

طراحی یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین نسل دوم سوخت سبز مبتنی بر سیاست‌های انتشار کربن در شرایط عدم قطعیت

ناعمه زرین پور* (استادیار)

آیدا خانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شیراز

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۴۰۰
دوری ۱-۳۷، شماره ۲، ص. ۳۸-۳۳ (پژوهشی)

گرمایش جهانی و اثرات مخرب زیست محیطی سوخت‌های فسیلی، موجب تمرکز بر تولید منابع انرژی پایدار برای آینده شده است. یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و پایدار، سوخت سبز است. در این مقاله، یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره‌ی تأمین پایدار چندسطحی با هدف بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش سوخت سبز ارائه می‌شود. به منظور بررسی تأثیرات زیست محیطی، چهار سیاست مختلف کربن شامل بیشترین میزان مجاز انتشار کربن، مالیات کربن، طرح ترکیبی تجارت کربن و بیشترین مقدار مجاز و طرح جبران کربن بررسی می‌شود. با توجه به غیرقطعی بودن بسیاری از پارامترهای مدل در دنیای واقعی، عدم قطعیت پارامترها نیز بررسی و برای برخورد با آن از رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس استفاده می‌شود. نتایج عددی کارایی مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که مدل زنجیره‌ی تأمین ارائه شده، می‌تواند در آینده برای تولید و توسعه‌ی نسل دوم سوخت سبز از پسماندهای کشاورزی به کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین، نسل دوم سوخت سبز، پسماندهای کشاورزی، سیاست‌های انتشار کربن، برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس.

zarrinpoor@sutech.ac.ir
a.khani@sutech.ac.ir

۱. مقدمه

در حال حاضر، سوخت‌های فسیلی بخش عظیمی از نیاز انرژی جهان را تأمین می‌کنند که همین امر موجب انتشار گازهای گلخانه‌یی، تغییرات آب و هوایی و تأثیرات منفی بر زندگی بشر شده است.^[۱] برآوردها نشان می‌دهد که با استمرار استفاده از سوخت‌های فسیلی، جهان با کمبود شدید نفت و گاز در ۴۰ تا ۶۰ سال آینده مواجه می‌شود.^[۲] مهم‌ترین نگرانی زیست محیطی در رابطه با سوخت‌های فسیلی، انتشار مقادیر زیاد دی‌اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌یی در اتمسفر است.^[۳] بنابراین برقراری توازن بین سیاست‌های زیست محیطی و اقتصادی بدون تشدید کردن تغییرات آب و هوایی چالشی بزرگ در سطح جهانی است.^[۴] از طرفی تحقیقات نشان می‌دهد که زنجیره‌ی تأمین اصلی‌ترین منبع انتشار دی‌اکسید کربن است که منجر به گرمایش جهانی می‌شود. بنابراین سازمان‌ها تلاش می‌کنند تا با ایجاد تغییراتی در فعالیت‌های زنجیره‌ی تأمین خود دی‌اکسید کربن کم‌تری تولید کنند و سرعت گرمایش جهانی را کاهش دهند.^[۵] استراتژی‌های قابل اعتماد برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن شامل بهبود بهره‌وری انرژی، استفاده از سوخت‌هایی با انتشار دی‌اکسید کربن کم‌تر و افزایش استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر است. کارشناسان اعتقاد دارند که

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۰/۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۶/۱۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۱.

DOI:10.24200/J65.2020.54886.2076

شود که آسیب‌های زیست‌محیطی مانند جنگل‌زدایی و از دست رفتن تنوع زیستی را به دنبال دارد.^[۱۲] نسل دوم سوخت سبز از زیست‌توده‌ی لیگنوسلولوزیک مثل پسماندهای کشاورزی و جنگلی، محصولات جنگلی کوتاه‌مدت و گیاهان چندساله تولید می‌شود.^[۱۳] همچنین این نوع سوخت، دی‌اکسید کربن کم‌تری نسبت به نسل اول سوخت سبز منتشر می‌کند و زمانی که از پسماندهای کشاورزی برای تولید آن‌ها استفاده می‌شود، تغییر کاربری زمین رخ نمی‌دهد.^[۱۴، ۱۵] بنابراین پسماندهای کشاورزی، مهم‌ترین منبع غیرخوراکی پایدار، پاک و اقتصادی برای تولید سوخت سبز است که علاوه بر این که پتانسیل بسیار بالایی در تولید سوخت سبز دارد، در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌یی نیز مؤثر است. پسماندهای کشاورزی به وفور در طبیعت یافت می‌شوند و همین منجر به کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌شود.^[۱۶، ۱۷] امروزه با توجه به نیاز جهان به استفاده از سوخت سبز و اهمیت کاهش انتشار دی‌اکسید کربن نیاز است تا قوانین و مقرراتی وضع شود تا این صنعت بتواند توسعه و بهبود یابد. از این رو سیاست‌های مختلف کربن برای حمایت از توسعه‌ی صنعت سوخت سبز با هدف کاهش سرعت گرمایش جهانی و انتشار دی‌اکسید کربن معرفی شد. این سیاست‌ها شامل بیشترین میزان مجاز انتشار کربن، مالیات کربن، طرح ترکیبی تجارت کربن و بیشترین مقدار مجاز و طرح جبران کربن است.^[۱۸] شایان ذکر است که به کارگیری این سیاست‌ها تأثیر قابل توجهی بر کارایی زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز دارد.

با افزایش تقاضا برای سوخت سبز، تقاضا برای محصولات و پسماندهای کشاورزی نیز افزایش یافت. گزارش‌ها نشان می‌دهد که میزان ذرت مورد استفاده برای تولید اتانول از ۶/۳ میلیارد بوشل^۱ در سال ۲۰۰۰ به ۵/۲۸ میلیارد بوشل در سال ۲۰۱۶ افزایش یافته است.^[۱۹] برای برآوردن این تقاضای بزرگ، مناطق زراعی مجبور به استفاده‌ی فراوان از کودهای مختلف شدند که این امر منجر به افزایش رواناب مواد مغذی به درون آب‌های بزرگ و به خطر انداختن زندگی آبزیان می‌شد. بنابراین، طراحی زنجیره‌ی تأمین پایدار برای تهیه‌ی پسماندهای کشاورزی از مناطق زراعی به پالایشگاه‌های زیستی بسیار ضروری قلمداد شد. با وجود مزایای بالقوه‌ی نسل دوم سوخت سبز، سرمایه‌گذاران جدید به دلایل اقتصادی تمایل به تولید این نوع سوخت ندارند، زیرا تولید آن بسیار گران‌تر از تولید نسل اول سوخت سبز و سوخت‌های فسیلی است.^[۲۰] حال با فرض این که زیرساخت کافی برای تولید نسل دوم سوخت سبز وجود داشته باشد، می‌توان با تمرکز بر تولید آن میزان انتشار کربن را به شدت کاهش داد. با در نظر گرفتن اهمیت طراحی و تجزیه و تحلیل زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با هدف بهینه‌سازی سود شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین تولید سوخت سبز از پسماندهای کشاورزی در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌شود. برای برخورد با عدم قطعیت پارامترهای مدل از رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس استفاده می‌شود. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی، چهار سیاست انتشار کربن شامل بهینه‌سازی میزان مجاز انتشار کربن، مالیات کربن، طرح ترکیبی تجارت کربن و بهینه‌سازی مقدار مجاز و طرح جبران کربن در نظر گرفته خواهد شد.

در ادامه‌ی این نوشتار، در بخش دوم پیشینه‌ی پژوهش بررسی و در بخش سوم مدل ریاضی پیشنهادی زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز ارائه می‌شود. در بخش چهارم مدل ریاضی با در نظر گرفتن سیاست‌های انتشار کربن توسعه می‌یابد و در بخش پنجم رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس برای ارائه‌ی معادل قطعی مدل‌های غیرقطعی بررسی می‌شود. در بخش ششم نتایج عددی و در نهایت در بخش هفتم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی تشریح می‌شود.

