مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۱-۳۸، شماره‌ی ۲، ص. ۷۹-۸۷، (پژوهشی)

Original Article

مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی در شرایط عدم قطعیت با در نظرگرفتن مسئله‌ی هاب

حانیه غدیری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
عبدالله آقایی * (استاد)
عماد روغنیان (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی از مهمترین انگیزه‌های تولید سوخت با استفاده از زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی است. شرط اساسی برای تجاری‌سازی تولید سوخت زیستی، طراحی بهینه‌ی زنجیره‌ی تأمین است. در این تحقیق، یک مدل زنجیره‌ی تأمین تک‌هدفه، چندسطحی و چنددوره‌یی در شرایط عدم قطعیت به همراه محدودیت‌های احتمالی ارائه شده است که در آن از هاب به عنوان یک سطح میانی استفاده شده است. با وجود پیچیدگی‌های فراوان در زنجیره‌ی تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر و متغیرهای غیرقطعی در آن، با در نظرگرفتن عدم قطعیت در میزان تقاضا، بررسی مدل ارائه شده در شرایط نزدیک‌تر به واقعیت ضروری است. فروش محصول جانبی لیگنین و در نظر گرفتن حمل‌ونقل چندوجهی از جمله راهکارهای کاهش هزینه‌ها بوده است. پس از آنالیز حساسیت، نتایج نشان داد که افزایش قیمت فروش بیشتر از کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و افزایش تقاضا تأثیر مثبتی در میزان سودآوری کل زنجیره‌ی تأمین داشته و مدل پیشنهادی ارائه شده از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر بوده است.

واژگان کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده، عدم قطعیت، بهینه‌سازی، هاب.

haniehghadiri@email.kntu.ac.ir
aaghaei@kntu.ac.ir
e_roghanian@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه افزایش جمعیت، تغییر سبک زندگی انسان‌ها و همچنین توسعه صنایع سبب افزایش مصرف انرژی در دنیا شده است. سوخت‌های فسیلی به دلیل ایجاد تغییرات آب و هوایی، مشکلات زیست‌محیطی و همچنین محدودیت منابع، باید جای خود را به انرژی‌های تجدیدپذیر دهند. در سال‌های اخیر زیست‌توده به عنوان یک منبع تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرارگرفته است و استفاده از آن به سرعت در حال رشد است.

زیست‌توده شامل کلیه موادی است که در طبیعت از موجودات زنده یا زائدات آنها حاصل شده است و انواع مختلفی دارد؛ این مواد را در سه نسل دسته‌بندی کرده‌اند: نسل اول شامل مواد خوراکی نظیر دانه‌های روغنی، شکر و نشاسته است؛ نسل دوم ماهیت غیرغذایی دارد که شامل زائدات کشاورزی و صنعتی است و نسل سوم زیست‌توده از مشتقات جلبک بوده است.[۱] تحقیق پیش رو بر پایه‌ی زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی است که منبع طبیعی غنی و تجدیدپذیری است متشکل از سلولز، همی سلولز و لیگنین. از مهمترین منابع آن می‌توان به ضایعات کشاورزی، ضایعات جنگلی، گیاهان بیوانرژی، ضایعات صنعتی و ... اشاره کرد. ضایعات کشاورزی ازجمله منابع پایدار زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی محسوب می‌شود. همچنین در بخش کشاورزی در سال چندین میلیون تن ضایعات کشاورزی تولید می‌شود که این منابع جزو منابع مهم در تولید سوخت‌های زیستی هستند.

طراحی و مدیریت زنجیره‌ی تأمین به صورت بهینه به توسعه‌ی بیشتر در استفاده‌ی از منابع تجدیدپذیر کمک خواهد کرد. طراحی بهینه‌ی زنجیره‌ی تأمین بیواتانول[۱] با استفاده از زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی با در نظرگرفتن جنبه‌ی اقتصادی و محیط زیستی سبب کاهش صدمات زیست‌محیطی شده و در جهت بهبود اقتصاد کشورهای جهان نقش مهمی ایفا می‌کند. بیواتانول (اتانول زیستی) از طریق تخمیر اجزای کربوهیدراتی مواد گیاهی تولید می‌شود و کاربردهای فراوانی نظیر کاربردهای صنعتی و بهداشتی دارد و همچنین به عنوان الکل سوختی می‌توان از آن استفاده کرد.

در این پژوهش به ارائه‌ی مدل زنجیره‌ی تأمین بیواتانول تک‌هدفه، چندسطحی و چنددوره‌یی در شرایط عدم قطعیت با در نظرگرفتن محدودیت‌های احتمالی با

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۹، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۲/۱۴، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۱۶.
DOI:10.24200/J65.2022.58967.2252

استفاده از زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی پرداخته شده است. همچنین باید در نظر گرفت استفاده از زیست‌توده‌ی نسل اول بر قیمت مواد غذایی و همچنین تأمین مواد غذایی اثرگذار است؛ در این مقاله از زیست‌توده‌ی غیرخوراکی استفاده شده است. برای ارائه‌ی طراحی بهینه از زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده، با وجود پیچیدگی‌ها و نااطمینانی‌های زنجیره‌ی تأمین، در نظر گرفتن شرایط نااطمینانی از جمله عدم قطعیت در میزان تقاضای بیواتانول و لیگنین ضروری است. با توجه به نااطمینانی در تقاضا و میزان تولید زیست‌توده در دوره‌های مختلف زمانی (سال)، مدل ریاضی در چندین دوره مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله با در نظر گرفتن هاب به عنوان یک سطح میانی به دنبال تسهیل انتقال میان سطوح زنجیره‌ی تأمین است. به علاوه فروش محصول جانبی (لیگنین) سبب کسب درآمد مازاد شده است. حمل‌ونقل چندوجهی عبارت است از ترکیب دو یا چند روش مختلف حمل‌ونقل جهت حمل کالا که هدف اصلی در استفاده از حمل‌ونقل چندوجهی، صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها بوده است، اگرچه همواره کاهش زمان سبب کاهش هزینه‌ها نمی‌شود.[۲] در مقاله‌ی حاضر، هدف از استفاده از حمل‌ونقل ریلی و جاده‌یی به عنوان زیرمجموعه‌یی از حمل‌ونقل چندوجهی، کاهش هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین بوده است.

ادامه‌ی مقاله بدین شرح سازماندهی شده است: در بخش بعدی پیشینه‌ی تحقیق بیان شده است. در بخش سوم مدل پیشنهادی ارائه شده است که شامل مفروضات مسئله، معرفی نمادهای مدل و ارائه‌ی مدل ریاضی است. در بخش چهارم برای حل مدل، مثال عددی ارائه شده است و در ادامه مقاله به ترتیب نتایج عددی حاصل از حل مدل، آنالیز حساسیت و نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی آورده شده است.

