فصلنامه علمی - ترویجی «نشریه انرژی ایران»
دوره ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۴۲-۱۲۳

طراحی بهینه زنجیره تأمین سوخت زیستی

[۱]مونا اسدی، [۲]حمید قادری، [۳]سعید شوال‌پور*

تاریخ دریافت:
۱۳۹۴/۵/۲۴

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۶/۱۱/۱۷

کلمات کلیدی:
آرما،
بایومس،
زنجیره تأمین،
سوخت زیستی،
مدل‌سازی ریاضی

چکیده

سوخت‌های زیستی به عنوان یک جایگزین 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 در آن تقاضای سوخت زیستی از مدل‌های سری زمانی آرما پیروی می‌کند. همچنین مطالعه می‌شود که چگونه ساختار سری‌های زمانی آرما برای تقاضای سوخت زیستی، طراحی زنجیره تأمین را تحت تاثیر 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 هشت ساله پیش‌بینی صورت گرفته تا بینشی وسیعتر برای یک مدیریت کارآمد فراهم کرده و هزینه‌های کلی زنجیره را حداقل کند.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران monaasadi86@gmail.com
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران hamid.ghaderi777@gmail.com
۳. استادیارگروه مهندسی پیشرفت اقتصادی، دانشکده مهندسی پیشرفت، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (نویسنده مسئول) shavvalpoor@mail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

۱. مقدمه

مصرف انرژی در جهان و به طور خاص در کشورهای صنعتی به سبب تغییر در سبک زندگی و رشد جمعیت، افزایش یافته است. علاوه بر این که مصرف سوخت‌های فسیلی با مشکلات مختلف اجتماعی و زیست محیطی همراه است؛ تجدیدناپذیر بودن این سوخت‌ها [۱۶]، نگرانی‌های مربوط به مصرف انرژی را افزایش داده است. در سال‌های اخیر، تولید سوخت‌های زیستی به عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده برای این مشکل مطرح شده و توجه بسیاری از محققین را به منظور توسعه زنجیره تأمین این سوخت‌ها به خود جلب کرده است. بایومس به عنوان 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.

انواع بایومس و سوخت‌های زیستی به سه نسل تقسیم می‌شوند. اولین نسل سوخت‌های زیستی از شکر و روغن‌های گیاهی به دست می‌آیند که از طریق تکنولوژی‌های متداول به سوخت زیستی تبدیل شده‌اند. بسیاری از مواد اولیه نسل اول را می‌توان به عنوان 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 [۱۵]. مواد اولیه بایومس برای تولید نسل دوم سوخت‌های زیستی شامل بایومس لیگنوسلولوزیک، پسماندهای کشاورزی، زباله‌ها و محصولات چوبی می‌شود. اخیرا جلبک‌ها مواد اولیه غیر خوراکی‌ای هستند که به عنوان نسل سوم بایومس برای تولید سوخت زیستی معرفی شده‌اند. امروزه، تصمیم‌گیری برای استفاده زمین به منظور کشت مواد غذایی یا نسل اول مواد اولیه مورد بحث است. بنابراین هم اکنون محققان در حال مطالعه بر روی مواد اولیه بایومس لیگنوسلولوزیک برای حل این مشکلات هستند [۱۷].

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

شکل۱. ساختار زنجیره تأمین سوخت زیستی

تعدادی از گزینه‌های تصمیم‌گیری و فعالیت‌های پی‌درپی از قبیل انتخاب زمین، کاشت و کوددهی، برداشت، حمل و نقل و تولید سوخت زیستی در این زنجیره وجود دارد و این تصمیمات از طریق زنجیره تأمین مطرح و بررسی می‌شوند. گندم‌زار دارای بازده بالایی برای تولید بایومس است؛ با این وجود هزینه‌ی اجاره‌ی بالایی دارد. از طرفی زمان و روش کاشت به یکدیگر وابسته هستند. بنابراین نیاز است تا سناریوهای مختلف با هم در نظر گرفته شوند. برای فرآیند تصمیم‌گیری بهینه و بررسی تولید سوخت زیستی، نیاز است تا مدل‌های بهینه‌سازی یا سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری فشرده توسعه یابند.

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) یکی از شناخته شده‌ترین رویکردهای مدل‌سازی در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین بایومس است. مکان‌یابی تسهیلات یکی از اهداف مهم برای استفاده کردن از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط محسوب می‌شود. متغیرهای تصمیم مکان‌یابی تسهیلات می‌توانند به هر دو صورت تکنولوژی و ظرفیت استفاده شده در یک تسهیل، به شکل باینری در نظر گرفته شوند. به دلیل آن که طراحی شبکه زنجیره تأمین بایومس، لجستیک بایومس را تحت تاثیر قرار می‌دهد؛ تصمیم‌گیران زنجیره، طراحی شبکه زنجیره تأمین بایومس و جریان مواد بین تسهیلات را به طور هم زمان بهینه می‌کنند [۱۹]. در این راستا، آن‌ها مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را توسعه داده‌اند و به طور هم زمان طراحی شبکه زنجیره تأمین بایومس را بهینه کرده و جریان مواد بهینه بین تسهیلات را پیدا کرده‌اند [۸، ۳]. برای اولین بار مول و همکاران وی [۱۴]، یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط توسعه داده‌اند که در آن، مکان سایت‌های پردازش به وسیله حداقل کردن هزینه‌های لجستیک بایومس بهینه شده است. برنامه‌ریزی استراتژیک زنجیره تأمین

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

بایومس و تخصیص بهینه بایومس تحت تصمیمات مکان‌یابی غیرقطعی [۶] و طراحی و تولید بهینه زنجیره تأمین اتانول زیستی همراه با تعیین برداشت [۱]، چند نمونه از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در طراحی شبکه زنجیره تأمین بایومس هستند.

