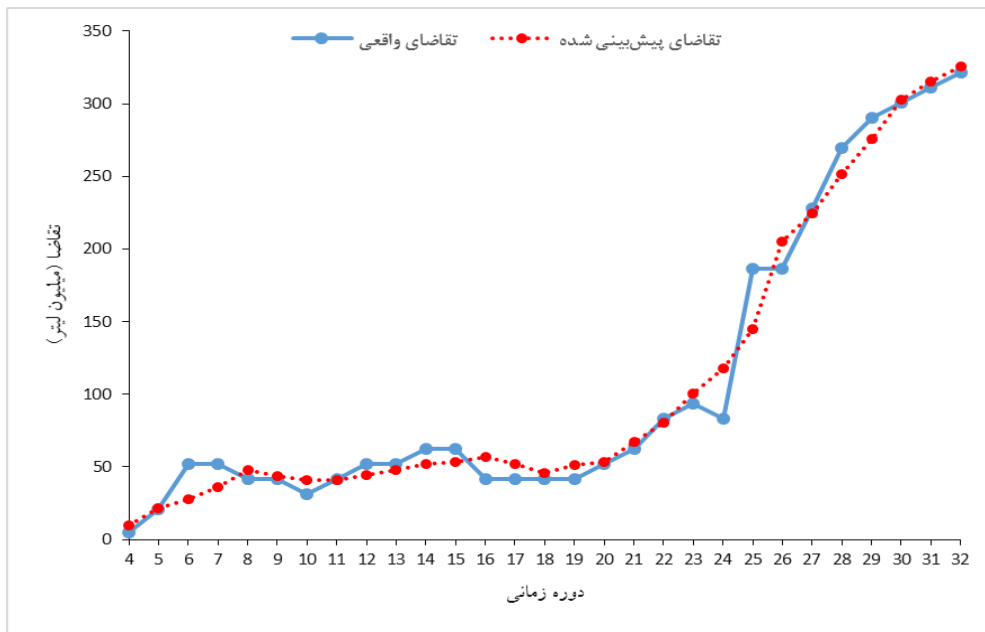
مقایسه نتایج داده‌های واقعی با داده‌های پیش‌بینی شده از طریق مدل خودرگرسیون برداری میانگین متحرک پیشنهادی در شکل (۲)، اعتبار مدل را به طور کمی نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، داده‌های در نظر گرفته شده برای تقاضا در این مقاله، از فرایند  $ARMA(2,1)$  پیروی می‌کنند. از طرفی به دلیل وجود  $AR(2)$  دو وقفه در مدل ایجاد می‌شود و به ازای هر وقفه در مدل، یک درجه آزادی کاسته می‌شود. بنابراین با از دست دادن دو درجه آزادی، برای پیش‌بینی مقادیر تقاضای هر دوره نیازمند داده‌های دو دوره قبل از آن خواهیم بود. از طرفی با توجه به  $MA(1)$  برای پیش‌بینی دینامیک هر دوره، نیازمند

مدل ارائه شده در این مقاله در زنجیره تأمین سوخت زیستی برای یک مثال عددی به کار گرفته شده و سپس با استفاده از تست باز تولید رفتار [۲۲] اعتبارسنجی در دو مرحله صورت گرفته است. در ابتدا پارامترهای موجود در مدل خودرگرسیون برداری میانگین متحرک با استفاده از داده‌های تمام دوره‌ها برآورد شده است. در مرحله دوم روند تغییر مقدار تقاضای بخش اول از دوره زمانی  $t=4$  تا  $t=32$  در دو مقدار واقعی و پیش‌بینی شده با فرایند خودرگرسیون برداری میانگین متحرک مورد مقایسه قرار گرفته‌اند (جدول ۱).



پیش‌بینی مقادیر تقاضای دوره‌های ۴ به بعد خواهیم بود و مقایسات بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی تنها برای دوره‌های ۴ به بعد انجام می‌شود.

مقدار شوک مقدار پیش‌بینی شده دوره قبل هستیم. باتوجه به مطالب ذکر شده، به دلیل عدم امکان پیش‌بینی مقادیر تقاضای دوره‌های اول و دوم و در نتیجه عدم امکان پیش‌بینی مقدار شوک دوره دوم، تنها قادر به



شکل (۲): روند تغییرات تقاضا در دو حالت واقعی و پیش‌بینی شده

زنجیره تأمین و حداقل کردن هزینه کلی آن به دست دهد. برای تحقیقات بعدی، می‌توان ملاحظات زیست‌محیطی را در طراحی زنجیره تأمین سوخت زیستی در نظر گرفته و براساس مدل خودرگسیون برداری میانگین متحرک، یک شبکه بهینه طراحی کرد.