۲. پیشینه‌ی تحقیق

در سال‌های اخیر مطالعه در زمینه‌ی زنجیره‌ی تأمین تولید بیواتانول از زیست‌توده بسیار مورد توجه قرار گرفته است که در ادامه به بیان مختصری از این مطالعات می‌پردازیم. در مطالعه‌ی صورت گرفته از طریق ارائه‌ی مدل ریاضی عدد صحیح به منظور مقایسه‌ی نسل اول و دوم برای تولید بیواتانول[۳] مشخص شد که تولید بیواتانول از نسل اول در پالایشگاه‌ها صرفه‌ی اقتصادی بیشتری دارد. در سال بعد مطالعه‌ی پژوهشگران[۴] که توسعه‌یافته‌ی مطالعه‌ی قبلی بوده، تأثیر اقتصادی و محیط زیستی انتخاب چندین نوع زیست‌توده برای تولید بیواتانول بررسی شده است. این بررسی‌ها نشان داد که استفاده از چندین نوع زیست‌توده تأثیر مثبتی بر جنبه‌ی اقتصادی زنجیره‌ی تأمین داشته ولی بر جنبه‌ی زیست‌محیطی تأثیری نداشته است. در مطالعه‌ی بعدی[۵] زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی بیواتانول بررسی شده است که یکی از آنها بر پایه‌ی نسل اول زیست‌توده و دیگری بر پایه نسل دید دوم زیست‌توده بوده است. نتایج نشان داد که تولید بیواتانول از نسل اول زیست‌توده ازنظر اقتصادی به صرفه‌تر بوده ولی امنیت غذایی را به خطر می‌اندازد. نوع دیگری از زیست‌توده‌ی نسل دوم، ضایعات جنگلی هستند[۶] که زنجیره‌ی تأمین آن برای ارزیابی پتانسیل این منابع بررسی و نشان داده شده است که این منابع را می‌توان به عنوان منابع پایدار در مناطق جنگلی به حساب آورد. محققان زباله‌ی زیستی را به عنوان جایگزینی برای تولید سوخت‌های زیستی معرفی کرده‌اند[۷] و عوامل اقتصادی را مانع رسیدن به بهره‌برداری از انرژی‌های پاک می‌دانند. محققان با بررسی زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی[۸] نشان دادند که استفاده از این منابع در مناطقی که به صورت گسترده قابل دسترس‌اند می‌تواند بهینه باشد. محققان با ارائه‌ی مطالعه‌یی در رابطه با منابع لیگنوسلولزیک، لجستیک زیست‌توده، نوع محصول تولیدی و عملیات پیش‌پردازش آن[۹]، به بیان فرایندهای غیرمتمرکز پیش‌پردازش و عملیات متمرکز پالایشگاه‌ها پرداخته‌اند. این مقاله نشان داد که بهره‌برداری از ضایعات کشاورزی درآمد مازاد به همراه دارد و همچنین فرصت‌های شغلی نیز ایجاد می‌کند و نیز منابع پایداری برای تولید سوخت و محصولات جانبی در پالایشگاه‌ها محسوب می‌شود. مقاله‌ی دیگری در زمینه‌ی استفاده از ضایعات کشاورزی برای تولید بیواتانول[۱۰] ارائه شد که نشان داد استفاده از این منابع به دلیل دسترسی فراوان، اقتصادی است.

مدلی برای زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده ارائه شده است[۱۱] که توابع هدف آن به دنبال بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی فاصله در سراسر زنجیره‌ی تأمین هستند. نتایج نشان داد که پارامترهای فاصله و قیمت خرید بیشترین تأثیر را بر تصمیم‌گیری‌ها و توابع مالی داشته است. در مطالعات صورت گرفته تأثیر فواصل حمل‌ونقل بر هزینه‌ها و همچنین استفاده‌ی زمین بر محیط‌زیست ارزیابی شده است[۱۲] که موانع فنی، محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی، همچنین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد سیستم زنجیره‌ی تأمین بررسی و مشاهده شد که در حمل‌ونقل فواصل میان سطوح زنجیره‌ی تأمین بسیار حائز اهمیت است و استفاده‌ی بیشتر از زمین برای تأمین زیست‌توده اثرات زیست‌محیطی بیشتری را به همراه دارد. بهبود کارایی مؤلفه‌های تولید و حمل‌ونقل می‌تواند نقطه‌ی شروعی در راستای توسعه‌ی پایدار صنایع زیست‌توده باشد.[۱۳] در مطالعه‌ی بعدی[۱۴] بررسی اقتصادی و زیست‌محیطی زنجیره‌ی تأمین بیواتانول با استفاده از مدل ریاضی مد نظر بوده است. در این مقاله تأمین زیست‌توده به گونه‌یی در نظر گرفته شده است که از تأمین‌کنندگان امکان تبادل مواد اولیه را باهم داشته باشند؛ نتایج تحقیق نشان داد که این روش به دلیل تولید بیشتر بیواتانول در پالایشگاه و بهره‌وری بهتر از زیست‌توده، بهینه‌تر از حالتی است که هر تأمین‌کننده به صورت مجزا زیست‌توده‌ی مورد نیاز را تأمین کند. در یک مدل ریاضی که با هدف کاهش هزینه‌ها برای تولید سوخت زیستی ارائه شد[۱۵]، از ضایعات کشاورزی به عنوان زیست‌توده استفاده کرده‌اند؛ در آن بررسی مشخص شد که بخش اصلی هزینه‌ها مربوط به هزینه‌ی تولید سوخت زیستی و هزینه‌ی حمل زیست‌توده بوده است. همچنین در سراسر زنجیره‌ی تأمین سوخت زیستی بخش حمل‌ونقل بیشترین انتشارگاز کربن را داشته است. عثمانی و ژانگ[۱۶] به ارائه‌ی زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی با استفاده از چمن ترکه در شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند که عدم قطعیت‌های متعددی از جمله قیمت خرید ضایعات کشاورزی، برداشت زیست‌توده، تقاضای بیواتانول و قیمت فروش بیواتانول در این زنجیره‌ی تأمین بررسی شده است. نتیجه‌گیری‌ها نشان داد که حجم تولید بیواتانول به شدت به میزان تقاضا حساس است. همچنین افزایش قیمت فروش بیواتانول سبب افزایش حجم تولید بیواتانول شده تا سود حاصل از فروش بیشتر شود. با افزایش میزان بارندگی نیز میزان تولید افزایش یافته و افزایش قیمت ضایعات کشاورزی سبب استفاده‌ی بیشتر از زمین‌ها جهت کاشت چمن ترکه می‌شود.

در مطالعه‌ی مسئله مکان‌یابی هاب (از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳)، محققان به‌بیان دسته‌بندی‌های مسئله‌ی هاب، روش‌های حل، مدل‌های مهم در مسئله‌ی مکان‌یابی هاب پرداخته‌اند.[۱۷] خلاصه‌یی از نتیجه‌ی حاصله در جدول ۱ ارائه شده است.