مانع اصلی برای تجاری سازی سوخت زیستی، فرآیندهای تولید پیچیده‌ی آن است. این پیچیدگی به دلیل اشکال مختلفی از پارامترهای متنوع ساخته شده است. عدم‌قطعیت، یکی از شکل‌های رایج تنوع در پارامترهای زنجیره تأمین سوخت‌های زیستی است. تأمین ماده‌ی اولیه بایومس، تولید سوخت زیستی و تقاضا، قیمت و لجستیک، پارامترهای متداولی هستند که همراه با عدم‌قطعیت می‌باشند [۲]. با بررسی مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، می‌توانیم مطالعات بسیاری را مشاهده کنیم که مرتبط با مدل‌های بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تأمین بایومس تحت عدم قطعیت هستند. برای مثال، دال–مس و همکاران وی [۷]، 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 وی [۱۰]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای–چند سطحی برای بهینه‌سازی طراحی شبکه زنجیره تأمین اتانول زیستی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بازار بایومس و کربن، پیشنهاد داده‌اند.

داده‌های سری زمانی، فرم دیگری از متغیرهای تعریف شده به شکل دنباله‌ای از داده‌های عددی در سفارش‌های مکرر هستند که معمولا در فواصل یکنواخت رخ می‌دهند [۴]. مدل‌های خود رگرسیو میانگین متحرک (آرما[1]) به عنوان یکی از مدل‌های سری زمانی، بینش‌های مدیریتی را در مورد پویایی زنجیره تأمین فراهم کرده‌اند [۱۱]. گیلبرت [۱۱] یک مدل زنجیره تأمین چند سطحی بر پایه مدل‌های سری زمانی آریما[2] پیشنهاد داده است. او ابتدا از کلاس عمومی مدل‌های سری زمانی آریما برای مدل‌سازی تقاضای مشتری در زنجیره تأمین استفاده کرده و سپس مدل‌های آریما را برای سری‌های زمانی سفارشات و موجودی پیشنهاد

1. ARMA
2. ARIMA

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

داده است. به وسیله این مدل، پدیده‌ی اثر شلاقی نیز مورد بحث قرار گرفته است. اثر شلاقی در زنجیره تأمین همچنین به وسیله لی و همکاران وی [۱۳] بررسی شده است.

عملکرد زنجیره تأمین متاثر از دقت پیش‌بینی است. سیستم‌های پیش‌بینی دقیق در یک زنجیره از ارزش بالایی برخوردارند. جهانی شدن، منجر به پیچیدگی و اختلال در زنجیره تأمین خواهد شد. چان و همکاران وی [۵] تاثیر سیستم‌های پیش‌بینی سری‌های زمانی فازی را در یک زنجیره تأمین با اختلال، بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین نشان داده‌اند که برای تطبیق با مدل‌های آرما، یک راه مناسب، استفاده از سری‌های زمانی فازی با مراتب بالاتر است.

بقیه مقاله به این شرح است؛ در بخش بعدی تعریف مسئله بیان شده است. در بخش مدل‌سازی ریاضی، مدل‌سازی رویکرد پیشنهاد شده به صورت گام به گام بیان شده و سپس مدل آرما توصیف شده است. در ادامه مقاله و در بخش بعدی مدل پیشنهاد شده روی یک مثال عددی اجرا شده است. در انتها نیز اعتبارسنجی صورت گرفته و نتیجه‌گیری و پیشنهادات آورده شده است.

۲. تعریف مسئله

فهرستی از شاخص‌ها، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم در جدول ۱ آورده شده است. این تحقیق، زنجیره تأمین سوخت زیستی را در ۴ سطح، در نظر گرفته است. بایومس می‌تواند در زمین‌های حاشیه‌ای موجود که برای مقاصد دیگر کشاورزی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، در مناطق عرضه i کشت شود. در این تحقیق فرض شده که شیوه‌ی برداشت به صورت عدل‌های مربعی است. پس از برداشت، محصول بایومس به انبارهای ذخیره‌سازی واقع در مناطق j منتقل می‌شود. ذخیره‌سازی بایومس در انبار، موجب تخریب بخشی از آن می‌شود. پس از ذخیره‌سازی، محصول بایومس توسط کامیون از j انبار به r پالایشگاه جهت تبدیل به سوخت زیستی منتقل شده و سپس، سوخت تولید شده به k منطقه تقاضا ارسال می‌شود. هدف از مدل ریاضیاتی ارائه شده، حداقل کردن هزینه کلی زنجیره تأمین سوخت زیستی به وسیله تعیین سطوح بهینه متغیرهای تصمیم است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