۲. پیشینه‌ی پژوهش

تاکنون تحقیقات مختلفی در خصوص طراحی زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز صورت گرفته است که در این بخش بررسی می‌شود. مطالعات هوگو و پیستوکوپولوس در سال ۲۰۰۵^[۲۱]، از اولین مطالعاتی بود که در آن بهینه‌سازی چندگانه‌ی زنجیره‌ی تأمین انجام شد. گابلین - گسالبز و گراسمن در سال ۲۰۰۹^[۲۲] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی تصادفی با در نظر گرفتن عدم قطعیت، طراحی کردند. یو و وانگ در سال ۲۰۱۱^[۲۳] مدلی برای طراحی زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز با ترکیب هزینه‌ی سالانه‌ی تولید و انتشار گازهای گلخانه‌یی ارائه کردند و سپس همان مدل را با تمرکز بر پایداری اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی توسعه دادند. نیکولوپولو و لرابرتو در سال ۲۰۱۲^[۲۴] مجموعه‌ی مقالاتی در راستای زنجیره‌ی تأمین پایدار برای سوخت سبز با تمرکز بر بهره‌وری انرژی، مدیریت پسماند و مدیریت آب را مرور کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش آگاهی از تأثیرات زیست‌محیطی، محققان بعد از زیست‌محیطی را برای طراحی زنجیره‌ی تأمین به کار گرفتند، بنابراین مسائل بهینه‌سازی چندهدفی ایجاد شد. دی مایر و همکاران در سال ۲۰۱۴^[۲۵] به بررسی ساختار زنجیره‌ی تأمین با تمرکز ویژه بر مدیریت زنجیره‌ی تأمین پسماند کشاورزی پرداختند. در همان سال آزاده و همکاران^[۲۶] یک مدل تصادفی پویا برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز تهیه کردند که شامل چندین منبع تأمین پسماند کشاورزی، پالایشگاه زیستی و مرکز تقاضا با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و عرضه است. اسکندرپور و همکاران در سال ۲۰۱۵^[۲۷] یک بررسی مختصر از تمامی مقالات موجود در این حوزه ارائه دادند و آن را در گروه‌های مختلف لیست کردند، که از میان آن‌ها، ۸۴ مقاله به ابعاد زیست‌محیطی در تولید سوخت سبز توجه کرده بود؛ اکثر قریب به اتفاق این مقالات با زنجیره‌ی تأمین سوخت مایع سروکار داشتند. در سال ۲۰۱۶ رن و همکاران^[۲۸] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح دوهدفه در طراحی زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز برای بهینه‌سازی میزان مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن تحت عدم قطعیت ارائه کردند. هومبج و همکاران^[۲۹] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی برای طراحی بهینه‌ی زنجیره‌ی تأمین نسل دوم سوخت سبز با توجه به تمام ابزارهای سیاست‌گذاری مقررات سوخت سبز اروپا ارائه دادند. احمد و سرکر در سال ۲۰۱۸^[۳۰] یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن میزان پسماندهای کشاورزی در مناطق مختلف زراعی، میزان حمل و نقل پسماندهای کشاورزی از مناطق زراعی به پالایشگاه‌های زیستی و میزان تولید سوخت سبز چندین پالایشگاه زیستی و تقاضای مراکز بازار را مورد بررسی قرار دادند. اسدی و همکاران در سال ۲۰۱۸^[۳۱] یک مدل دوهدفه برای طراحی شبکه‌ی تولید و توزیع سوخت سبز از جلبک ارائه کردند. در مدل آن‌ها تسهیلات تولید سوخت سبز از جلبک، مراکز توزیع، مراکز استخراج، وسایل حمل و نقل، هزینه‌ی پیاده‌سازی سیستم تولید و اثرات آلودگی ناشی از انتشار دی‌اکسید کربن به طور هم زمان مورد توجه قرار گرفت. فتاحی و گویندان در سال ۲۰۱۸^[۳۰] بر طراحی و برنامه‌ریزی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز تهیه شده از پسماند کشاورزی و انتقال آن به بازار تمرکز کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها عملکرد مراکز عرضه پسماند کشاورزی به صورت فصلی و تصادفی در نظر گرفته شد و ظرفیت تسهیلات نیز به دلیل اختلالات احتمالی متغیر بود. چاوز و همکاران در سال ۲۰۱۸^[۳۲] یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای طراحی زنجیره‌ی تأمین پایدار با استفاده از چندین پسماند کشاورزی با در نظر گرفتن پالایشگاه‌های زیستی، استراتژی ظرفیت و جریان مواد ارائه کردند. نوگروهو و ژو در سال ۲۰۱۸^[۳۳] یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پایدار سوخت سبز با در نظر گرفتن عوامل

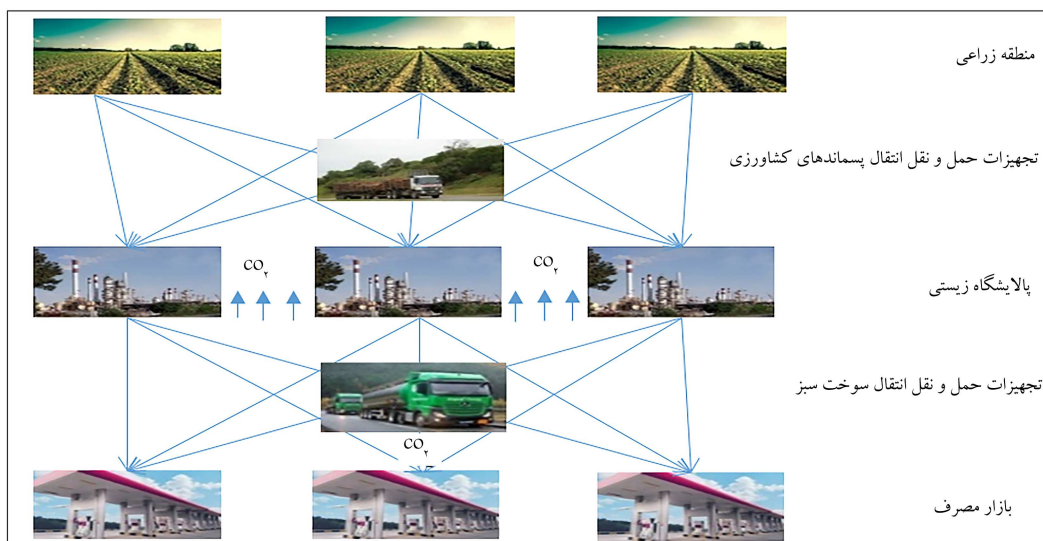
جدول ۱. پیشینه‌ی پژوهش زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز.

ردیف	ماده اولیه	محصول تولیدی	تعداد دوره ها		پارامترها		زیرکرد بر خورد با عدم قطعیت	محدودیت ظرفیت تسهیلات	نوع تابع هدف		مطالعه موردی	سیاست های کاهش انتشار کربن
			چند دوره ای	تک دوره ای	ظرفی	غیر ظرفی			اقتصادی	زیست محیطی		
[۲۲]	نفت خام	سوخت نفتی			*	*	SO	*	*	*	اروپا	
[۲۳]	زیست توده سلواوزیک	بایواتانول و بایودیزل	*	*	*	*		*	*	*	ایتالیا	
[۲۸]	گندم، ذرت و کاساوا	بایواتانول	*	*	*	*		*	*	*	چین	
[۱۵]	زیست توده سلولوزیک	بایودیزل	*	*	*	*		*	*	*	آلمان	
[۲۹]	پسماند ذرت	بایواتانول	*	*	*	*	FP	*	*	*		CC
[۱]	ریز جلیک	بایودیزل	*	*	*	*	SO	*	*	*	ایران	
[۳۰]	زیست توده سلواوزیک	بایواتانول	*	*	*	*	SO	*	*	*	ایران	
[۳۱]	پسماند قهوه	بایواتانول	*	*	*	*		*	*	*	کلمبیا	
[۳۲]	روغن خوراکی	بایودیزل	*	*	*	*		*	*	*	اندونزی	
[۳۳]	جلیک	بایواتانول	*	*	*	*		*	*	*	هند	
[۳۴]	پسماند ذرت	بایواتانول	*	*	*	*		*	*	*	میسوری	
[۳۵]	زیست توده	بایواتانول	*	*	*	*		*	*	*	ایالت متحده	
[۳۶]	ضایعات کشاورزی، جاتروفا و ریز جلیک	الکتریسته و بایودیزل	*	*	*	*		*	*	*	ایران	
[۳۷]	ریز جلیک	بایواتانول	*	*	*	*		*	*	*	تگزاس	
مقاله حاضر	پسماند نیشکر، پسماند ذرت	بایواتانول	*	*	*	*	CF	*	*	*	ایران	CC, CT, CB, CA

در کل هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین دارد. کنگ و همکاران در سال ۲۰۲۰، [۳۷] یک زنجیره‌ی تأمین سه سطحی برای سوخت سبز از ریزجلیک‌ها طراحی کردند که این سطح شامل سطح طراحی با در نظر گرفتن بعد اقتصادی، سطح انتخاب مکان بهیته برای احداث پالایشگاه زیستی و سطح بهینه‌سازی با ارائه یک مدل ریاضی می‌شود. همچنین آن‌ها از یک مطالعه‌ی موردی برای نشان دادن کارایی مدل در تگزاس استفاده کردند.