بر اساس تحقیقات موجود می‌توان نتیجه گرفت که هزینه‌های مرتبط با حمل‌ونقل و تولید از جمله هزینه‌های مهم در زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده محسوب می‌شوند. همچنین می‌توان پی برد که مسئله‌ی مکان‌یابی هاب در زنجیره‌ی تأمین

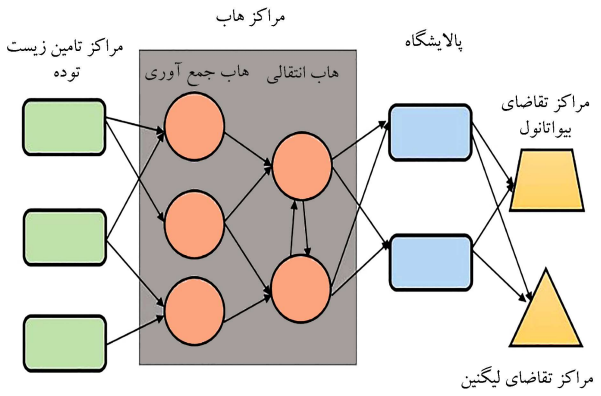
جدول ۱. مرور ادبیات موضوع.

نام نویسنده	مقاله مروری	مکان‌یابی هاب	نسل زیست‌توده		نوع محصول تولیدی	قطعیت پارامترها		نوع بررسی هدف			رویکرد حل		مطالعه موردی
			نسل اول	نسل دوم		قطعی	غیرقطعی	اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی	دقیق	غیردقیق	
یاکوو و همکاران [7]				❋	انرژی زیستی			❋	❋	❋	❋		
ماروین و همکاران[8]				❋	بیواتانول	❋		❋				❋	آمریکا
ماروین و همکاران [10]				❋	بیواتانول		❋	❋			❋		آمریکا
کوریان و همکاران [9]	❋												
عثمانی و ژانگ [17]				❋	بیواتانول		❋	❋					آمریکا
فراهانی و همکاران [18]	❋												
عثمانی و ژانگ [16]				❋	بیواتانول		❋	❋	❋			❋	آمریکا
مانسوی و همکاران [6]				❋				❋	❋				کانادا
دی آمور و بزو [3]				❋	بیواتانول- الکتریسیته	❋		❋	❋		❋		
آسنسو و همکاران [4]			❋	❋	بیواتانول- الکتریسیته	❋		❋	❋		❋		ایتالیا
پرین و همکاران [12]								❋	❋				فرانسه
احمد و سرکار [15]				❋	سوخت زیستی		❋	❋			اشاره نشد		
زهرایی و همکاران [13]				❋	انرژی زیستی		❋		❋			❋	مالزی
حاجی اسماعیلی و همکاران [5]			❋	❋	بیواتانول	❋		❋	❋		❋		ترکیه
دورماز و بیلگن [11]				اشاره نشد	الکتریسیته	❋		❋	❋		❋		ترکیه
پژوهش حاضر		❋		❋	بیواتانول- لیگنین		❋	❋			❋		

زیست‌توده مسئله‌یی است که به درستی در مقالات دیده نشده است. هاب‌ها به عنوان نقاط اتصال مبدأها و مقصدها عمل می‌کنند. با توجه به گستردگی منابع تأمین زیست‌توده، این مقاله با در نظر گرفتن هاب، در راستای تسهیل انتقال زیست‌توده در میان سطوح زنجیره‌ی تأمین گام برداشته است. استفاده از زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی به علت عدم تأثیر بر قیمت مواد غذایی و حفظ امنیت تأمین مواد خوراکی می‌تواند برای تولید سوخت زیستی مورد استفاده قرار گیرد. فروش محصول جانبی به عنوان منبع درآمد مازاد و در نظر گرفتن حمل‌ونقل چندوجهی برای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل زنجیره‌ی تأمین در نظر گرفته شده است.

۳. ارائه‌ی مدل پیشنهادی

در مدل ریاضی ارائه شده، از ضایعات کشاورزی به عنوان زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی در تولید بیواتانول و استخراج لیگنین استفاده شده است. کاه گندم و کاه جو به عنوان ضایعات کشاورزی از مراکز تأمین زیست‌توده خریداری شده و به وسیله قطار به مراکز ذخیره‌سازی که در این‌جا به عنوان مراکز هاب جمع‌آوری در نظر گرفته شده‌اند، انتقال داده می‌شوند. ضایعات از هاب جمع‌آوری و به وسیله‌ی کامیون به مراکز هاب انتقالی وارد می‌شود. مراکز تأمین زیست‌توده و پالایشگاه‌ها از طریق ارتباط میان دو هاب به یکدیگر تخصیص می‌یابند. بیواتانول به وسیله‌ی قطار و لیگنین به وسیله کامیون از پالایشگاه به مراکز تقاضا انتقال داده می‌شود. ساختار زنجیره‌ی تأمین در شکل ۱ نشان داده شده است. هاب‌ها از نظر نوع اتصال به دو دسته‌ی تخصیص تکی و تخصیص چندگانه تقسیم می‌شوند. در



شکل ۱. زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده‌ی لیگنوسلولزی.

تخصیص تکی هر مکان مورد نظر تنها می‌تواند به یک تسهیل هاب تخصیص یابد ولی در تخصیص چندگانه هر نقطه‌ی مورد نظر می‌تواند به بیشتر از یک هاب تخصیص یابد. در مدل مورد بررسی هاب‌ها از نوع تخصیص چندگانه هستند.

مفروضات مدل عبارت است از:

۱. ظرفیت تولید در پالایشگاه‌ها و همچنین ظرفیت ذخیره‌سازی در هاب جمع‌آوری محدود در نظر گرفته شده است.

۲. مراکز تقاضا (بیواتانول، لیگنین) به صورت نقاط ثابت و مشخصی هستند.

۳. میزان تقاضا (بیواتانول، لیگنین) در مراکز تقاضا به صورت غیرقطعی است.

۴. کمبود در مراکز تقاضای بیواتانول و لیگنین مجاز نیست.

۵. هزینه‌ی انتقال میان دو هاب شامل ضریب تخفیف است.

۶. امکان نگهداری موجودی در مراکز هاب انتقالی وجود ندارد.

۷. نرخ هدررفت زیست‌توده در هاب جمع‌آوری در نظرگرفته شده است.

۸. به دلیل شرایط آب و هوایی و تغییرپذیری میزان ضایعات کشاورزی در دوره‌های زمانی متفاوت، میزان خرید ضایعات در دوره‌های زمانی مختلف، متفاوت در نظرگرفته شده است.

۹. میزان موجودی هاب‌های جمع‌آوری در ابتدای دوره اول، صفر در نظرگرفته شده است.

۱۰. محصول جانبی لیگنین فقط در پالایشگاه‌های تولید بیواتانول، تولید می‌شود.

۱.۳. نمادهای مدل

- **مجموعه‌ها**

I: مراکز تأمین زیست‌توده؛
K: هاب‌های جمع‌آوری؛
M: هاب‌های انتقالی؛
J: پالایشگاه‌ها؛
L: محل تقاضای بیواتانول؛
L'': محل تقاضای لیگنین؛
B: نوع زیست‌توده برای تولید بیواتانول و لیگنین؛
P: محصول تولیدی (بیواتانول)؛
S: محصول جانبی تولیدی (لیگنین)؛
T: دوره زمانی (سال).