جدول ۱. نمادها

شاخص‌ها/مجموعه‌ها	
i	نواحی عرضه بایومس $(i=1,...,I)$
J	مکان انبارهای ذخیره‌سازی بایومس $(j=1,...,\mathrm{J})$
r	مکان پالایشگاه $(r=1,...,R)$
k	نواحی تقاضای سوخت زیستی $(k=1,...,K)$
q	سطوح ظرفیت انبارها $(q=1,...,Q)$
q'	سطوح ظرفیت پالایشگاه‌ها $(q'=1,...,Q')$
t	دوره‌های زمانی در افق مدل‌سازی $(t=1,...,T)$
متغیر تصمیم باینری	
$X_{rq'}$	{۱، اگر پالایشگاه با سطح ظرفیت q' در مکان r تاسیس شود؛ ۰ در غیر اینصورت}
متغیرهای تصمیم پیوسته	
Y_i^t	ناحیه حاشیه‌ای مورد استفاده در منطقه عرضه i در دوره زمانی t (ha)
S_{ij}^t	مقدار بایومس ارسال شده از منطقه عرضه i به انبار j در طول دوره زمانی t (tonne)
V_{jr}^t	مقدار بایومس ارسال شده از انبار j به پالایشگاه r در طول دوره زمانی t (tonne)
N_{rk}^t	حجم سوخت زیستی ارسال شده از پالایشگاه r به ناحیه تقاضای k در طول دوره زمانی t (l)
N_r^t	حجم سوخت زیستی تولید شده بوسیله پالایشگاه r در طول دوره زمانی t (l)
پارامترها	
C_i^t	هزینه اجاره‌ی سالانه زمین حاشیه‌ای در منطقه عرضه i در دوره زمانی t ($/ha)
Cu_i^t	هزینه‌ی کشت بایومس در منطقه عرضه i در دوره زمانی t ($/ha)
δ_i^t	هزینه برداشت بایومس در منطقه عرضه i در دوره زمانی t ($/ha)
S_j^t	هزینه نگهداری بایومس در انبار j در دوره زمانی t ($/tonne)
φ_{ij}^t	هزینه حمل بایومس از منطقه عرضه i به انبار j در دوره زمانی t ($/tonne ×km)
D_{ij}	فاصله بین منطقه عرضه i و انبار j (km)

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

هزینه حمل بایومس از انبار j به پالایشگاه r در دوره زمانی t ($/tonne ×km)	α_{jr}^{t}
فاصله بین انبار j و پالایشگاه r (km)	D_{jr}
هزینه حمل سوخت زیستی از پالایشگاه r به ناحیه تقاضای k در دوره زمانی t ($/l ×km)	β_{rk}^{t}
فاصله بین پالایشگاه r و ناحیه تقاضای k (km)	D_{rk}
هزینه ثابت سالانه پالایشگاه r با سطح ظرفیت q' در دوره زمانی t ($)	$F_{rq'}^{t}$
هزینه تولید سوخت زیستی در پالایشگاه r در دوره زمانی t ($/l)	W_{r}^{t}
حداکثر زمین حاشیه‌ای در دسترس برای کشت بایومس در منطقه عرضه i (ha)	M_{i}
حداکثر ظرفیت سالانه انبار j با سطح ظرفیت q در دوره زمانی t (tonne)	Q_{jq}^{t}
حداکثر حجم تولید سوخت زیستی در پالایشگاه r با سطح ظرفیت q' در دوره زمانی t (l)	$P_{rq'}^{t}$
حداقل نرخ استفاده از ظرفیت پالایشگاه r با سطح ظرفیت q'	$O_{rq'}$
حجم سوخت زیستی مورد نیاز در ناحیه‌ی تقاضای k در دوره زمانی t (l)	Z_{k}^{t}
محصول بایومس در زمین‌های حاشیه‌ای واقع در منطقه عرضه i در دوره زمانی t (tonne/ha)	A_{i}^{t}
سوخت زیستی بدست آمده از بایومس در پالایشگاه r (l/tonne)	θ_{r}
نرخ خرابی بایومس در انبار	L

فرضیات مسئله

فرضیات مدل ارائه شده به صورت زیر می‌باشند:

- برداشت بایومس بصورت عدل‌های مربعی بزرگ در وزن ۳۹۷ کیلوگرم که حمل و نقل و ذخیره-سازی آسان دارند، فرض شده است [۱۷، ۹].
- مطالعات نشان می‌دهد که برداشت‌های متعدد در طول یک سال به خاطر تضعیف ریشه، مقدار کل بایومس تولید شده را کاهش می‌دهد. بنابراین یک برداشت (دوره‌های زمانی یکساله)، بلافاصله پس از اولین فصل سرما در این مدل استفاده شده که در تحقیقات به عنوان سازگاترین روش برداشت با محیط زیست و مقرون به صرفه ترین روش، شناخته شده است [۲۰].

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

- از آن جا که حمل و نقل جاده‌ای در تمام مناطق در دسترس است؛ در این تحقیق برای حمل بایومس و سوخت زیستی تنها حمل جاده‌ای به ترتیب به صورت کامیون و تانکر، در نظر گرفته شده است.
- فرض بر این است که تقاضای سرانه سوخت زیستی در هر منطقه‌ی تقاضا، معلوم و قطعی است.