در جدول ۱ خلاصه‌ی پیشینه‌ی پژوهش ارائه شده است. در این جدول، SO، FP، CF، CC، CT، CB و CA به ترتیب نشان دهنده‌ی بهینه‌سازی تصادفی، برنامه‌ریزی فازی، برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس، سیاست بیشترین مقدار مجاز انتشار کربن، سیاست مالیات بر انتشار کربن، سیاست ترکیبی تجارت کربن و بهینه مقدار مجاز و سیاست جبران کربن است. بر اساس جدول ۱ مشخص می‌شود که تعداد اندکی از مطالعات زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز چند نوع ماده اولیه را به صورت هم‌زمان در تولید سوخت سبز به کار گرفتند. پارامترهای دنیای واقعی در بیشتر مقالات قطعی‌اند و اندک مقالاتی که عدم قطعیت را در نظر گرفته‌اند، از رویکرد بهینه‌سازی تصادفی برای برخورد با عدم قطعیت استفاده کرده‌اند. رویکرد بهینه‌سازی تصادفی برای به دست آوردن توزیع احتمالی پارامترها نیازمند اطلاعات و داده‌های تاریخی

اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی توسعه دادند. مدل آن‌ها نشان داد که تولید و توسعه‌ی سوخت سبز تأثیر مثبتی بر رشد اقتصادی و اجتماعی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن دارد. در سال ۲۰۱۹ گوش و بخشی، [۳۳] یک مدل پایدار زنجیره‌ی تأمین طراحی کردند که هدف آن مکان‌یابی پالایشگاه‌های زیستی، انتخاب مزایع، بهبود پارامترهای زیست محیطی و استفاده از منابع مناسب بود. کشاورانی و همکاران در سال ۲۰۱۹، [۳۴] زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز از پسماند ذرت را با توجه به دو استراتژی زنجیره‌ی تأمین متمرکز و غیرمتمرکز جهت انجام عملیات پیش‌پردازش در پالایشگاه‌های زیستی در تولید نسل دوم بیواتانول طراحی کردند که در مدل آن‌ها دو معیار اصلی عملکرد از منظر زیست محیطی و اقتصادی بررسی شده است. اسماعیلی و همکاران در سال ۲۰۲۰، [۳۵] نسل اول و دوم سوخت سبز را با توجه به ابعاد اقتصادی و زیست محیطی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها نشان داد که هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین و میزان انتشار دی‌اکسید کربن در نسل اول کم‌تر از نسل دوم است. محبوب و همکاران در سال ۲۰۲۰، [۳۶] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای نسل دوم و سوم سوخت سبز با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها توسعه دادند. آن‌ها پس از پیاده‌سازی مدل در یک مطالعه موردی در ایران دریافتند که هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تولید سوخت سبز سهم به‌سزایی



شکل ۱. شبکه زنجیره تامین نسل دوم سوخت سبز.

۳. مدل ریاضی

۱.۳. تعریف مسئله

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عددصالح چنددوره‌یی برای طراحی یک زنجیره تامین تولید سوخت سبز از پسماندهای کشاورزی ارائه می‌شود. در شکل ۱ ساختار شبکه‌ی زنجیره تامین نسل دوم سوخت سبز نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، زنجیره تامین از چند لایه شامل مناطق زراعی، پالایشگاه‌های زیستی و بازار مصرف تشکیل شده است. بدین ترتیب، پسماندهای کشاورزی، مواد خام پالایشگاه‌های زیستی را تشکیل می‌دهند که باید برای تامین تقاضای بازار از مناطق زراعی خریداری شده و سپس به سوخت سبز تبدیل شوند. هدف اصلی مدل بیشینه‌سازی درآمد حاصل از فروش سوخت سبز است. در حین انتقال پسماندهای کشاورزی از مناطق زراعی به پالایشگاه‌های زیستی و همچنین در حین انتقال سوخت سبز از پالایشگاه‌های زیستی به مراکز بازار و نیز در تولید هر واحد سوخت سبز در پالایشگاه‌های زیستی، گاز دی‌اکسید کربن منتشر می‌شود. بنابراین سیاست‌های مختلف کربن در مدل لحاظ خواهد شد. همچنین با توجه به عدم قطعیت پارامترهای مدل در دنیای واقعی، مدل با در نظر گرفتن عدم قطعیت نیز ارائه می‌شود. مفروضات مورد استفاده در مدل‌سازی ریاضی در بخش ۲.۳ و نشانه‌گذاری شاخص‌ها، متغیرهای تصمیم و پارامترهای استفاده شده در مدل در بخش ۳.۳ ارائه شده است.

۲.۳. مفروضات مدل

۱. مدل‌های ارائه شده در این مقاله چنددوره‌یی است و از چند نوع ماده‌ی اولیه برای تولید سوخت سبز استفاده می‌شود؛
۲. تقاضای کل بازار پوشش داده می‌شود؛
۳. تولید برابر با تقاضاست؛
۴. کمبود در زنجیره تامین مجاز نیست؛
۵. ذخیره‌ی اطمینان در پالایشگاه‌های زیستی وجود ندارد؛
۶. نوع وسیله نقلیه برای انتقالات بین مناطق زراعی و پالایشگاه‌های زیستی کامیون و برای انتقالات بین پالایشگاه‌های زیستی و بازارها کامیون‌های تانکر دار است؛

کافی از پارامترهای دارای عدم قطعیت است و همچنین زمانی که تعداد سناریوها افزایش می‌یابد، کارایی خود را از دست خواهد داد. تنها یک مطالعه از یک سیاست کاهش انتشار کربن برای بررسی جنبه زیست‌محیطی استفاده کرده است. با توجه به اثرات مخرب دی‌اکسید کربن بر زندگی انسان‌ها و محیط‌زیست ضروری است تا دولت‌ها سیاست‌های مختلف کاهش انتشار کربن را اتخاذ کنند. با توجه به این موضوع هدف این مطالعه ارائه‌ی مدل‌هایی جدید برای زنجیره تامین سوخت سبز با در نظر گرفتن چهار سیاست انتشار کربن تحت عدم قطعیت پارامترها و بیشینه‌سازی درآمدهای حاصل از فروش زنجیره تامین است. در سطر آخر جدول، ویژگی‌های مطالعه‌ی حاضر نشان داده شده است. به طور کلی نوآوری‌های نوشتار حاضر عبارت است از:

- در نظر گرفتن سیاست‌های مختلف کاهش انتشار کربن در زنجیره تامین سوخت سبز شامل سیاست‌های بیشینه مقدار مجاز انتشار کربن، سیاست اخذ مالیات برای انتشار کربن، سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز و سیاست جبران کربن؛
- در نظر گرفتن چند نوع ماده اولیه شامل پسماند نیشکر و ذرت به صورت هم‌زمان برای تولید سوخت سبز؛
- در نظر گرفتن پارامترهای مالی مانند نرخ بهره و نرخ مالیات در زنجیره تامین سوخت سبز؛
- در نظر گرفتن ویژگی‌های واقعی زنجیره تامین سوخت سبز شامل ظرفیت عرضه مناطق زراعی و نرخ تبدیل پالایشگاه‌ها؛
- بررسی عدم قطعیت پارامترهای دنیای واقعی نظیر هزینه‌های زنجیره تامین، درآمد حاصل از فروش سوخت سبز، ظرفیت تولید پالایشگاه‌های زیستی، میزان انتشار دی‌اکسید کربن در اجرای زنجیره تامین و حداکثر میزان انتشارات دی‌اکسید کربن در مناطق زراعی و پالایشگاه‌های زیستی؛
- استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس جهت برخورد با عدم قطعیت پارامترها.

۷. ظرفیت تجهیزات حمل و نقل مشابه یکسان است؛
 ۸. امکان افزایش ظرفیت در پالایشگاه‌های زیستی وجود دارد.

۳.۳. نمادهای مدل

• اندیس‌ها

- I : مجموعه‌ی مناطق زراعی؛
 J : مجموعه‌ی پالایشگاه‌های زیستی؛
 M : مجموعه‌ی بازارهای فروش؛
 P : مجموعه‌ی انواع پسماندهای کشاورزی؛
 T : مجموعه‌ی دوره‌های زمانی.