### فهرست علائم

#### اندیس‌ها

$i$	اندیس مکان‌های نامزد برای مراکز کشت زیست‌توده $i = (1, 2, \dots, I)$
$j$	اندیس مکان‌های نامزد برای مراکز جمع‌آوری $j = (1, 2, \dots, J)$
$k$	اندیس مکان‌های نامزد برای پالایشگاه‌ها $k = (1, 2, \dots, K)$
$m$	اندیس مراکز تقاضای سوخت زیستی $m = (1, 2, \dots, M)$
$n$	اندیش شیوه حمل‌ونقل
$t$	اندیس دوره زمانی

### ۶. نتیجه‌گیری

برای تجاری‌سازی تولید سوخت زیستی، نیاز به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین کارآمد است. پیچیدگی‌های فراوان در زنجیره تأمین سوخت زیستی و وجود متغیرهای غیر قطعی در آن، منجر شده است تا نیاز به پیش‌بینی در نحوه عملکرد زنجیره در آینده و ارائه سیاست‌های مناسب به منظور افزایش سهم بازار سوخت زیستی، اهمیت ویژه‌ای پیدا کند.

این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی ارائه کرده تا هزینه کلی زنجیره تأمین را در طول افق زمانی در نظر گرفته شده، به حداقل برساند. در این زنجیره، تقاضای سوخت به شکل سری زمانی بوده و از فرایند خودرگسیون برداری میانگین متحرک پیروی می‌کند. در این مقاله برای اولین بار، تأثیر ساختار سری‌های زمانی خودرگسیون برداری میانگین متحرک برای تقاضای سوخت زیستی بر طراحی زنجیره تأمین بررسی شده است. در این راستا از یک مثال عددی استفاده شده تا یک شبکه زنجیره تأمین بهینه را طراحی کند. همچنین به وسیله مدل‌های پیش‌بینی خودرگسیون برداری میانگین متحرک برای تقاضای سوخت زیستی، یک طراحی بهینه زنجیره تأمین برای هشت دوره زمانی آینده فراهم شده تا بینشی وسیع‌تر برای طراحی مؤثرتر

پارامترهای فنی

پالایشگاه در مکان $k$			
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز توزیع $l$	$cf_d_l$	حداکثر زمین موجود در مکان $i$	$ua_i$
هزینه متغیر راه‌اندازی هریک واحد ظرفیت مرکز توزیع	$cvd_l$	حداقل نرخ به‌کارگیری مرکز کشت $i$	$\omega_i$
هزینه واحد کشت زیست‌توده در مکان $i$	$cc_i$	نرخ برداشت زیست‌توده از زمین‌های واقع در مکان $i$ در دوره زمانی $t$	$r_i^t$
هزینه واحد برداشت زیست‌توده	$chr$	نرخ تجمعی کاهش وزن زیست‌توده برداشت‌شده ذخیره‌شده در انبار مراکز جمع‌آوری در طول دوره زمانی $t$	$lw^t$
هزینه واحد جمع‌آوری زیست‌توده در مرکز جمع‌آوری در مکان $j$	$ccol_j$	حداقل نرخ به‌کارگیری ظرفیت مرکز جمع‌آوری $j$	$\beta_j$
هزینه واحد تولید سوخت زیستی در پالایشگاه در مکان $k$	$cfuel_k$	حد پایین ظرفیت مرکز جمع‌آوری $j$ در دوره زمانی $t$	$lcappr_j^t$
هزینه واحد نگهداری زیست‌توده در مرکز جمع‌آوری $j$	$chcol_j$	حد بالای ظرفیت مرکز جمع‌آوری $j$ در دوره زمانی $t$	$ucappr_j^t$
هزینه واحد نگهداری سوخت زیستی در پالایشگاه در مکان $k$	$chfuel_k$	حداقل نرخ به‌کارگیری ظرفیت پالایشگاه $k$	$\lambda_k$
هزینه حمل‌ونقل زیست‌توده از مرکز کشت $i$ به مرکز جمع‌آوری $j$ با روش حمل‌ونقل $n$	$ctbio_{ijn}$	حد پایین ظرفیت تولید سوخت زیستی در پالایشگاه $k$ در دوره زمانی $t$	$lcapb_k^t$
هزینه حمل‌ونقل زیست‌توده از مرکز جمع‌آوری $j$ به پالایشگاه $k$ با روش حمل‌ونقل $n$	$ctbio_{jkn}$	حد بالای ظرفیت تولید سوخت زیستی در پالایشگاه $k$ در دوره زمانی $t$	$ucapb_k^t$
هزینه حمل‌ونقل سوخت زیستی از پالایشگاه $k$ به مرکز توزیع $l$ با روش حمل‌ونقل $n$	$ctfuel_{kln}$	نرخ تولید سوخت زیستی از زیست‌توده در پالایشگاه $k$	$\gamma_k$
هزینه حمل‌ونقل سوخت زیستی از مرکز توزیع $l$ به مرکز تقاضای $m$ با روش حمل‌ونقل $n$	$ctfuel_{lmn}$	حد پایین ظرفیت مرکز توزیع $l$ در دوره زمانی $t$	$lcapd_l^t$
		حد بالای ظرفیت مرکز توزیع $l$ در دوره زمانی $t$	$ucapd_l^t$
		میزان تقاضای مرکز تقاضای $m$ برای سوخت زیستی در دوره زمانی $t$	$dm_m^t$