مدل‌سازی ریاضی

یک مدل خطی عدد صحیح مختلط، پیشنهاد شده تا هزینه‌های کلی زنجیره تأمین سوخت زیستی را به‌وسیله تعیین سطوح بهینه متغیرهای تصمیم حداقل کند.

تابع هدف (معادله ۱)، هزینه‌های کلی زنجیره تأمین سوخت زیستی را حداقل می‌کند و شامل نه بخش است: بخش اول هزینه اجاره زمین‌های حاشیه‌ای واقع در تمامی مناطق عرضه i را در تمام دوره‌های زمانی محاسبه می‌کند. بخش دوم و سوم به ترتیب به هزینه کشت و برداشت بایومس در تمامی مناطق عرضه i در تمام دوره‌های زمانی اشاره دارد. بخش چهارم، هزینه‌ی ذخیره‌سازی بایومس در تمامی انبارهای واقع در مناطق j را در تمام دوره‌های زمانی محاسبه می‌کند. بخش پنجم تا هفتم به ترتیب مربوط به هزینه‌های حمل بایومس از مناطق عرضه i به انبارهای واقع در مناطق j و از انبارها تا پالایشگاه‌های واقع در نواحی r و حمل سوخت زیستی از این پالایشگاه‌ها به نقاط تقاضای واقع در نواحی k در تمام دوره‌های زمانی است. بخش هشتم، هزینه ثابت پالایشگاه‌های تاسیس شده را در تمامی سطوح ظرفیت آن‌ها در تمام دوره‌های زمانی محاسبه می‌کند و بخش نهم تابع هدف، مربوط به هزینه تولید سوخت زیستی در پالایشگاه‌های واقع در مناطق r در تمام دوره‌های زمانی است.

$$\begin{aligned}\min Z &= \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} C_i^t Y_i^t + \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} Cu_i^t Y_i^t + \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} \delta_i^t Y_i^t + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T} S_j^t S_{ij}^t \\ &+ \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T} \varphi_{ij}^t D_{ij} S_{ij}^t + \sum_{j=1}^{j}\sum_{r=1}^{R}\sum_{t=1}^{T} \alpha_{jr}^t D_{jr} V_{jr}^t + \sum_{r=1}^{R}\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} \beta_{rk}^t D_{rk} N_{rk}^t \\ &+ \sum_{r=1}^{R}\sum_{q'=1}^{Q'}\sum_{t=1}^{T} F_{rq'}^t X_{rq'} + \sum_{r=1}^{R}\sum_{t=1}^{T} W_r^t N_r^t\end{aligned} \tag{۱}$$

محدودیت ۲، تضمین می‌کند که در هر منطقه عرضه i در هر دوره زمانی t، زمین‌های حاشیه‌ای تخصیص یافته برای کشت بایومس، از حداکثر زمین‌های حاشیه‌ای در دسترس تجاوز نکند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

$$Y_i^t \le M_i, \quad \forall i,t \tag{۲}$$

محدودیت ۳، بیان می‌کند که حداکثر یک پالایشگاه (در تمام سطوح ظرفیت q') می‌تواند در هر مکان r تاسیس شود.

$$\sum_{q'=1}^{Q'} X_{rq'} \le 1, \quad \forall r \tag{۳}$$

محدودیت ۴، مربوط به ظرفیت هر انبار است و بیان می‌کند که مقدار بایومس ذخیره شده در انبار j در هر دوره زمانی t، نباید از حداکثر ظرفیت آن انبار در دوره زمانی مذکور تجاوز کند.

$$\sum_{i=1}^{I} S_{ij}^t \le \sum_{q=1}^{Q} Q_{jq}^t, \quad \forall j,t \tag{۴}$$

محدودیت ۵، تضمین می‌کند که یک پالایشگاه در سطح ظرفیت q' (درصورتی که در مکان r تاسیس شود) نمی‌تواند در هر دوره زمانی t، بیش از ظرفیت خود سوخت زیستی تولید کند.

$$N_r^t \le \sum_{q'=1}^{Q'} P_{rq'}^t X_{rq'}, \quad \forall r,t \tag{۵}$$

محدودیت ۶، تضمین می‌کند که میزان تولید سوخت زیستی در تمام پالایشگاه‌ها در هر دوره، بیشتر از حداقل نرخ استفاده از ظرفیت تمام پالایشگاه‌ها در آن دوره زمانی باشد.

$$\sum_{r=1}^{R} N_r^t \ge \sum_{r=1}^{R}\sum_{q'=1}^{Q'} O_{rq'} P_{rq'}^t X_{rq'}, \quad \forall t \tag{۶}$$

محدودیت ۷ بیان می‌کند که در طول هر دوره زمانی t، ظرفیت تولید همه‌ی پالایشگاه‌ها بزرگتر یا مساوی مقدار سوخت زیستی مورد نیاز در تمام نقاط تقاضای k باشد.

$$\sum_{r=1}^{R}\sum_{q'=1}^{Q'} P_{rq'}^t X_{rq'} \ge \sum_{k=1}^{K} Z_k^t, \quad \forall t \tag{۷}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