• پارامترها

- \tilde{R}_t : درآمد حاصل از فروش هر گالن سوخت سبز در دوره t ؛
 $\tilde{H}c_{pit}$: هزینه کشت و برداشت هر تن پسماند کشاورزی نوع p از زمین زراعی i در دوره t ؛
 $\tilde{C}c_{pit}$: هزینه جمع‌آوری هر تن پسماند کشاورزی نوع p از زمین زراعی i در دوره t ؛
 $\tilde{T}c_{pijt}$: هزینه حمل و نقل هر تن پسماند کشاورزی نوع p از زمین زراعی i به پالایشگاه زیستی j در دوره t ؛
 $\tilde{P}c_{jt}$: هزینه تولید هر گالن سوخت سبز در پالایشگاه زیستی j در دوره t ؛
 $\tilde{T}c_{jmt}$: هزینه حمل و نقل هر گالن سوخت سبز از پالایشگاه زیستی j به بازار m در دوره t ؛

h_{mt} : تقاضای بازار m در دوره t بر حسب گالن؛

$\tilde{\mu}_j$: ظرفیت تولید پالایشگاه زیستی j بر حسب گالن؛

D_{ij} : مسافت بین منطقه زراعی i و پالایشگاه زیستی j بر حسب کیلومتر؛

D_{jm} : مسافت بین پالایشگاه زیستی j و بازار m بر حسب کیلومتر؛

$\tilde{\alpha}_{pi}$: مساحت مورد نیاز در منطقه زراعی i برای تأمین پسماندهای کشاورزی مورد نیاز نوع p بر حسب هکتار؛

$\tilde{P}e_{pi}$: مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن در هنگام تولید، برداشت و جمع‌آوری هر تن پسماند کشاورزی نوع p در منطقه زراعی i بر حسب کیلوگرم؛

$\tilde{T}e_{pi}$: مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن در حمل و نقل هر تن پسماند کشاورزی نوع p در منطقه زراعی i بر حسب کیلوگرم؛

$\tilde{P}e$: مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن در تولید هر گالن سوخت سبز بر حسب کیلوگرم؛

$\tilde{T}e$: مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن در حمل و نقل هر گالن سوخت سبز بر حسب کیلوگرم؛

β_{pj} : نرخ تبدیل هر تن پسماند کشاورزی نوع p به هر گالن سوخت سبز در پالایشگاه زیستی j ؛

γ_{pit} : میانگین برداشت هر تن پسماند کشاورزی نوع p در منطقه زراعی i در دوره t ؛

\tilde{C}_{1t}^{cap} : بیشینه‌ی میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در مناطق زراعی در دوره t بر حسب کیلوگرم

\tilde{C}_{2t}^{cap} : بیشینه‌ی میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در پالایشگاه‌های زیستی در دوره t بر حسب کیلوگرم؛

$\tilde{T}x_t$: نرخ مالیات به ازای انتشار هر کیلوگرم دی‌اکسیدکربن در دوره t ؛

v : نرخ بهره؛

ρ_t : قیمت فروش هر کیلوگرم دی‌اکسیدکربن در سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز در دوره t ؛
 θ_t : قیمت خرید هر کیلوگرم دی‌اکسیدکربن در سیاست جبران کربن در دوره t .

• متغیرهای تصمیم

Y_{pit} : مقدار پسماند کشاورزی نوع p در منطقه‌ی زراعی i در دوره‌ی t بر حسب تن؛

X_{pijt} : مقدار پسماند کشاورزی حمل شده نوع p از منطقه‌ی زراعی i به پالایشگاه زیستی j در دوره‌ی t بر حسب تن؛

W_{jmt} : مقدار سوخت سبز حمل شده از پالایشگاه زیستی j به بازار m در دوره t بر حسب گالن؛

Z_{jt} : مقدار سوخت سبز تولید شده در پالایشگاه زیستی j در دوره t بر حسب گالن؛

e_{1t}^- : مقدار مجاز دی‌اکسیدکربن فروخته شده در مناطق زراعی بر حسب کیلوگرم در دوره t ؛

e_{2t}^- : مقدار مجاز دی‌اکسیدکربن فروخته شده در پالایشگاه‌های زیستی بر حسب کیلوگرم در دوره t ؛

e_{1t}^+ : مقدار مجاز دی‌اکسیدکربن خریداری شده در مناطق زراعی بر حسب کیلوگرم در دوره t ؛

e_{2t}^+ : مقدار مجاز دی‌اکسیدکربن خریداری شده در پالایشگاه‌های زیستی بر حسب کیلوگرم در دوره t .

۴.۳. فرمول ریاضی

با توجه به تعریف مسئله، پارامترها و متغیرها، مدل ریاضی به قرار زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Max } z = & \sum_t \frac{1}{(1+v)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \tilde{R}_t W_{jmt} \right. \\ & - \sum_p \sum_i \tilde{H}c_{pit} Y_{pit} - \sum_p \sum_i \tilde{C}c_{pit} Y_{pit} \\ & - \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}c_{pijt} D_{ij} X_{pijt} - \sum_j \tilde{P}c_{jt} Z_{jt} \\ & \left. - \sum_j \sum_m \tilde{T}c_{jmt} D_{jm} W_{jmt} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

s.t.

$$Y_{pit} \leq \tilde{\alpha}_{pi} \gamma_{pit} \quad \forall p, i, t \quad (2)$$

$$Z_{jt} \leq \tilde{\mu}_j \quad \forall j, t \quad (3)$$

$$Y_{pit} = \sum_j X_{pijt} \quad \forall p, i, t \quad (4)$$

$$Z_{jt} = \sum_p \sum_i X_{pijt} \times \beta_{pj} \quad \forall j, t \quad (5)$$

$$Z_{jt} = \sum_m W_{jmt} \quad \forall j, t \quad (6)$$

$$\sum_j W_{jmt} = h_{mt} \quad \forall m, t \quad (7)$$

$$X_{pijt} \geq 0 \quad \forall p, i, j, t \quad (8)$$

$$Z_{jt} \geq 0 \quad \forall j, t \quad (9)$$

توجه داشته باشید که در اینجا رابطه ۱۲ همان رابطه ۱ است. محدودیت ۱۳ بیان می‌کند که دی‌اکسید کربن منتشر شده حین فعالیت‌های تولید، برداشت، جمع‌آوری و حمل و نقل پسماندهای کشاورزی از مناطق زراعی به پالایشگاه زیستی نباید از حد مجاز انتشار دی‌اکسید کربن فراتر رود. محدودیت ۱۴ نیز نشان می‌دهد که دی‌اکسید کربن منتشر شده حین تولید سوخت سبز و انتقال آن به بازار مصرف نباید از حد مجاز تعیین شده تجاوز کند.

۲.۴. سیاست مالیات بر انتشار کربن

تحت سیاست مالیات کربن، مالیات بر انتشار هر واحد دی‌اکسید کربن اعمال می‌شود. برخلاف سیاست بیشینه مقدار مجاز انتشار کربن، هیچ محدودیتی بر انتشار دی‌اکسید کربن در پیکربندی محصول وجود ندارد. $\tilde{T}x_t$ را نرخ مالیات انتشار کربن در نظر بگیرید. این پارامتر تعیین می‌کند که مناطق زراعی و پالایشگاه‌های زیستی ملزم هستند که به ازای هر واحد دی‌اکسید کربن که حین عملیات تولیدی خود منتشر می‌کنند هزینه‌ی تحت عنوان مالیات با نرخ مشخصی به دولت بپردازند. حال تابع هدف قبیل به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$\begin{aligned} Max z = & \sum_t \frac{1}{(1+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \tilde{R}t W_{jmt} \right. \\ & - \sum_p \sum_i \tilde{H}c_{pit} Y_{pit} - \sum_p \sum_i \tilde{C}c_{pit} Y_{pit} \\ & - \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}c_{pijt} D_{ij} X_{pijt} - \sum_j \tilde{P}c_{jt} Z_{jt} \\ & - \sum_j \sum_m \tilde{T}c_{jmt} D_{jm} W_{jmt} - \sum_p \sum_i \tilde{T}x_t \tilde{P}e_{pi} Y_{pit} \\ & - \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}x_t \tilde{T}e_{pi} X_{pijt} - \sum_j \tilde{T}x_t \tilde{P}e_{jt} Z_{jt} \\ & \left. - \sum_j \sum_m \tilde{T}x_t \tilde{T}e W_{jmt} \right] \quad (15) \end{aligned}$$

s.t. (۲), (۳), (۴), (۵), (۶), (۷), (۸), (۹), (۱۰), (۱۱)