متغیرهای تصمیم صفر و یک

۱، اگر مکان $i$ برای کشت زیست‌توده انتخاب شود، در غیر این صورت ۰	$x_i$	فاصله بین مرکز کشت $i$ و مراکز جمع‌آوری $j$	$d_{ij}$
۱، اگر مکان $j$ برای راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری زیست‌توده انتخاب شود، در غیر این صورت ۰	$y_j$	فاصله بین مرکز جمع‌آوری $j$ و پالایشگاه $k$	$d_{jk}$
۱، اگر مکان $k$ برای راه‌اندازی پالایشگاه انتخاب شود، در غیر این صورت ۰	$u_k$	فاصله بین پالایشگاه $k$ و مرکز توزیع $l$	$d_{kl}$
۱، اگر مکان $l$ برای راه‌اندازی مرکز توزیع انتخاب شود، در غیر این صورت ۰	$v_l$	فاصله بین مرکز توزیع $l$ و مرکز تقاضای $m$	$d_{lm}$

پارامترهای هزینه

هزینه ثابت ایجاد هر هکتار مرکز کشت در مکان $i$ (هزینه اجاره سالانه زمین)	$cf_c_i$
هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری در مکان $j$	$cfcol_j$
هزینه متغیر راه‌اندازی هریک واحد ظرفیت مرکز جمع‌آوری در مکان $j$	$cvcoll_j$
هزینه ثابت راه‌اندازی پالایشگاه در مکان $k$	$cfb_k$
هزینه متغیر راه‌اندازی هریک واحد ظرفیت	$cvb_k$
میزان مساحتی از مرکز کشت $i$ که مورد کشت قرار می‌گیرد.	$ac_i$
میزان مساحتی از مرکز کشت $i$ که برداشت می‌شود.	$ahr_i^t$
مقدار تولید سوخت زیستی در پالایشگاه $k$ در دوره زمانی $t$	$pfuel_k^t$

<p><math>tbio_{ijn}^t</math> مقدار زیست توده که با روش حمل و نقل <math>n</math> از مرکز کشت <math>i</math> به مرکز جمع آوری <math>j</math> در دوره زمانی <math>t</math> ارسال می شود.</p> <p><math>tbio_{jkn}^t</math> مقدار زیست توده که با روش حمل و نقل <math>n</math> از مرکز جمع آوری <math>j</math> به پالایشگاه <math>k</math> در دوره زمانی <math>t</math> ارسال می شود.</p> <p><math>tfuel_{kin}^t</math> مقدار سوخت زیستی که با روش حمل و نقل <math>n</math> از پالایشگاه <math>k</math> به مرکز توزیع <math>l</math> در دوره زمانی <math>t</math> ارسال می شود.</p> <p><math>tfuel_{lmn}^t</math> مقدار سوخت زیستی که با روش حمل و نقل <math>n</math> از مرکز توزیع <math>l</math> به مرکز تقاضای <math>m</math> در دوره زمانی <math>t</math> ارسال می شود.</p>	<p><math>invbio_j^t</math> سطح موجودی زیست توده در مرکز جمع آوری <math>j</math> در دوره زمانی <math>t</math></p> <p><math>invfuel_k^t</math> سطح موجودی سوخت زیستی در پالایشگاه <math>k</math> در دوره زمانی <math>t</math></p> <p><math>capcol_j^t</math> ظرفیت جمع آوری زیست توده در مرکز جمع آوری <math>j</math> در دوره زمانی <math>t</math></p> <p><math>ecapcol_j^t</math> میزان توسعه ظرفیت جمع آوری زیست توده در مرکز جمع آوری <math>j</math> در دوره زمانی <math>t</math></p> <p><math>capb_k^t</math> ظرفیت تولید سوخت زیستی در پالایشگاه <math>k</math> در دوره زمانی <math>t</math></p> <p><math>ecapb_k^t</math> میزان توسعه ظرفیت تولید سوخت زیستی در پالایشگاه <math>k</math> در دوره زمانی <math>t</math></p>
--	---