محدودیت ۸، بیان می‌کند که مقدار بایومس ارسال شده از هر انبار به تمام پالایشگاه‌ها در هر دوره زمانی، نباید از مقدار قابل استفاده‌ی ذخیره شده‌ی آن (با در نظر گرفتن تلفات بایومس در انبار) بیشتر باشد. بایومس برداشت شده و ذخیره شده در هر انبار، باید به یک پالایشگاه یا بیشتر تخصیص یابد.

$$\sum_{r=1}^{R} V_{jr}^{t} \le \sum_{i=1}^{I} S_{ij}^{t}(1-L), \quad \forall j,t \tag{۸}$$

محدودیت ۹، تضمین می‌کند که در هر منطقه عرضه i در هر دوره‌ی زمانی، مقدار بایومس تولید شده در افق زمانی، مساوی با مقدار ارسال شده و ذخیره شده‌ی بایومس در انبارهای مرتبط، در آن دوره‌ی زمانی باشد.

$$A_i^t Y_i^t = \sum_{j=1}^{J} S_{ij}^{t}, \quad \forall i,t \tag{۹}$$

محدودیت ۱۰، بیان می‌کند که مقدار بایومس دریافت شده از تمام انبارهای ذخیره‌سازی و دریافت شده توسط هر پالایشگاه r در طول هر دوره زمانی t، باید تماما به سوخت زیستی تبدیل شود.

$$N_r^t = \sum_{j=1}^{J} \theta_r V_{jr}^{t}, \quad \forall r,t \tag{۱۰}$$

محدودیت ۱۱، بیان می‌کند که در طی هر دوره زمانی t، حجم سوخت زیستی ارسال شده از تمام پالایشگاه‌های واقع در نواحی r و اختصاص یافته به هر نقطه تقاضای k، نباید کمتر از نیاز سوخت زیستی در آن منطقه باشد.

$$\sum_{r=1}^{R} N_{rk}^{t} \ge Z_k^t \quad \forall t, \mathrm{k} \tag{۱۱}$$

محدودیت ۱۲ تضمین می‌کند که در هر دوره زمانی t برای هر پالایشگاه، سوخت زیستی ارسال شده به تمام مناطق تقاضا از سوخت تولید شده در آن پالایشگاه در آن دوره تجاوز نکند.

$$\sum_{k=1}^{K} N_{rk}^{t} \le N_r^t \quad \forall r,t \tag{۱۲}$$

در نهایت محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴، ماهیت متغیرهای تصمیم استفاده شده در مدل را بیان می‌کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

$$X_{rq'} \in \{0,1\}, \quad \forall r, q' \tag{۱۳}$$

$$S_{ij}^{t}, V_{ir}^{t}, Y_{i}, N_{rk}^{t}, N_{r}^{t} \geq 0, \quad \forall i, j, \mathrm{r}, \mathrm{k}, t \tag{۱۴}$$

مدل آرما

مدل خود رگرسیو میانگین متحرک که به مدل آرما مشهور است؛ مدلی است که غالبا 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 خودرگرسیو (AR) و میانگین متحرک (MA) است که به ترتیب به شکل درجات p و q در مدل نشان داده می‌شوند. معادله‌ی ۱۵، فرم کلی مدل ARMA(p,q) را نشان می‌دهد.

$$Z_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^{p} \varphi_i Z_{t-i} + \sum_{i=1}^{q} \theta_i \varepsilon_{t-i} \tag{۱۵}$$

در معادله ۱۵، φ_i و θ_i پارامترهای مدل، c عدد ثابت و ε_t 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 آریما به آرما تبدیل خواهد شد. معمولا برای تخمین مدل آریما و آرما از روش باکس–جنکینز استفاده می‌شود که دارای مراحل زیر است:

۱. شناسایی: در این مرحله، چندین مدل از گروه مدل‌های آریما انتخاب می‌شود. این بدان معنی است که با در نظر گرفتن توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی، مقادیر نمونه برای p و q تعیین می‌گردد.

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

۳. ارزیابی: در آخرین مرحله، میزان مطلوبیت مدلی که در دور اول انتخاب و در دور دوم برآورد شده است؛ ارزیابی می‌شود. این ارزیابی بر اساس معیارهایی که برای هدف مشابه در نظر گرفته شده، انجام می‌گیرد [۱۲].

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

برای انتخاب مدل بهینه، معیارهایی توسط محققین ارائه شده است. در این تحقیق از معیار شوارتز[1] برای انتخاب بهترین مدل، استفاده و مدلی انتخاب شده که معیار شوارتز آن حداقل بوده است. همچنین فرض شده که تقاضای سوخت زیستی از الگوی ARMA(p,q) پیروی می‌کند. بنابراین با بهره‌گیری از مدل آرما، رابطه تقاضا برآورد شده و میزان تقاضا برای دوره‌های بعد، مورد پیش‌بینی قرارگرفته است. سپس بر اساس داده‌های پیش‌بینی شده و با استفاده از مدل ارائه شده برای زنجیره تأمین سوخت زیستی، مساحت ناحیه حاشیه‌ای مورد استفاده، مکان و حجم تولید بهینه‌ی پالایشگاه‌ها و جریان بهینه در زنجیره برای دوره‌های بعد، تعیین شده است.