۳.۴. سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز

این سیاست موجب تأسیس یک بازار تجاری می‌شود که به موجب آن کارخانجات برای حفظ عملیات تولید خود می‌توانند سهمیه انتشار کربن خود را بفروشند یا از سایرین خریداری کنند. $e_{\tau t}^+$ و $e_{\tau t}^-$ به ترتیب مقدار مجاز کربن خریداری و فروخته شده در مناطق زراعی و $e_{\tau t}^+$ و $e_{\tau t}^-$ نیز به ترتیب مقدار مجاز کربن خریداری و فروخته شده در پالایشگاه‌های زیستی را نشان می‌دهد. زمانی که میزان دی‌اکسید کربن منتشر شده ناشی از تولید مناطق زراعی و پالایشگاه‌ها از مقدار مجاز تعیین شده برای انتشار دی‌اکسید کربن کم‌تر باشد، می‌توانند به سایر مناطق زراعی و پالایشگاه‌ها که برای تولید خود به دی‌اکسید کربن بیشتری احتیاج دارند، میزان دی‌اکسید کربن مازاد را بفروشند. همچنین زمانی که به مقدار دی‌اکسید کربن بیشتری برای تولید احتیاج داشته باشند و هم‌اکنون با توجه به حد مجاز انتشار دی‌اکسید کربن قادر به تولید بیشتر نباشند، می‌توانند از سایرین بخرند. بنابراین مدل ریاضی به قرار زیر خواهد بود:

$$Max z = \sum_t \frac{1}{(1+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \tilde{R}t W_{jmt} \right.$$

$$W_{jmt} \geq 0 \quad \forall j, m, t \quad (10)$$

$$Y_{pit} \geq 0 \quad \forall p, i, t \quad (11)$$

تابع هدف مسئله، سود حاصل از فروش سوخت سبز به بازارهای مصرف را بیشینه می‌کند و از تفاضل درآمد حاصل از فروش سوخت سبز و هزینه‌های جمع‌آوری، برداشت و حمل و نقل پسماندهای کشاورزی از مناطق زراعی به پالایشگاه‌های زیستی و هزینه حمل و نقل از پالایشگاه‌های زیستی به بازارها تشکیل شده است. محدودیت ۲ نشان می‌دهد که عرضه پسماندهای کشاورزی در هر منطقه‌ی زراعی در هر دوره نمی‌تواند از ظرفیت عرضه آن منطقه بر اساس مساحت در دسترس فراتر رود. بر اساس محدودیت ۳ مقدار سوخت سبز تولید شده در هر پالایشگاه زیستی و در هر دوره نمی‌تواند از ظرفیت تولیدی پالایشگاه زیستی فراتر رود. محدودیت ۴ تضمین می‌کند که کل پسماندهای کشاورزی برداشت شده در مناطق زراعی به پالایشگاه‌های زیستی منتقل می‌شود. طبق محدودیت ۵ پسماندهای کشاورزی حمل شده از هر منطقه‌ی زراعی به هر پالایشگاه بر اساس نرخ تبدیلی به سوخت سبز تبدیل می‌شود. محدودیت ۶ نشان می‌دهد که تمام سوخت سبز تولید شده در هر پالایشگاه به مراکز بازار منتقل می‌شود. طبق محدودیت ۷ مجموع سوخت سبز حمل شده از پالایشگاه‌های زیستی به مراکز بازار با تقاضای بازارها برابر است. محدودیت‌های ۸ تا ۱۱ حدود متغیرهای تصمیم مسئله را بیان می‌کنند.

۴. بسط مدل با در نظر گرفتن سیاست‌های کربن

در این بخش، ۴ سیاست کربن به مدل موجود در بخش قبیل اضافه شده است. این سیاست‌ها شامل بیشینه میزان مجاز انتشار کربن، مالیات کربن، طرح ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز و طرح جبران کربن است که از مشهورترین سیاست‌های انتشار گازهای گلخانه‌یی به شمار می‌روند.^[۱۸]

۱.۴. سیاست بیشینه مقدار مجاز انتشار کربن

در چارچوب سیاست بیشینه مقدار مجاز انتشار کربن، مقدار انتشار مجاز کربن برای مصرف یک شرکت محدود است. مدل ریاضی تحت سیاست بیشینه مقدار مجاز انتشار کربن به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} Max z = & \sum_t \frac{1}{(1+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \tilde{R}t W_{jmt} \right. \\ & - \sum_p \sum_i \tilde{H}c_{pit} Y_{pit} - \sum_p \sum_i \tilde{C}c_{pit} Y_{pit} \\ & - \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}c_{pijt} D_{ij} X_{pijt} - \sum_j \tilde{P}c_{jt} Z_{jt} \\ & \left. - \sum_j \sum_m \tilde{T}c_{jmt} D_{jm} W_{jmt} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

s.t. (۲), (۳), (۴), (۵), (۶), (۷), (۸), (۹), (۱۰), (۱۱)

$$\sum_p \sum_i (\tilde{P}e_{pi} Y_{pit}) + \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}e_{pi} X_{pijt} \leq \tilde{C}_{it}^{cap} \quad \forall t \quad (13)$$

$$\sum_j \tilde{P}e_{jt} Z_{jt} + \sum_j \sum_m \tilde{T}e W_{jmt} \leq \tilde{C}_{t}^{cap} \quad \forall t \quad (14)$$

$$\sum_j \tilde{P}eZ_{jt} + \sum_j \sum_m \tilde{T}eW_{jmt} \leq \tilde{C}_{\tau t}^{cap} + e_{\tau t}^+ \quad \forall t \quad (22)$$

$$e_{\tau t}^+, e_{\tau t}^- \geq 0 \quad \forall t \quad (23)$$

محدودیت ۲۱ بیان می‌کند که در صورت مواجه با کمبود در سهمیه انتشار دی‌اکسیدکربن در حین انجام فعالیت‌های تولید، برداشت، جمع‌آوری و حمل و نقل پسماندهای کشاورزی در مناطق زراعی، امکان خرید این میزان کمبود وجود دارد. محدودیت ۲۲ نیز همین امکان را در حین تولید سوخت سبز و انتقال آن به بازار در پالایشگاه زیستی فراهم می‌کند. محدودیت ۲۳ حدود متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۵. مدل برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس

در دنیای واقعی بسیاری از پارامترها غیرقطعی هستند. پارامترهایی مانند نرخ تورم، هزینه‌ها و نرخ مالیات پیوسته در حال تغییر است. علاوه بر این مساحت مناطق زراعی قابل استفاده جهت کشت هر نوع محصول با توجه به جنس و مرغوبیت خاک و متغیر بودن این فاکتورها در دوره‌های مختلف، به صورت قطعی قابل بیان نیست. به همین دلیل برای کنترل عدم قطعیت، مدل‌های برنامه‌ریزی فازی بسیاری توسعه یافته است که در این مقاله از رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس برای مواجه با عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی مدل استفاده شده است. این رویکرد به واسطه مفاهیم ریاضی عمیقی که دارد، شدنی‌ترین مقدار قابل انتظار را برای پارامترهای غیرقطعی در نظر می‌گیرد. همچنین رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس از توزیع مثلثی و دوزنقه‌ی برای کنترل عدم قطعیت استفاده می‌کند.^[۲۸] حال برای درک بهتر، مدل بهینه‌سازی ساده زیر را در نظر بگیرید:

$$\text{Min } z = f_y + cx$$

s.t.

$$Ax \geq d$$

$$Bx = 0$$

$$Sx \leq Ny$$

$$y \in \{0, 1\}$$

$$x \geq 0$$

(24)

فرض کنید بردار f پارامتر قطعی، بردارهای c, d و ماتریس ضرایب N پارامترهای غیرقطعی مسئله است. برای ساختن مدل اصلی برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس، از یک مقدار قابل انتظار برای مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی تابع هدف و از عملگر الزام برای مدل‌سازی محدودیت‌های شانس استفاده می‌شود که در مدل ۲۵ نشان داده شده است. عملگر الزام مستقیماً محدودیت‌های شانس فازی را به معادلات قطعی معادل آن‌ها تبدیل می‌کند. با توجه به معنی دارتر بودن عملگر الزام برای برآوردن محدودیت‌های شانس،^[۲۸] در این مقاله از توزیع فازی دوزنقه‌ی برای مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترها استفاده شده است.