- **پارامترهای مدل**

c_{ik}: هزینه‌ی انتقال زیست‌توده از مرکز تأمین زیست‌توده i به هاب جمع‌آوری k (دلار/تن - کیلومتر)؛
c_{mj}: هزینه‌ی انتقال زیست‌توده از هاب میانی m به پالایشگاه j (دلار/تن ـ کیلومتر)؛
c_{jl}: هزینه‌ی انتقال بیواتانول از پالایشگاه j به محل تقاضای l (دلار /لیتر ـ کیلومتر)؛
$c_{jl''}$: هزینه‌ی انتقال لیگنین از پالایشگاه j به محل تقاضای l'' (دلار /تن ـ کیلومتر)؛
c_{km}: هزینه‌ی انتقال زیست‌توده از هاب جمع‌آوری k به هاب انتقالی m (دلار/تن ـ کیلومتر)؛
d_{ik}: فاصله‌ی مرکز تأمین زیست‌توده i از هاب جمع‌آوری k؛
d_{mj}: فاصله‌ی هاب انتقالی m از پالایشگاه j؛
d_{jl}: فاصله‌ی پالایشگاه j از محل تقاضای l؛
$d_{jl''}$: فاصله‌ی پالایشگاه j از محل تقاضای l''؛
d_{km}: فاصله‌ی هاب جمع‌آوری k از هاب انتقالی m؛
r_{ib}^{t}: هزینه‌ی خرید زیست‌توده‌ی b ازکشتزار i در دوره t (دلار/تن)؛
f_k: هزینه‌ی ساخت هاب جمع‌آوری k؛
f_m: هزینه‌ی ساخت هاب انتقالی m؛
h_k: هزینه‌ی نگهداری زیست‌توده در هاب kدر دوره زمانی t (دلار/تن)؛
u_k^t: هزینه‌ی هدر رفت زیست‌توده‌ی b در هاب k در دوره زمانی t (دلار/تن)؛
f_j: هزینه‌ی احداث پالایشگاه j؛
o_{Pj}^{t}: هزینه‌ی تولید محصول p در پالایشگاه j در دوره زمانی t (دلار/لیتر)؛
o_{sj}^{t}: هزینه‌ی تولید محصول جانبی s در پالایشگاه j در دوره زمانی t (دلار /تن)؛
g_{ib}^{t}: میزان خرید زیست‌توده b از مرکز تأمین i در دوره زمانی t؛
cap_{ib}: ظرفیت مراکز تأمین زیست‌توده؛
cap_k: ظرفیت هاب جمع‌آوری k؛
cap_{jp}: ظرفیت پالایشگاه j برای تولید محصول p؛
cap_{js}: ظرفیت پالایشگاه j برای تولید محصول جانبی s؛
de_{lp}^{t}: تقاضای محصول p در دوره زمانی t (غیرقطعی از نوع نرمال)؛
de_{ls}^{t}: تقاضای محصول جانبی s در دوره زمانی t (غیرقطعی از نوع نرمال)؛
pr_p^t: قیمت فروش محصول p در دوره زمانی t؛
pr_s^t: قیمت فروش محصول جانبی s در دوره زمانی t؛
Minp: کمینه‌ی میزان تولید محصول p در پالایشگاه j؛
Mins: کمینه‌ی میزان تولید محصول جانبی s در پالایشگاه j؛
M: یک عدد بزرگ؛
α_p: نرخ تبدیل زیست‌توده به محصول p (لیتر/تن)؛
α_s: نرخ تبدیل زیست‌توده به محصول جانبی s (تن/تن)؛
β: نرخ هدررفت زیست‌توده؛
γ: ضریب تخفیف انتقال میان ۲ هاب k و m؛
δ: ضریب هزینه در ۴ دوره زمانی t؛
λ_t: ضریب تغییرات خرید زیست‌توده در دوره زمانی t؛
U: کمینه‌ی احتمال برقراری محدودیت.

- **متغیرهای تصمیم**

y_{ik}^{t}: میزان زیست‌توده‌ی انتقالی ازکشتزار i به هاب جمع‌آوری k در دوره زمانی t؛
y_{mj}^{t}: میزان زیست‌توده‌ی انتقالی از هاب انتقالی m به پالایشگاه j در دوره زمانی t؛
y_{pjl}^{t}: میزان محصول تولیدی انتقالی p از پالایشگاه j به محل تقاضا l در دوره زمانی t؛
$y_{sjl''}^{t}$: میزان محصول جانبی انتقالی s از پالایشگاه j به محل تقاضا l در دوره زمانی t؛
y_{km}^{t}: میزان زیست‌توده‌ی انتقالی از هاب جمع‌آوری k به هاب انتقالی m در دوره زمانی t؛
A_k^t: میزان موجودی زیست‌توده در پایان دوره زمانی t در هاب k؛
e_{pj}^{t}: میزان تولید محصول p در پالایشگاه j در دوره زمانی t؛
e_{sj}^{t}: میزان تولید محصول جانبی s در پالایشگاه j در دوره زمانی t؛
v_k^t: میزان هدررفت زیست‌توده در هاب جمع‌آوری k.

- **متغیرهای تصمیم صفر و یک**

x_{it}: اگر مرکز تأمین زیست‌توده i در دوره t انتخاب شود: ۱؛
x_k: اگر هاب جمع‌آوری k تأسیس شود: ۱؛
x_m: اگر هاب انتقالی m تأسیس شود: ۱؛
x_j: اگر پالایشگاه j تأسیس شود: ۱.

۲.۳. مدل‌سازی مسئله

یک مدل زنجیره‌ی تأمین چندسطحی، چنددوره‌یی و تک‌هدفه (بیشینه سازی سود) در شرایط عدم قطعیت تقاضای بیواتانول و لیگنین ارائه شده است که در آن برخی

از محدودیت‌ها به روش برنامه‌ریزی احتمالی، به صورت احتمالی ارائه شده‌اند. در ادامه به تشریح تابع هدف و محدودیت‌های مدل پرداخته شده است.