## مراجع

- [1] Shafiee, S., Topal, E., "When will Fossil Fuel Reserves be Diminished?", Energy Policy, Vol. 37, No. 1, pp. 181-189, 2009.
- [2] Ghaderi, H., Pishvae, M. S., Moini, A., "Biomass Supply Chain Network Design: An Optimization-Oriented Review and Analysis", Industrial Crops and Products, Vol. 94, pp. 972-1000, 2016.
- [3] Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., Tatsiopoulos, I. P., "Logistics Issues of Biomass: the Storage Problem and the Multi-Biomass Supply Chain", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 4, pp. 887-894, 2009.
- [4] Sokhansanj, S., Mani, S., Turhollow, A., Kumar, A., Bransby, D., Lynd, L., Laser, M., "Large-Scale Production, Harvest and Logistics of Switchgrass (*Panicum Virgatum L.*)—Current Technology and Envisioning a Mature Technology", Biofuels, Bioproducts and Biorefining, Vol. 3, No. 2, pp. 124-141, 2009.
- [5] Vlachos, D., Iakovou, E., Karagiannidis, A., Toka, A., "A Strategic Supply Chain Management Model for Waste Biomass Networks", in 3rd International Conference on Manufacturing Engineering, pp. 797-804, 2008.
- [6] Bowling, I. M., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M., "Facility Location and Supply Chain Optimization for a Biorefinery", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 50, No. 10, pp. 6276-6286, 2011.
- [7] De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmäki, J., Van Orshoven, J., "Methods to Optimise the Design and Management of Biomass-for-Bioenergy Supply Chains: a Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 31, pp. 657-670, 2014.
- [8] Mol, R., Jogems, M., Van Beek, P., Gigler, J., "Simulation and Optimization of the Logistics of Biomass Fuel Collection", NJAS Wageningen Journal of Life Sciences, Vol. 45, No. 1, pp. 217-228, 1997.
- [9] Chen, C. W., Fan, Y., "Bioethanol Supply Chain System Planning Under Supply and Demand Uncertainties", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 48, No. 1, pp. 150-164, 2012.
- [10] Akgul, O., Zamboni, A., Bezzo, F., Shah, N., Papageorgiou, L. G., "Optimization-Based Approaches for Bioethanol Supply Chains", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 50, No. 9, pp. 4927-4938, 2010.
- [11] Awudu, I., Zhang, J., "Uncertainties and Sustainability Concepts in Biofuel Supply Chain Management: A Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 2, pp. 1359-1368, 2012.
- [12] Dal-Mas, M., Giarola, S., Zamboni, A., Bezzo, F., "Strategic Design and Investment Capacity Planning of the Ethanol Supply Chain Under Price Uncertainty", Biomass and Bioenergy, Vol. 35, No. 5, pp. 2059-2071, 2011.
- [13] Giarola, S., Shah, N., Bezzo, F., "A Comprehensive Approach to the Design of Ethanol Supply Chains Including Carbon Trading Effects", Bioresource technology, Vol. 107, pp. 175-185, 2012.
- [14] Brockwell, P. J., Davis, R. A., "Time Series: Theory and Methods", Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] Gilbert, K., "An ARIMA Supply Chain Model", Management Science, Vol. 51, No. 2, pp. 305-310, 2005.
- [16] Lee, H. L., Padmanabhan, V., Whang, S., "Information Distortion in a Supply Chain: the Bullwhip Effect", Management Science, Vol. 50, No. 12, pp. 1875-1886, 2004.
- [17] Chan, F. T., Samvedi, A., Chung, S. H., "Fuzzy Time Series Forecasting for Supply Chain Disruptions", Industrial Management & Data Systems, Vol. 115, No.3, pp. 419-435, 2015.
- [18] Pishvae, M. S., Farahani, R. Z., Dullaert, W., "A Memetic Algorithm for Bi-Objective Integrated Forward/Reverse Logistics Network Design", Computers & Operations Research, Vol. 37, No. 6, pp. 1100-1112, 2010.
- [19] Duffy, M., Nanhou, V. Y., "Costs of Producing Switchgrass for Biomass in Southern Iowa", Iowa State University, University Extension, 2001.
- [20] Zhang, J., Osmani, A., Awudu, I., Gonela, V., "An

*Integrated Optimization Model for Switchgrass-Based Bioethanol Supply Chain*", Applied Energy, Vol. 102, pp. 1205-1217, 2013.

[21] Kohansal, M. R., Rezazadeh, N. M., "Considering Fluctuations of Stability Level of Underground Water to Improve Water Usage Model in Agriculture Department,

*Case Study: FARS Province, ZARRIN DASHT Town*", International Journal of Agronomy and Plant Production, Vol. 4, No. 4, pp. 727-733, 2013.

[22] Sushil, "System Dynamics: a Practical Approach for Managerial Problems", Wiley Eastern Limited, 1993.