$$\text{Min } E[Z] = E[f]y + E[c]x$$

s.t.

$$\begin{aligned} & - \sum_p \sum_i \tilde{H}c_{pit}Y_{pit} - \sum_p \sum_i \tilde{C}c_{pit}Y_{pit} \\ & - \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}c_{pijt}D_{ij}X_{pijt} - \sum_j \tilde{P}c_{jt}Z_{jt} \\ & - \sum_j \sum_m \tilde{T}c_{jmt}D_{jm}W_{jmt} - \rho_t (e_{\tau t}^+ - e_{\tau t}^-) - \rho_t (e_{\tau t}^+ - e_{\tau t}^-) \end{aligned} \quad (16)$$

s.t. (۲), (۳), (۴), (۵), (۶), (۷), (۸), (۹), (۱۰), (۱۱)

$$\begin{aligned} & \sum_p \sum_i (\tilde{P}e_{pi}Y_{pit}) + \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}e_{pi}X_{pijt} + e_{\tau t}^- \\ & \leq \tilde{C}_{\tau t}^{cap} + e_{\tau t}^+ \quad \forall t \quad (17) \end{aligned}$$

$$\sum_j \tilde{P}eZ_{jt} + \sum_j \sum_m \tilde{T}eW_{jmt} + e_{\tau t}^- \leq \tilde{C}_{\tau t}^{cap} + e_{\tau t}^+ \quad \forall t \quad (18)$$

$$e_{\tau t}^-, e_{\tau t}^+, e_{\tau t}^-, e_{\tau t}^+ \geq 0 \quad \forall t \quad (19)$$

محدودیت ۱۷ بیان می‌کند که در صورت مواجه با کمبود یا مازاد سهمیه انتشار دی‌اکسیدکربن در حین انجام فعالیت‌های تولید، برداشت، جمع‌آوری و حمل و نقل پسماندهای کشاورزی در مناطق زراعی، امکان خرید یا فروش مقدار کمبود یا مازاد وجود دارد. محدودیت ۱۸ نیز امکان خرید یا فروش کمبود یا مازاد سهمیه انتشار دی‌اکسیدکربن در حین انجام فعالیت‌های تولید سوخت سبز و حمل و نقل آن به مراکز بازار را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۹ حدود متغیرهای تصمیم را بیان می‌کند.

۴.۴. سیاست جبران کربن

سیاست جبران کربن به شرکت‌ها مجوز خرید کربن بیشتر را می‌دهد. این سیاست وقتی استفاده می‌شود که شرکت‌ها به موجب بیشینه مقدار مجاز کربن، نمی‌توانند به میزان تولید مورد نظر برسند. θ_t قیمت خرید هر کیلوگرم کربن در دوره t است. زمانی که میزان دی‌اکسیدکربن منتشر شده ناشی از تولید مناطق زراعی و پالایشگاه‌ها از مقدار مجاز تعیین شده برای انتشار دی‌اکسیدکربن بیشتر باشد می‌توانند از سایر مناطق زراعی و پالایشگاه‌های زیستی که برای تولید خود به دی‌اکسیدکربن کم‌تری احتیاج دارند، میزان دی‌اکسیدکربن کمبود را بخرند. $e_{\tau t}^+$ و $e_{\tau t}^-$ نیز به ترتیب مقدار کربن مجاز خریداری شده در مناطق زراعی و پالایشگاه‌های زیستی را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} \text{Max } z = & \sum_t \frac{1}{(1+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \tilde{R}_t W_{jmt} \right. \\ & - \sum_p \sum_i \tilde{H}c_{pit}Y_{pit} - \sum_p \sum_i \tilde{C}c_{pit}Y_{pit} \\ & - \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}c_{pijt}D_{ij}X_{pijt} - \sum_j \tilde{P}c_{jt}Z_{jt} \\ & \left. - \sum_j \sum_m \tilde{T}c_{jmt}D_{jm}W_{jmt} - \theta_t e_{\tau t}^+ - \theta_t e_{\tau t}^- \right] \quad (20) \end{aligned}$$

s.t. (۲), (۳), (۴), (۵), (۶), (۷), (۸), (۹), (۱۰), (۱۱)

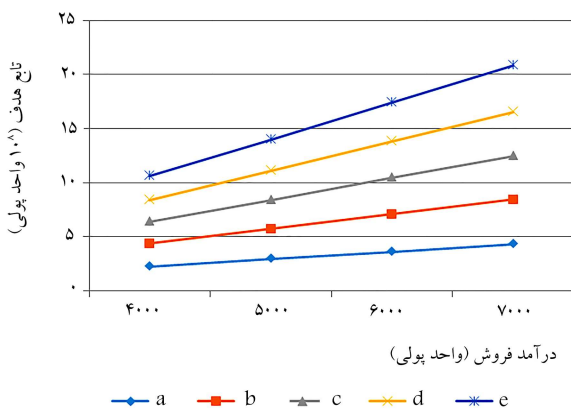
$$\begin{aligned} & \sum_p \sum_i (\tilde{P}e_{pi}Y_{pit}) + \sum_p \sum_i \sum_j \tilde{T}e_{pi}X_{pijt} \\ & \leq \tilde{C}_{\tau t}^{cap} + e_{\tau t}^+ \quad \forall t \quad (21) \end{aligned}$$

جدول ۲. سایز مثال‌های عددی.

مثال عددی	I	J	M	P	T
q1	3	2	3	2	3
q2	5	4	5	4	5
q3	7	6	7	6	7
q4	8	8	10	8	10
q5	10	10	12	10	12
q6	12	12	15	12	15

جدول ۳. حدود پارامترها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
\bar{R}_t	[۶۰۰۰, ۶۳۰۰]	$\bar{\mu}_j$	[۲۰۰۰, ۲۰۸۰]
\bar{H}_{cpit}	[۴,۰۰۰, ۷,۲۵]	D_{ij}	[۲۰۰, ۴۵۰]
\bar{C}_{cpit}	[۷۷۴, ۳,۴۴]	D_{jm}	[۲۰۰, ۴۲۰]
\bar{T}_{cpijt}	[۰,۳۸, ۳,۳۱]	$\bar{\alpha}_{pi}$	[۱۶۴, ۱۹۴]
\bar{P}_{cjt}	[۱,۳۷, ۲,۴۰]	\bar{P}_{epi}	[۵۸, ۶۲]
\bar{T}_{cjmt}	[۱,۰۹۹, ۴,۳۹۸]	\bar{T}_{epi}	[۹۷,۰۲, ۹۹,۲۳]
h_{mt}	[۵۴۰, ۱۰,۱۰]	\bar{P}_e	۱۸,۷۲
ρ_t	[۱,۰۰۰, ۱۲,۰۰]	θ_t	[۶,۰۰, ۸,۰۰]
\bar{T}_e	۲۰,۲۴۶	β_{pj}	[۰,۶, ۰,۹]
γ_{pit}	[۲,۰۰, ۵,۵۰]	\bar{T}_{xt}	[۰,۱, ۰,۳۲]
\bar{C}_{it}^{cap}	[۳۸۰۰۰۰, ۹۱۸۶۰۰]	\bar{C}_{it}^{cap}	[۳۰۰۰۰۰, ۲۱۰۰۰۰]
v	۰,۲۵		



شکل ۲. تأثیر پارامتر درآمد فروش بر مقدار تابع هدف.