- **تابع هدف**

$$\max z = (\sum_{l}\sum_{t}\sum_{p}\sum_{j} y^t_{pjl}.pr^t_p + \sum_{l''}\sum_{t}\sum_{p}\sum_{j} y^t_{sjl''}.pr^t_s) - \left(\begin{array}{l}\sum_{t}\sum_{i}\sum_{k} c_{ik}.d_{ik}.y^t_{ik} + \sum_{t}\sum_{j}\sum_{k} c_{kj}.d_{kj}.y^t_{kj} \\ +\sum_{t}\sum_{k}\sum_{m} \gamma.c_{km}.d_{km}.y^t_{km} + \sum_{t}\sum_{j}\sum_{l} c_{jl}.d_{jl}.y^t_{pjl} \\ +\sum_{t}\sum_{j}\sum_{l''} c_{jl''}.d_{jl''}.y^t_{sjl''} + \sum_{t}\sum_{b}\sum_{i} r^t_{ib}.g^t_{ib}\end{array}\right) + \left(\begin{array}{l}\delta.\sum_{k} f_k.x_k + \sum_{k}\sum_{t} h^t_k.A^t_k \\ +\sum_{k}\sum_{t} u^t_k.v^t_k + \delta.\sum_{m} f_m.x_m\end{array}\right) + \left(\begin{array}{l}\sum_{p}\sum_{j}\sum_{t} o^t_{pj}.e^t_{pj} + \sum_{s}\sum_{j}\sum_{t} o^t_{sj}.e^t_{sj} \\ +\delta.\sum_{j} f_j.x_j\end{array}\right) \quad (1)$$

- **محدودیت‌های مدل**

$$g^t_{ib} \le cap_{ib}.\lambda_t.x_{it} \quad \forall i,b,t \quad (2)$$

$$\sum_k y^t_{ik} = \sum_b {g_{bi}}^t \quad \forall i,t \quad (3)$$

$$\sum_i y^t_{ik} + A^{t-1}_k.(1-\beta) \le cap_k.x_k \quad \forall k,t \quad (4)$$

$$\sum_i y^t_{ik} + A^{t-1}_k.(1-\beta) = A^t_k + \sum_m y^t_{km} \quad \forall k,t \quad (5)$$

$$\sum_k y^t_{km} = \sum_j y^t_{mj} \quad \forall m,t \quad (6)$$

$$A^t_k \le cap_k.x_k \quad \forall k,t \quad (7)$$

$$A^t_k.\beta = v^t_k \quad \forall k,t \quad (8)$$

$$minp.x_j \le e^t_{pj} \le cap_{jp}.x_j \quad \forall p,j,t \quad (9)$$

$$mins.x_j \le e^t_{sj} \le cap_{js}.x_j \quad \forall s,j,t \quad (10)$$

$$\sum_l\sum_p y^t_{pjl} \le \sum_p e^t_{pj} \quad \forall j,t \quad (11)$$

$$\sum_l\sum_s y^t_{sjl''} \le \sum_s e^t_{sj} \quad \forall j,t \quad (12)$$

$$\sum_m y^t_{mj.}(\alpha_p) \ge e^t_{jp} \quad \forall j,t,p \quad (13)$$

$$(e^t_{jp.}(\alpha_s))/(\alpha_p) \ge e^t_{js} \quad \forall j,t,s \quad (14)$$

$$p\left(\sum_j e^t_{pj} \ge \sum_l de^t_{pl}\right) \ge \upsilon \quad \forall p,t \quad (15)$$

$$p\left(\sum_j e^t_{sj} \ge \sum_{l''} de^t_{sl}{}''\right) \ge \upsilon \quad \forall s,t \quad (16)$$

$$p\left(\sum_j y^t_{pjl} \ge de^t_{pl}\right) \ge \upsilon \quad \forall p,l,t \quad (17)$$

$$P\left(\sum_j y^t_{sjl}{}'' \ge de^t_{sl}{}''\right) \ge \upsilon \quad \forall s,l,t \quad (18)$$

$$y^t_{mj} \le M.x_m \quad \forall m,j \quad (19)$$

$$x^t_i, x_j, x_k, x_m \in \{0,1\} \quad (20)$$

رابطه‌ی ۱ تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که در آن بیشینه‌سازی سود به عنوان هدف در نظرگرفته شده است. بخش درآمدها شامل میزان درآمد حاصل از فروش محصول بیواتانول و محصول جانبی لیگنین است. در بخش هزینه‌ها، هزینه‌های حمل‌ونقل میان مراکز تأمین زیست‌توده و هاب جمع‌آوری، هاب جمع‌آوری و هاب انتقالی، هاب انتقالی و پالایشگاه و همچنین پالایشگاه و نقاط تقاضا را محاسبه می‌کند. باید در نظر گرفت که انتقال میان دو هاب دارای ضریب تخفیف است. در ادامه هزینه‌ی خرید ضایعات کشاورزی به عنوان زیست‌توده آورده شده است. هزینه‌های مربوط به هاب‌ها شامل هزینه‌ی احداث هاب‌ها، هزینه‌ی نگهداری و هزینه‌های زیست‌توده هدر رفته در هاب جمع‌آوری است. در انتها هزینه‌های پالایشگاه شامل هزینه‌ی احداث و هزینه‌های تولید بیواتانول و لیگنین درنظر گرفته شده است.

رابطه‌ی ۲ بیان می‌کند میزان خرید زیست‌توده b در دوره t از مرکز تأمین زیست‌توده i می‌تواند بیشینه به میزان ظرفیت آن مرکز تأمین باشد.

رابطه‌ی ۳ تضمین می‌کند که میزان زیست‌توده خریداری شده از مرکز تأمین زیست‌توده i به هاب‌های جمع‌آوری k انتقال داده می‌شود.

رابطه‌ی ۴ نشان می‌دهد که میزان جریان انتقالی از همه مراکز تأمین زیست‌توده به هاب جمع‌آوری k نمی‌تواند از میزان ظرفیت باقی‌مانده‌ی آن هاب بیشتر باشد.

رابطه‌ی ۵ معادله تعادل در هاب جمع‌آوری k را نشان می‌دهد. که هاب k به مراکز تأمین زیست‌توده و هاب‌های انتقالی (m) تخصیص می‌یابد.

رابطه‌ی ۶ معادله‌ی تعادل جریان در هاب انتقالی m را نشان می‌دهند که به پالایشگاه‌ها و هاب‌های جمع‌آوری k تخصیص می‌یابد.

رابطه‌ی ۷ بیان می‌کند که میزان موجودی هاب جمع‌آوری در هر دوره می‌تواند بیشینه به اندازه ظرفیت آن هاب باشد.

رابطه‌ی ۸ میزان هدررفت زیست‌توده در هاب جمع‌آوری k را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب بیان می‌کنند که میزان تولید بیواتانول و لیگنین باید از یک مقدار کمینه بیشتر و از میزان ظرفیت تولید پالایشگاه j کمتر باشد.

روابط ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نشان می‌دهند که میزان انتقال بیواتانول و لیگنین به مراکز تقاضایشان نمی‌تواند از میزان تولید آنها در پالایشگاه‌ها بیشتر باشد.

رابطه‌ی ۱۳ معادله‌ی تعادل تولید بیواتانول در پالایشگاه j است.

رابطه‌ی ۱۴ بیان می‌کند که اگر بیواتانول در پالایشگاه j تولید شود، آن‌گاه لیگنین نیز می‌تواند در آن پالایشگاه تولید شود.

رابطه‌ی ۱۵ با توجه به احتمالی بودن میزان تقاضا، بیان می‌کند احتمال این که میزان کل تولید بیواتانول از مجموع تقاضای آن بیشتر باشد از میزان υ بیشتر است.