۳. مثال عددی

در این بخش یک مثال عددی برای تجزیه و تحلیل مدل ارائه شده بر اساس تقاضای آرما، آورده شده است. ده منطقه‌ی عرضه برای کشت بایومس در نظر گرفته شده و در هر منطقه یک مرکز جمع‌آوری بایومس برداشت شده، قرار دارد. همچنین هر منطقه، یک نقطه بالقوه برای تاسیس 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.

پارامترهای ورودی

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

۱. افق مدل‌سازی ۳۲ ساله بوده و هر سال به عنوان یک دوره‌ی زمانی فرض شده است (t=۱،...،۳۲).

۲. ده بخش به عنوان مکان‌های بالقوه برای کشت بایومس (i=۱،...،۱۰)، محل انبارهای موجود (j=۱،...،۱۰)، نقاط بالقوه برای ساخت پالایشگاه (r=۱،...،۱۰) و مکان تقاضای سوخت زیستی (k=۱،...،۱۰) در نظر گرفته شده‌اند.

۳. برای تمام دوره‌ها هیچ اثر فصلی فرض نشده است.

1. Schwarz Bayesian Criterion

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

۴. فرض شده که نسبت جمعیت در سال‌های مختلف در طول افق زمـانی ثابـت اسـت و تقاضـای هـر منطقه، به نسبت جمعیت آن ناحیه است.

۵. تمامی هزینه‌ها در طول افق زمانی، ثابت در نظر گرفته شده است.

پارامترهای ورودی مسئله در جداول ۲ و ۳، آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای ورودی M_i، A_i^t، C_i^t

منطقه(**i**)	جمعیت	$C_i^t(\$/ha)$ برای هر **t**	$A_i^t(tonne/ha)$ برای هر **t**	$M_i(ha)$
۱	۱۳۹۳۷	۲۸.۴	۱۷.۲	۳۳۵۰۸
۲	۱۱۱۱۹	۲۹.۶	۱۷	۳۳۱۱۶
۳	۱۶۳۲۱	۵۳.۱	۲۰.۲	۲۹۴۲۵
۴	۶۶۸۶۱	۲۵.۹	۱۸.۱	۲۹۰۲۱
۵	۸۹۶۲	۲۸.۴	۱۶.۴	۲۴۸۲۱
۶	۳۹۹۳	۲۷.۲	۱۶.۷	۲۴۷۲۵
۷	۲۱۱۰۰	۳۹.۵	۱۷.۱	۲۴۰۶۶
۸	۱۱۴۵۱	۲۹.۶	۱۷.۵	۲۳۵۵۶
۹	۲۲۴۶	۲۸.۴	۱۵.۳	۲۳۰۲۳
۱۰	۶۴۲۹	۳۲.۱	۱۷.۱	۲۱۶۲۳

جدول ۳. مقادیر سایر پارامترهای کلیدی ورودی

پارامتر	واحد	مقدار
Cu_i^t	($/ha)	۳۹۵ (برای هر i و t)
δ_i^t	($/ha)	۲۷.۹ (برای هر i و t)
S_j^t	($/tonne)	۲۱.۷ (برای هر j و t)
φ_{ij}^t	($/tonne ×km)	۰.۱۸ (برای هر i و j و t)

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

پارامتر	واحد	مقدار
α_{jr}^{t}	($/tonne ×km)	۰.۱۸ (برای هر j و r و t)
β_{rk}^{t}	($/l ×km)	۰.۰۰۰۰۲۸(برای هر r و k و t)
$F_{rq'}^{t}$	($)	برای هرr و t و $q' =$ ۱ ، پالایشگاه با ظرفیت MLPY ۷۶۰، ۳۹۰۰۰۰۰۰
$F_{rq'}^{t}$	($)	برای هرr و t و $q' =$ ۲، پالایشگاه با ظرفیت MLPY ۱۵۲۰، ۷۲۰۰۰۰۰۰
W_{r}^{t}	($/l)	۰.۲ (برای هر r و t)
Q_{jq}^{t}	(tonne)	۱۵۱۱۹۷۵ (برای هر j، q و t)
$P_{rq'}^{t}$	(l)	برای هر r ، t و $q' =$ ۱ ۷۶۰۰۰۰۰۰۰
$P_{rq'}^{t}$	(l)	برای هر r ، t و $q' =$ ۲ ۱۵۲۰۰۰۰۰۰۰
$O_{rq'}$	-	۰.۸۸ (برای هر r و q')
θ_{r}	(l/tonne)	۳۱۳ (برای هر r)
L	-	۰.۰۰۲۸

ابتدا مدل خطی عدد صحیح مختلط پیشنهاد شده با نرم‌افزار GAMS و بر اساس 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 بهینه‌ی زنجیره تأمین برابر ۴۳۶۵۵۵۰۰۰۰۰ دلار بوده و از میان ۱۰ مکان بالقوه برای ساخت پالایشگاه، ۴ مکان را به عنوان مکان‌های بهینه انتخاب می‌کند و سه پالایشگاه در سطح ظرفیت اول در بخش اول، سوم و هشتم و یک پالایشگاه در سطح ظرفیت دوم در بخش چهارم می‌سازد (جدول ۴).