نظیر میزان درآمد حاصل از فروش سوخت سبز، میزان تقاضای بازار مصرفی و ظرفیت تولید پالایشگاه زیستی بر مقدار تابع هدف زنجیره‌ی تأمین نسل دوم سوخت سبز بررسی شده است. تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات درآمد فروش در شکل ۲ نشان داده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود با افزایش درآمد حاصل از فروش در مدل اصلی و در سایر سیاست‌ها مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد؛ چرا که تابع هدف بیشینه‌سازی سود سیستم زنجیره‌ی تأمین است. پس طبیعی است که با افزایش درآمد حاصل از

$$Nec \{Ax \geq \tilde{d}\} \geq \alpha_m \quad \forall m \in M$$

$$Bx = 0$$

$$Nec \{Sx \leq \tilde{N}y\} \geq \alpha_m \quad \forall m \in M$$

$$y \in \{0, 1\}$$

$$x \geq 0 \quad (25)$$

محدودیت‌هایی که شامل پارامترهای غیرقطعی‌اند باید کم‌تر از سطح اطمینان α باشند. بنابراین مدل غیرقطعی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:^[۳۹]

$$Min E[Z] = f_y + \left(\frac{c_{(1)} + c_{(r)} + c_{(r)} + c_{(r)}}{4} \right) x$$

s.t.

$$Ax \geq (1 - \alpha_m) d_{(r)} + \alpha_m d_{(r)}$$

$$\forall m \in M$$

$$Bx = 0$$

$$Sx \leq [(1 - \alpha_m) N_{(r)} + \alpha_m N_{(1)}] y \quad \forall m \in M$$

$$y \in \{0, 1\}$$

$$x \geq 0 \quad (26)$$

با توجه به مطالب گفته شده، مدل‌های قطعی معادل مدل غیرقطعی ارائه شده در بخش سوم به صورت زیر خواهد بود:

۶. نتایج عددی

در این بخش نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز ارائه می‌شود برای حل مدل، شش مثال عددی $q1, q2, q3, q4, q5$ و $q6$ با اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. حدود هر یک از پارامترها برای هر شش مثال در جدول ۲ و مقادیر پارامترها جهت حل مدل در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۴، نتایج حل مدل‌های مختلف را برای هر شش مثال عددی نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود در مثال‌های عددی با مقیاس بزرگ‌تر، میزان تقاضای بازار و در نتیجه، میزان تولید سوخت سبز برای برآوردن تقاضا افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار تابع هدف بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش سطوح عدم قطعیت مقدار تابع هدف در تمام مدل‌ها کاهش می‌یابد به این دلیل که در سطوح عدم قطعیت بالاتر با توجه به پارامترهای غیرقطعی، سیستم زنجیره‌ی تأمین متحمل ریسک‌های بیشتری در تولید سوخت سبز می‌شود در نتیجه مقدار تابع هدف که بیشینه‌سازی درآمد حاصل از فروش سوخت سبز است، کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده از این شش مثال عددی می‌توان بیان کرد که درآمد حاصل از فروش سوخت سبز در پالایشگاه زیستی تحت سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز، معمولاً بیشتر از درآمد حاصل از فروش تحت سایر سیاست‌هاست. همچنین به کارگیری سیاست بیشترین مقدار مجاز انتشار کربن در پالایشگاه زیستی موجب کاهش درآمد حاصل از فروش می‌شود، چرا که تحت این سیاست پالایشگاه با محدودیت تولید مواجه می‌شود و نمی‌تواند سوخت سبز بیشتری تولید کند.

برای تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی، مثال عددی دوم در سطح عدم قطعیت 0.9 در نظر گرفته شده است و تأثیر پارامترهای کلیدی زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز

$$\begin{aligned}
 Max\ z = & \sum_t \frac{1}{(1+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \left(\frac{R_t(\iota) + R_t(\tau) + R_t(\rho) + R_t(\epsilon)}{\tau} \right) W_{jmt} \right. \\
 & - \sum_p \sum_i \left(\frac{Hc_{pit}(\iota) + Hc_{pit}(\tau) + Hc_{pit}(\rho) + Hc_{pit}(\epsilon)}{\tau} \right) Y_{pit} - \sum_p \sum_i \left(\frac{Cc_{pit}(\iota) + Cc_{pit}(\tau) + Cc_{pit}(\rho) + Cc_{pit}(\epsilon)}{\tau} \right) Y_{pit} \\
 & - \sum_p \sum_i \sum_j \left(\frac{Tc_{pijt}(\iota) + Tc_{pijt}(\tau) + Tc_{pijt}(\rho) + Tc_{pijt}(\epsilon)}{\tau} \right) D_{ij} X_{pijt} - \sum_j \left(\frac{Pc_{jt}(\iota) + Pc_{jt}(\tau) + Pc_{jt}(\rho) + Pc_{jt}(\epsilon)}{\tau} \right) Z_{jt} \\
 & \left. - \sum_j \sum_m \left(\frac{Tc_{jmt}(\iota) + Tc_{jmt}(\tau) + Tc_{jmt}(\rho) + Tc_{jmt}(\epsilon)}{\tau} \right) D_{jm} W_{jmt} \right]
 \end{aligned} \tag{27}$$

s.t. (۴), (۵), (۶), (۷), (۸), (۹), (۱۰), (۱۱)

$$Y_{pit} \leq [(\lambda - \varphi_\lambda) \alpha_{pi}(\tau) + \varphi_\lambda \alpha_{pi}(\iota)] \gamma_{pit} \quad \forall p, i, t \tag{28}$$

$$Z_{jt} \leq [(\lambda - \varphi_\tau) \mu_j(\tau) + \varphi_\tau \mu_j(\iota)] \quad \forall j, t \tag{29}$$

معادل قطعی مدل غیرقطعی سیاست بیشینه مقدار مجاز انتشار کربن

$$\begin{aligned}
 Max\ z = & \sum_t \frac{1}{(1+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \left(\frac{R_t(\iota) + R_t(\tau) + R_t(\rho) + R_t(\epsilon)}{\tau} \right) W_{jmt} \right. \\
 & - \sum_p \sum_i \left(\frac{Hc_{pit}(\iota) + Hc_{pit}(\tau) + Hc_{pit}(\rho) + Hc_{pit}(\epsilon)}{\tau} \right) Y_{pit} - \sum_p \sum_i \left(\frac{Cc_{pit}(\iota) + Cc_{pit}(\tau) + Cc_{pit}(\rho) + Cc_{pit}(\epsilon)}{\tau} \right) Y_{pit} \\
 & - \sum_p \sum_i \sum_j \left(\frac{Tc_{pijt}(\iota) + Tc_{pijt}(\tau) + Tc_{pijt}(\rho) + Tc_{pijt}(\epsilon)}{\tau} \right) D_{ij} X_{pijt} - \sum_j \left(\frac{Pc_{jt}(\iota) + Pc_{jt}(\tau) + Pc_{jt}(\rho) + Pc_{jt}(\epsilon)}{\tau} \right) z_{jt} \\
 & \left. - \sum_j \sum_m \left(\frac{Tc_{jmt}(\iota) + Tc_{jmt}(\tau) + Tc_{jmt}(\rho) + Tc_{jmt}(\epsilon)}{\tau} \right) D_{jm} W_{jmt} \right]
 \end{aligned} \tag{30}$$

s.t. (۴), (۵), (۶), (۷), (۸), (۹), (۱۰), (۱۱), (۲۸), (۲۹)

$$\begin{aligned}
 & \circ \geq \sum_p \sum_i [(\lambda - \varphi_\tau) P e_{pi}(\tau) + \varphi_\tau P e_{pi}(\iota)] Y_{pit} + \sum_p \sum_i \sum_j [(\lambda - \varphi_\tau) T e_{pi}(\tau) + \varphi_\tau T e_{pi}(\iota)] X_{pijt} \\
 & - [(\lambda - \varphi_\delta) C_{\tau t}^{cap} + \varphi_\delta C_{\tau t}^{cap}(\iota)] \quad \forall t
 \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
 & \circ \geq \sum_j [(\lambda - \varphi_\rho) P e_{jt}(\tau) + \varphi_\rho P e_{jt}(\iota)] Z_{jt} + \sum_j \sum_m [(\lambda - \varphi_\nu) T e_{jt}(\tau) + \varphi_\nu T e_{jt}(\iota)] W_{jmt} - [(\lambda - \varphi_\lambda) C_{\tau t}^{cap} + \varphi_\lambda C_{\tau t}^{cap}(\iota)] \quad \forall t
 \end{aligned} \tag{32}$$