رابطه‌ی ۱۶ بیان می‌کند احتمال این که میزان کل تولید لیگنین از مجموع تقاضای آن بیشتر باشد، از میزان υ بیشتر است.

روابط ۱۷ و ۱۸ به ترتیب مربوط به ارضای تقاضای بیواتانول و لیگنین هستند. از آن‌جا که تقاضای محصولات به صورت احتمالی است، از محدودیت احتمالی استفاده شده است و این روابط بیان می‌کنند که احتمال ارضای تقاضای بیواتانول و لیگنین از میزان υ بیشتر است.

رابطه‌ی ۱۹ ایجاد جریان در هاب انتقالی m را به شرط انتخاب هاب m تضمین می‌کند. رابطه‌ی ۲۰ مربوط به متغیرهای تصمیم صفر و ۱ است.

در رابطه با محدودیت‌های احتمالی مطرح شده، باید گفت محدودیت احتمالی تضمین می‌کند تا محدودیت، در یک سطح اطمینان از پیش تعیین شده، برآورده شود و این سطح اطمینان توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. این روش را چارنز و کوپر[۲] برای تبدیل محدودیت قطعی به محدودیت احتمالی ارائه داده‌اند.[۱۸]

۴. مثال عددی

این مثال فرض شده است که ۱۰ مکان جهت خرید زیست‌توده از مراکز تأمین، ۴ مکان هاب و ۵ مکان بالقوه پالایشگاه وجود دارد که هرکدام از این مکان‌ها، در استان‌های کشور ایران در نظر گرفته شده‌اند. مدل ریاضی ارائه شده از دو نوع زیست‌توده (کاه گندم و کاه جو) برای تولید یک نوع محصول (بیواتانول) و یک نوع محصول جانبی (لیگنین) استفاده کرده است. تعداد مراکز تأمین زیست‌توده، مراکز هاب و پالایشگاه‌های مورد نیاز و همچنین مکان‌یابی آنها توسط مدل ارائه شده در ۴ دوره زمانی مشخص می‌شود. جداول زیر پارامترهای ورودی مربوط به مدل ریاضی هستند. جدول ۲ میزان خرید زیست‌توده از هر مرکز تأمین زیست‌توده را نشان می‌دهد که این اطلاعات بر اساس مرکز آمار ملی ایران جمع‌آوری شده‌اند. همچنین باید بیان کرد که پارامترهای مربوط به فواصل میان سطوح زنجیره‌ی تأمین که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد از طریق نقشه‌ی گوگل به دست آمده‌اند.

جداول ۳ تا ۵ پارامترهای ورودی مربوط به هاب‌ها شامل ظرفیت و هزینه‌ی ساخت هاب‌ها را نشان می‌دهد.

جداول ۶ و ۷ پارامترهای ورودی پالایشگاه‌ها شامل هزینه‌ی ساخت و ظرفیت تولید بیواتانول و لیگنین آورده شده است.

جداول ۸ تا ۱۲ فواصل سطوح زنجیره‌ی تأمین را نشان می‌دهند.

در جدول ۱۳ سایر پارامترهای مدل آورده شده است. در جدول ۱۴ پارامتر غیرقطعی و توزیع آماری نرمال ارائه شده است.

۵. نتایج محاسباتی

در این بخش به بیان نتایج حاصل از حل مدل ریاضی پیشنهادی می‌پردازیم. در این نوشتار مدل ریاضی تک‌هدفه (با هدف بیشینه‌سازی سود) ارائه شده، در نرم‌افزار گمز (۲۴.۹.۱) که نرم‌افزار بهینه‌سازی مناسبی برای حل مدل‌های ریاضی است، حل شده است. همه‌ی محاسبات بر روی یک رایانه‌ی شخصی (دارای سیستم عامل ۶۴ بیتی و حافظه داخلی ۱۲ گیگابایت) انجام شده است. جهت حل محدودیت‌های احتمالی در نرم‌افزار گمز، با توجه به احتمالی بودن میزان تقاضا با توزیع نرمال، محدودیت‌های احتمالی مذکور ابتدا به فرم خطی درآمده و در نرم‌افزار گمز وارد شده است.

پس از حل مدل میزان سود کل زنجیره‌ی تأمین ۶۸۸/۰۰۰/۰۰۰ دلار است، که نشان می‌دهد مدل ریاضی پیشنهادی برای چهار دوره زمانی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر بوده است. مدل در هر دوره زمانی انتخاب می‌کند که از کدام مراکز تأمین زیست‌توده، زیست‌توده مورد نیاز را خریداری کند. همچنین هر ۲ هاب جمع‌آوری و ۱ هاب انتقالی (تهران) را فعال کرده و تقاضای محصولات را توسط ایجاد ۴ پالایشگاه (یزد، سمنان، اصفهان، خراسان رضوی) پاسخ می‌دهد.

در نمودار شکل ۲ سهم بیشترین هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین بیواتانول مشاهده

شکل ۲. سهم بیشترین هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین.

جدول ۲. میزان خرید زیست‌توده از مراکز تأمین (تن).

مراکز تأمین/ زیست‌توده	کاه گندم	کاه جو
مازندران	۸۱۲۰۰	۱۴۳۰۰
گلستان	۵۷۵۴۲۰	۷۲۲۱۸
لرستان	۳۳۱۶۴۷	۱۱۰۷۴۹
همدان	۴۸۲۱۰۰	۲۲۷۱۴۳
کرمانشاه	۴۵۱۳۰۰	۱۰۶۷۴۰
آذربایجان شرقی	۵۰۰۰۰۰	۱۰۲۶۵۵
آذربایجان غربی	۴۸۰۳۰۰	۴۲۰۰۰
تهران	۱۲۸۶۵۰	۵۴۰۰۰
خوزستان	۹۳۷۶۰۰	۶۹۰۰۰
مرکزی	۲۴۳۰۰۰	۷۱۳۰۰

جدول ۳. ظرفیت هاب جمع‌آوری (تن).

هاب	قم	البرز
ظرفیت	۲/۴	۲/۴

*۱۰^۷

جدول ۴. هزینه‌ی ساخت هاب‌های جمع‌آوری (دلار).

هاب جمع‌آوری	قم	البرز
هزینه‌ی ساخت	۹	۹/۳

*۱۰^۶

جدول ۵. هزینه‌ی ساخت هاب‌های انتقالی (دلار).

هاب جمع‌آوری	سمنان	تهران
هزینه‌ی ساخت	۷/۲	۷

*۱۰^۶

جدول ۶. ظرفیت تولید بیواتانول و لیگنین در پالایشگاه‌ها.

پالایشگاه/ تولیدات نهایی	بیواتانول (لیتر) *۱۰^۸	لیگنین (تن) *۱۰^۴
یزد	۵/۶	۱/۳
خراسان شمالی	۶/۶	۱/۵
سمنان	۷/۵	۱/۲۵
اصفهان	۶/۲	۱/۲۵
خراسان رضوی	۷/۵	۱/۵

جدول ۷. هزینه‌ی ساخت پالایشگاه (دلار).