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

جدول ۴. مکان بهینه پالایشگاه‌ها با داده‌های واقعی

$X_{rq'}$	$q'=۱$	$q'=۲$
r=۱	■	
r=۳	■	
r=۴		■
r=۸	■	

افق مدل‌سازی در این مسئله ۳۲ سال فرض شده و داده‌های تقاضا طی ۳۲ سال، یک سری زمانی را تشکیل می‌دهند که می‌توان مقادیر آن‌ها را برای سال‌های بعد، از طریق مدل‌سازی آرما پیش‌بینی کرد. بنابراین برای تقاضا از طریق نرم‌افزار Eviews8، مدل‌سازی آرما انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که داده‌های در نظر گرفته شده برای تقاضا، از فرآیند ARMA(۲،۱) پیروی می‌کنند (معادله ۱۶).

$$Z_t = c + \varepsilon_t + \varphi_1 Z_{t-1} + \varphi_2 Z_{t-2} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} \qquad (۱۶)$$

روابط ۲۶–۱۷، معادلات آرما برای ده بخش در نظر گرفته شده‌ی مثال عددی است .

$$۱\,i = \quad Z_t = 105000000 + 2.08 Z_{t-1} - 1.09 Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55 \varepsilon_{t-1} \qquad (۱۷)$$

$$۲\,i = \quad Z_t = 83793584 + 2.08 Z_{t-1} - 1.09 Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55 \varepsilon_{t-1} \qquad (۱۸)$$

$$۳\,i = \quad Z_t = 123000000 + 2.08 Z_{t-1} - 1.09 Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55 \varepsilon_{t-1} \qquad (۱۹)$$

$$۴\,i = \quad Z_t = 504000000 + 2.08 Z_{t-1} - 1.09 Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55 \varepsilon_{t-1} \qquad (۲۰)$$

$$۵\,i = \quad Z_t = 67538276 + 2.08 Z_{t-1} - 1.09 Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55 \varepsilon_{t-1} \qquad (۲۱)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

$$۶i = \quad Z_t = 30091535 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \tag{۲۲}$$

$$۷i = \quad Z_t = 159000000 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \tag{۲۳}$$

$$۸i = \quad Z_t = 86295559 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \tag{۲۴}$$

$$۹i = \quad Z_t = 16926017 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \tag{۲۵}$$

$$۱۰i = \quad Z_t = 48449406 + 2.08Z_{t-1} - 1.09Z_{t-2} + \varepsilon_t - 1.55\varepsilon_{t-1} \tag{۲۶}$$

از طریق فرآیند آرما، 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 میزان مناطق بهینه عرضه بایومس، مکان و تولید بهینه‌ی پالایشگاه‌ها و جریان بهینه بین سطوح مختلف زنجیره در ۸ دوره‌ی بعد را پیش‌بینی خواهد کرد. خروجی بدست آمده از مدل از طریق نرم‌افزار GAMS به صورت زیر است:

هزینه بهینه‌ی پیش‌بینی شده برای زنجیره تأمین برابر ۱۸۵۴۳۳۰۰۰۰۰ دلار بوده و از میان ۱۰ مکان بالقوه برای ساخت پالایشگاه، ۴ مکان را به عنوان مکان‌های بهینه انتخاب می‌کند و دو پالایشگاه در سطح ظرفیت اول در بخش سوم و هشتم و دو پالایشگاه در سطح ظرفیت دوم در بخش‌های اول و چهارم می‌سازد (جدول ۵).

جدول ۵. مکان بهینه پالایشگاه‌ها با داده‌های پیش بینی شده

$X_{rq'}$	$q'=۱$	$q'=۲$
r=۱		■
r=۳	■	
r=۴		■
r=۸	■	

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

اعتبارسنجی

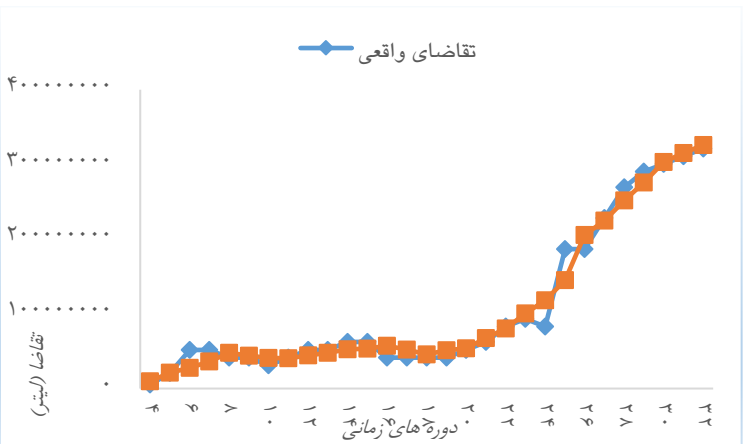
مدل ارائه شده در این مقاله در زنجیره تأمین سوخت زیستی برای یک مثال عددی به کار گرفته شده و سپس با استفاده از تست باز تولید رفتار [۱۸] اعتبار سنجی در دو مرحله صورت گرفتـه اسـت. در ابتـدا پارامترهای موجود در مدل آرما با استفاده از دادهای تمام دوره‌ها برآورد شده است. در مرحله دوم رونـد تغییر مقدار تقاضای بخش اول از دوره زمانی t=۴ تا t=۳۲ در دو مقدار واقعی و پـیش‌بینـی شـده بـا فرآیند آرما مورد مقایسه قرار گرفته‌اند (جدول ۶) . مقایسه نتایج داده‌های واقعی با داده‌های پـیش‌بینـی شده از طریق مدل آرمای پیشنهادی در شکل ۲، اعتبار مدل را به طور کمی نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج داده‌های واقعی با داده‌های پیش بینی شده (بر حسب لیتر)