پالایشگاه	یزد	خراسان شمالی	سمنان	اصفهان	خراسان رضوی
هزینه‌ی ساخت	۹	۹/۱	۹/۲	۹	۹/۳

*۱۰^۷

جدول ۸. فاصله‌ی کشتزار تا هاب جمع‌آوری (کیلومتر).

مرکز تأمین/هاب جمع‌آوری	قم	البرز
مازندران	۵۷۰	۴۰۰
گلستان	۶۵۰	۵۳۰
لرستان	۲۸۰	۳۸۰
همدان	۲۷۵	۲۱۰
کرمانشاه	۳۵۰	۴۶۰
آذربایجان شرقی	۸۹۰	۶۹۰
آذربایجان غربی	۷۶۰	۵۶۰
تهران	۱۶۷	۴۱
خوزستان	۶۶۰	۷۶۰
مرکزی	۱۵۰	۲۶۰

جدول ۹. فاصله‌ی هاب انتقالی تا پالایشگاه (کیلومتر).

هاب انتقالی/پالایشگاه	یزد	خراسان شمالی	سمنان	اصفهان	خراسان رضوی
سمنان	۸۲۰	۸۰۰	۰	۷۲۰	۹۰۰
تهران	۵۹۸	۱۰۴۰	۲۳۰	۴۹۵	۹۵۰

جدول ۱۰ فاصله‌ی پالایشگاه تا مراکز تقاضای بیواتانول (کیلومتر).

مرکز تقاضا/پالایشگاه	یزد	خراسان شمالی	سمنان	اصفهان	خراسان رضوی
تهران	۶۰۰	۱۶۰۰	۹۵۰	۷۵۰	۴۰۰
مشهد	۱۰۰۰	۴۰۰	۱۴۰۰	۱۲۰۰	۱۸۰۰
مازندران	۲۲۰	۹۰۰	۳۴۰	۴۰۰	۱۲۰۰
قم	۴۸۰	۱۴۰۰	۸۰۰	۳۲۰	۴۵۰
کرمان	۱۰۰۰	۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۴۰۰

جدول ۱۱. فاصله‌ی میان دو هاب (کیلومتر).

هاب	قم	البرز
سمنان	۴۰۰	۱۶۷
تهران	۴۶۰	۴۱

جدول ۱۲. فاصله‌ی پالایشگاه تا مراکز تقاضای لیگنین (کیلومتر).

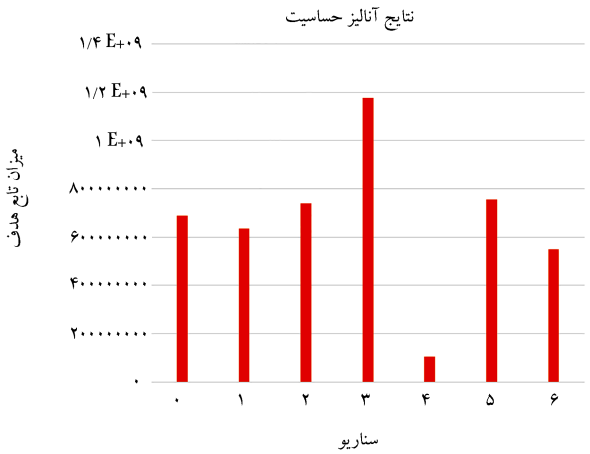
پالایشگاه/مرکز تقاضا	مرکزی	تهران	اصفهان
یزد	۶۱۲	۶۲۱	۳۱۱
خراسان شمالی	۹۰۹	۷۲۵	۱۰۰۰
سمنان	۴۰۰	۲۲۰	۵۶۰
اصفهان	۳۲۳	۴۳۰	۰
خراسان رضوی	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۱۴۰۰

جدول ۱۳. سایر پارامترهای مدل.

نرخ هدررفت زیست‌توده در هاب جمع‌آوری	۰/۰۰۱
ضریب تخفیف انتقال میان دو هاب	۰/۲
حداقل احتمال برقراری محدودیت	۰/۸
هزینه‌ی خرید زیست‌توده کاه گندم (دلار/تن)	۴۵
هزینه‌ی خرید زیست‌توده کاه جو (دلار/تن)	۳۵
قیمت فروش بیواتانول (دلار/لیتر)	۰/۶
قیمت فروش بیواتانول (دلار/تن)	۱۳۴

جدول ۱۴ پارامتر غیرقطعی و توزیع مربوطه.

پارامتر	توزیع آماری
تقاضای بیواتانول (میلیون لیتر)	$N \sim (۷۵۰, ۱۰۰)$
تقاضای لیگنین (هزار تن)	$N \sim (۱۳۰, ۱)$



شکل ۳. نتایج آنالیز حساسیت.

می‌شود. پس از حل مدل مشخص شد بیشترین سهم در هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین بیواتانول در مدل پیشنهادی مربوط به هزینه‌ی کل تولید بیواتانول بوده است. دومین هزینه‌یی که بیشترین سهم در زنجیره‌ی تأمین بیواتانول را دارد، هزینه‌ی کل خرید زیست‌توده و سومین هزینه مربوط به هزینه‌ی کل حمل‌ونقل بوده است. در بسیاری از مطالعات صورت گرفته سهم هزینه‌ی حمل‌ونقل بیشترین مقدار بوده است که در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از حمل‌ونقل چندوجهی و به عبارتی دیگر استفاده همزمان از حمل‌ونقل ریلی و جاده‌یی کاهش قابل‌توجهی در این هزینه ایجاد شود.

۶. آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت به دنبال تأثیر مقادیر مختلف پارامترهای ورودی بر میزان تابع هدف است. در زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده پارامترهای متعددی ازجمله هزینه‌ی حمل‌ونقل، هزینه‌ی ساخت پالایشگاه، هزینه‌ی تولید، قیمت فروش و ... بر میزان سودآوری زنجیره اثرگذارند. این بخش به دنبال بررسی میزان تغییرات تابع هدف به ازای تغییر برخی از پارامترهاست. پارامترهای مورد بررسی شامل هزینه‌ی حمل‌ونقل، قیمت فروش بیواتانول و لیگنین و میزان تقاضاست. برای بررسی اثر پارامترهای ذکر شده بر سودآوری کل زنجیره‌ی تأمین هر یک از پارامترها به طور مستقل و به میزان ۲۰٪ تغییر داده می‌شود. در سناریوی ۱ و ۲ هزینه‌ی حمل‌ونقل به ازای هر کیلومتر به میزان ۲۰٪ به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. سناریو ۴ و ۵ مربوط به قیمت فروش محصول و محصول جانبی بوده که در آن به ترتیب ۲۰٪ افزایش و کاهش داشته‌ایم. سناریو ۵ و ۶ تأثیر افزایش و کاهش ۲۰٪ تقاضای بیواتانول و لیگنین را بر میزان تابع هدف مورد بررسی قرار می‌دهد.