دوره	تقاضای واقعی	تقاضای پیش‌بینی شده
۴	۵۱۸۲۴۱۳	۹۵۱۹۴۴۴
۵	۲۰۷۲۹۶۵۱	۲۱۳۹۲۵۵۱
۶	۵۱۸۲۴۱۲۹	۲۷۷۷۳۱۹۲
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	۵۳۵۹۸۵۸۸

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

دوره	تقاضای واقعی	تقاضای پیش‌بینی شده
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



شکل ۲. روند تغییرات تقاضا در دو حالت واقعی و پیش بینی شده

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

٤. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

برای تجاری سازی تولید سوخت زیستی، نیاز بـه طراحـی یـک شـبکه زنجیـره تـأمین کارآمـد اسـت. پیچیدگی‌های فراوان در زنجیره تأمین سوخت زیستی و وجود متغیرهای غیر قطعی در آن، منجر شـده 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 فرآیند آرما پیروی می‌کند. در این مقاله تاثیر ساختار سری‌های زمانی آرما بـرای تقاضـای سـوخت 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 پیش‌بینـی آرمـا بـرای تقاضـای سوخت زیستی، یک طراحی بهینه زنجیره تأمین برای هشت دوره زمانی آینده فراهم شـده تـا بینشـی وسیع‌تر برای طراحی موثرتر زنجیره تأمین و حداقل کردن هزینه کلی آن به دست دهد.

منابع

[1] Akgul O., et al. (2010), "Optimization-based Approaches for Bioethanol Supply Chains", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(9), pp. 4927-4938.

[2] Awudu, I. and J. Zhang (2012), "Uncertainties and Sustainability Concepts in Biofuel Supply Chain Management: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), pp. 1359-1368.

[3] Bowling, I.M., J.M. Ponce-Ortega and M.M. El-Halwagi (2011), Facility location and Supply Chain Optimization for a Biorefinery", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(10), pp. 6276-6286.

[4] Brockwell P.J. and R.A. Davis (2013), *Time series: theory and methods*, Springer Science & Business Media.

[5] Chan F.T., Samvedi A. and S. Chung (2015), "Fuzzy Time Series Forecasting for Supply Chain Disruptions", *Industrial Management & Data Systems*, 115(3), pp. 419-435.

[6] Chen C.W. and Y. Fan (2012), "Bioethanol Supply Chain System Planning under Supply and Demand Uncertainties", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), pp. 150-164.

[7] Dal-Mas M. et al. (2011), Strategic Design and Investment Capacity Planning of the Ethanol Supply Chain under Price Uncertainty", *Biomass and bioenergy*, 35(5), pp. 2059-2071.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]

[8] De Meyer A. et al. (2014), "Methods to Optimise the Design and Management of Biomass-for-bioenergy Supply Chains: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 31. pp. 657-670.

[9] Duffy M. and V.Y. Nanhou (2001), *Costs of Producing Switchgrass for Biomass in Southern Iowa*, Iowa State University, University Extension.

[10] Giarola S., Shah N. and F. Bezzo (2012), "a Comprehensive Approach to the Design of Ethanol Supply Chains Including Carbon Trading Effects", *Bioresource technology*, No. 107, pp. 175-185.

[11] Gilbert K. (2005), "an ARIMA Supply Chain Model", *Management Science*, 51(2), pp. 305-310.

[12] Kohansal, M.R. (2013), "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*, No. 4.

[13]Lee H.L., V. Padmanabhan and S. Whang (2004), "Information Distortion in a Supply Chain: the Bullwhip Effect", *Management science*, No. 50 pp. 1875-1886.

[14] Mol R. et al. (1997), "Simulation and Optimization of the Logistics of Biomass Fuel Collection", *NJAS wageningen journal of life sciences*, 45(1), pp. 217-228.

[15] Rentizelas A.A., Tolis A.J. and I.P. Tatsiopoulos (2009), "Logistics Issues of Biomass: The Storage Problem and the Multi-biomass Supply Chain", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), pp. 887-894.

[16] Shafiee S. and E. Topal (2009), "When Will Fossil Fuel Reserves be Diminished?" *Energy policy*, 37(1), pp. 181-189.

[17] Sokhansanj S. et al. (2009), Large-scale Production, Harvest and Logistics of Switchgrass (Panicum virgatum L.)-current Technology and Envisioning a Mature Technology", *Biofuels, bioproducts & biorefining*, 3(2), pp. 124.

[18] Sushil (1993), "System Dynamics: a Practical Approach for Managerial Problems", *Wiley Eastern Limited*.

[19] Vlachos D. et al. (2008), "a Strategic Supply Chain Management Model for Waste Biomass Networks", *in 3rd International Conference on Manufacturing Engineering*.

[20] Zhang J. et al. (2013), "An Integrated Optimization Model for Switchgrass-Based Bioethanol Supply Chain", *Applied Energy*, No. 102, pp. 1205-1217.

[Downloaded from necjournals.ir on 2025-11-05]