در شکل ۳ میزان تغییرات تابع هدف به ازای مقادیر مختلف پارامترهای ورودی نشان داده شده است که محور افقی سناریوهای موجود و محور عمودی نشان‌دهنده میزان تابع هدف است. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده مشاهده می‌شود که افزایش قیمت فروش بیواتانول و لیگنین به میزان ۲۰٪ تأثیر چشمگیری بر میزان سود کل زنجیره‌ی تأمین داشته، به گونه‌یی که این پارامتر بیشترین تأثیر را بر میزان تابع هدف به طور مثبت گذاشته است. همچنین افزایش ۲۰٪ تقاضای محصول و محصول جانبی و به دنبال آن افزایش میزان تولید، سبب افزایش میزان سود کل زنجیره‌ی تأمین به میزان ۹٪ شده است. کاهش هزینه‌ی حمل‌ونقل نیز ۷٪ به بهبود تابع هدف کمک کرده است. با آنالیز حساسیت صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که قیمت فروش بیواتانول و لیگنین پارامتر مهمی در میزان سودآوری زنجیره‌ی تأمین زیست‌توده محسوب می‌شود به طوری که با افزایش ۲۰٪ قیمت فروش، تابع هدف به میزان ۷۰٪ بهبود می‌یابد.

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل تک‌هدفه خطی در شرایط عدم قطعیت جهت تولید بیواتانول و لیگنین ارائه شده است که در آن انتخاب مراکز تأمین زیست‌توده، مکان‌یابی هاب‌ها و پالایشگاه‌های شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین نیز بررسی می‌شود. مدل شامل مراکز تأمین زیست‌توده، هاب‌های جمع‌آوری و انتقالی، پالایشگاه‌ها، همچنین مراکز تقاضای بیواتانول و لیگنین است. تقاضای بیواتانول و لیگنین به صورت احتمالی در نظرگرفته شده و مدل ریاضی تحت برنامه‌ریزی احتمالی ارائه شده است. محدودیت‌های ارائه شده در مدل ریاضی شامل محدودیت‌های ظرفیت تولید و نگهداری زیست‌توده در هاب جمع‌آوری، ارضای تقاضای بیواتانول و لیگنین در محل تقاضا و محدودیت‌های جریان میان سطوح زنجیره‌ی تأمین است. برای نمایش عملکرد مدل، به حل یک مثال عددی و آنالیز حساسیت پرداخته شده است. بررسی‌ها نشان داد که فروش محصول جانبی (لیگنین) به عنوان منبعی برای کسب درآمد مازاد، کارایی دارد و مدل پیشنهادی را می‌توان با در نظرگرفتن انبارهای میانی به عنوان هاب به منظور تسهیل انتقال زیست‌توده، به کار برد. استفاده از حمل‌ونقل چندوجهی سبب کاهش سهم هزینه‌ی حمل‌ونقل در هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین شده است. بر اساس تحلیل حساسیت صورت گرفته در مورد پارامترهای قیمت فروش بیواتانول و لیگنین، هزینه‌ی حمل‌ونقل، میزان تقاضا مشاهده شد که پارامتر قیمت فروش تأثیر زیادی بر میزان تابع هدف گذاشته به طوری که با افزایش ۲۰٪ قیمت فروش بیواتانول و لیگنین، تابع هدف به میزان ۷۰٪ بهبود می‌یابد.

برای توسعه مدل می‌توان موارد زیر را در نظر گرفت:

۱. در نظرگرفتن اثرات زیست‌محیطی به عنوان تابع هدف دوم مسئله؛

۲. استفاده از روش‌های حل غیردقیق؛

۳. در نظر گرفتن سایر پارامترها مانند قیمت فروش بیواتانول، یا نرخ هدررفت زیست‌توده در انبار به عنوان پارامترهای غیرقطعی.

پانوشت‌ها

1. bioethanol
2. Charness,cooper

منابع (References)

1. Ghaderi, H., Pishvaee, M.S. and Moini, A. "Biomass supply chain network design: an optimization-oriented review and analysis". *Industrial crops and products*, **94**,

pp. 972-1000 (2016).

2. Dua, A. and Sinha, D. "Quality of multimodal freight transportation: a systematic literature review". *World Review of Intermodal Transportation Research*, **8**(2), pp. 167-194 (2019).
3. d'Amore, F. and Bezzo, F. "Strategic optimisation of biomass-based energy supply chains for sustainable mobility". *Computers & Chemical Engineering*, **87**, pp. 68-81 (2016).
4. Ascenso, L. and et al. "Assessing multiple biomass-feedstock in the optimization of power and fuel supply chains for sustainable mobility". *Chemical Engineering Research and Design*, **131**, pp. 127-143 (2018).
5. Esmaeili, S.A.H. and et al. "Sustainable biomass supply chain network design with biomass switching incentives for first-generation bioethanol producers". *Energy policy*, **138**, pp. 111222 (2020).
6. Mansuy, N. and et al. "Sustainable biomass supply chains from salvage logging of fire-killed stands: a case study for wood pellet production in eastern Canada". *Applied Energy*, **154**, pp. 62-73(2015).
7. Iakovou, E. and et al. "Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis". *Waste management*, **30**(10), pp. 1860-1870 (2010).
8. Marvin, W.A. and et al. "Optimizing the lignocellulosic biomass-to-ethanol supply chain: a case study for the midwestern United States", *In Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier. pp. 1728-1732 (2011).
9. Kurian, J.K. and et al. "Feedstocks, logistics and pretreatment processes for sustainable lignocellulosic biorefineries: A comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **25**, pp. 205-219 (2013).
10. Marvin, W.A. and et al. "Economic optimization of a lignocellulosic biomass-to-ethanol supply chain". *Chemical Engineering Science*, **67**(1), pp. 68-79 (2012).
11. Durmaz, Y.G. and Bilgen, B. "Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design". *Applied Energy*, **272**, pp. 115259 (2020).
12. Perrin, A. and et al. "Integrated design and sustainable assessment of innovative biomass supply chains: A case-study on miscanthus in France". *Applied Energy*, **204**, pp. 66-77 (2017).
13. Zahraee, S.M. and et al. "An investigation of the environmental sustainability of palm biomass supply chains via dynamic simulation modeling: A case of Malaysia". *Journal of Cleaner Production*, **237**, pp. 117740 (2019).
14. Osmani, A. and Zhang, J. "Economic and environmental optimization of a large scale sustainable dual feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain in a stochastic environment". *Applied energy*, **114**, pp. 572-587 (2014).
15. Ahmed, W. and Sarkar B. "Impact of carbon emissions in a sustainable supply chain management for a second generation biofuel". *Journal of cleaner production*, **186**, pp. 807-820 (2018).
16. Osmani, A. and Zhang, J. "Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties". *Energy*, **59**, pp. 157-172 (2013).
17. Farahani, R.Z. and et al. "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications". *Computers & Industrial Engineering*, **64**(4), pp. 1096-1109 (2013).
18. Seifbarghy, M. and Naseri, F. "Modeling multi-objective, multi-Product and multi-period supplier selection problem considering stochastic demand". *Journal of Production and Operations Management*, **9**(1), pp. 205-223 (2018).