معادل قطعی مدل غیرقطعی سیاست تجارت کربن

$$\begin{aligned}
 Max\ z = & \sum_t \frac{1}{(1+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \left(\frac{R_t(\iota) + R_t(\tau) + R_t(\rho) + R_t(\epsilon)}{\tau} \right) W_{jmt} \right. \\
 & - \sum_p \sum_i \left(\frac{Hc_{pit}(\iota) + Hc_{pit}(\tau) + Hc_{pit}(\rho) + Hc_{pit}(\epsilon)}{\tau} \right) Y_{pit} - \sum_p \sum_i \left(\frac{Cc_{pit}(\iota) + Cc_{pit}(\tau) + Cc_{pit}(\rho) + Cc_{pit}(\epsilon)}{\tau} \right) Y_{pit} \\
 & - \sum_p \sum_i \sum_j \left(\frac{Tc_{pijt}(\iota) + Tc_{pijt}(\tau) + Tc_{pijt}(\rho) + Tc_{pijt}(\epsilon)}{\tau} \right) D_{ij} X_{pijt} - \sum_j \left(\frac{Pc_{jt}(\iota) + Pc_{jt}(\tau) + Pc_{jt}(\rho) + Pc_{jt}(\epsilon)}{\tau} \right) z_{jt} \\
 & - \sum_j \sum_m \left(\frac{Tc_{jmt}(\iota) + Tc_{jmt}(\tau) + Tc_{jmt}(\rho) + Tc_{jmt}(\epsilon)}{\tau} \right) D_{jm} W_{jmt} \\
 & - \sum_p \sum_i \left(\frac{T x_t(\iota) + T x_t(\tau) + T x_t(\rho) + T x_t(\epsilon)}{\tau} \right) \left(\frac{P e_{pi}(\iota) + P e_{pi}(\tau) + P e_{pi}(\rho) + P e_{pi}(\epsilon)}{\tau} \right) Y_{pit} \\
 & - \sum_p \sum_i \sum_j \left(\frac{T x_t(\iota) + T x_t(\tau) + T x_t(\rho) + T x_t(\epsilon)}{\tau} \right) \left(\frac{T e_{pi}(\iota) + T e_{pi}(\tau) + T e_{pi}(\rho) + T e_{pi}(\epsilon)}{\tau} \right) X_{pijt} \\
 & - \sum_j \left(\frac{T x_t(\iota) + T x_t(\tau) + T x_t(\rho) + T x_t(\epsilon)}{\tau} \right) \left(\frac{P e_{jt}(\iota) + P e_{jt}(\tau) + P e_{jt}(\rho) + P e_{jt}(\epsilon)}{\tau} \right) Z_{jt} \\
 & \left. - \sum_j \sum_m \left(\frac{T x_t(\iota) + T x_t(\tau) + T x_t(\rho) + T x_t(\epsilon)}{\tau} \right) \left(\frac{T e_{jt}(\iota) + T e_{jt}(\tau) + T e_{jt}(\rho) + T e_{jt}(\epsilon)}{\tau} \right) W_{jmt} \right]
 \end{aligned} \tag{33}$$

s.t. (۴), (۵), (۶), (۷), (۸), (۹), (۱۰), (۱۱), (۱۱), (۲۸), (۲۹)

معادل قطعی مدل غیرقطعی سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز

$$\begin{aligned}
 Max z = & \sum_t \frac{1}{(\lambda+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \left(\frac{R_t(\lambda)+R_t(\nu)+R_t(\tau)+R_t(\xi)}{\varphi} \right) w_{jmt} \right. \\
 & - \sum_p \sum_i \left(\frac{Hc_{pit}(\lambda)+Hc_{pit}(\nu)+Hc_{pit}(\tau)+Hc_{pit}(\xi)}{\varphi} \right) Y_{pit} - \sum_p \sum_i \left(\frac{Cc_{pit}(\lambda)+Cc_{pit}(\nu)+Cc_{pit}(\tau)+Cc_{pit}(\xi)}{\varphi} \right) Y_{pit} \\
 & - \sum_p \sum_i \sum_j \left(\frac{Tc_{pijt}(\lambda)+Tc_{pijt}(\nu)+Tc_{pijt}(\tau)+Tc_{pijt}(\xi)}{\varphi} \right) D_{ij} X_{pijt} - \sum_j \left(\frac{Pc_{jt}(\lambda)+Pc_{jt}(\nu)+Pc_{jt}(\tau)+Pc_{jt}(\xi)}{\varphi} \right) z_{jt} \\
 & \left. - \sum_j \sum_m \left(\frac{Tc_{jmt}(\lambda)+Tc_{jmt}(\nu)+Tc_{jmt}(\tau)+Tc_{jmt}(\xi)}{\varphi} \right) D_{jm} W_{jmt} - \rho_t (e_{\lambda t}^+ - e_{\lambda t}^-) - \rho_t (e_{\tau t}^+ - e_{\tau t}^-) \right]
 \end{aligned} \tag{34}$$

$$\begin{aligned}
 s.t. & (\varphi), (\delta), (\epsilon), (\nu), (\lambda), (\eta), (\lambda^0), (\lambda^1), (\lambda^2), (\lambda^3) \\
 e_{\lambda t}^- - e_{\lambda t}^+ & \leq - \sum_p \sum_i [(\lambda - \varphi_r) Pe_{pi}(\tau) + \varphi_r Pe_{pi}(\lambda)] Y_{pit} - \sum_p \sum_i \sum_j [(\lambda - \varphi_r) Te_{pi}(\tau) + \varphi_r Te_{pi}(\lambda)] X_{pijt} \\
 & + [(\lambda - \varphi_\delta) C_{\lambda t}^{cap} + \varphi_\delta C_{\lambda t}^{cap}] \quad \forall t
 \end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned}
 e_{\tau t}^- - e_{\tau t}^+ & \leq - \sum_j [(\lambda - \varphi_\epsilon) Pe_{\tau}(\nu) + \varphi_\epsilon Pe_{\tau}(\lambda)] Z_{jt} - \sum_j \sum_m [(\lambda - \varphi_\nu) Te_{\tau}(\nu) + \varphi_\nu Te_{\tau}(\lambda)] W_{jmt} \\
 & - [(\lambda - \varphi_\lambda) C_{\tau t}^{cap} + \varphi_\lambda C_{\tau t}^{cap}] \quad \forall t
 \end{aligned} \tag{36}$$

$$e_{\lambda t}^-, e_{\lambda t}^+, e_{\tau t}^-, e_{\tau t}^+ \geq 0 \quad \forall t \tag{37}$$

معادل قطعی مدل غیرقطعی سیاست جبران کربن

$$\begin{aligned}
 Max z = & \sum_t \frac{1}{(\lambda+\nu)^{t-1}} \left[\sum_j \sum_m \left(\frac{R_t(\lambda)+R_t(\nu)+R_t(\tau)+R_t(\xi)}{\varphi} \right) w_{jmt} \right. \\
 & - \sum_p \sum_i \left(\frac{Hc_{pit}(\lambda)+Hc_{pit}(\nu)+Hc_{pit}(\tau)+Hc_{pit}(\xi)}{\varphi} \right) Y_{pit} - \sum_p \sum_i \left(\frac{Cc_{pit}(\lambda)+Cc_{pit}(\nu)+Cc_{pit}(\tau)+Cc_{pit}(\xi)}{\varphi} \right) Y_{pit} \\
 & - \sum_p \sum_i \sum_j \left(\frac{Tc_{pijt}(\lambda)+Tc_{pijt}(\nu)+Tc_{pijt}(\tau)+Tc_{pijt}(\xi)}{\varphi} \right) D_{ij} X_{pijt} - \sum_j \left(\frac{Pc_{jt}(\lambda)+Pc_{jt}(\nu)+Pc_{jt}(\tau)+Pc_{jt}(\xi)}{\varphi} \right) z_{jt} \\
 & \left. - \sum_j \sum_m \left(\frac{Tc_{jmt}(\lambda)+Tc_{jmt}(\nu)+Tc_{jmt}(\tau)+Tc_{jmt}(\xi)}{\varphi} \right) D_{jm} W_{jmt} - \theta_t e_{\lambda t}^+ - \theta_t e_{\tau t}^+ \right]
 \end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned}
 s.t. & (\varphi), (\delta), (\epsilon), (\nu), (\lambda), (\eta), (\lambda^0), (\lambda^1), (\lambda^2), (\lambda^3) \\
 -e_{\lambda t}^+ & \leq - \sum_p \sum_i [(\lambda - \varphi_r) Pe_{pi}(\tau) + \varphi_r Pe_{pi}(\lambda)] Y_{pit} - \sum_p \sum_i \sum_j [(\lambda - \varphi_r) Te_{pi}(\tau) + \varphi_r Te_{pi}(\lambda)] X_{pijt} \\
 & + [(\lambda - \varphi_\delta) C_{\lambda t}^{cap} + \varphi_\delta C_{\lambda t}^{cap}] \quad \forall t
 \end{aligned} \tag{39}$$

$$\begin{aligned}
 -e_{\tau t}^+ & \leq - \sum_j [(\lambda - \varphi_\epsilon) Pe_{\tau}(\nu) + \varphi_\epsilon Pe_{\tau}(\lambda)] Z_{jt} - \sum_j \sum_m [(\lambda - \varphi_\nu) Te_{\tau}(\nu) + \varphi_\nu Te_{\tau}(\lambda)] W_{jmt} \\
 & - [(\lambda - \varphi_\lambda) C_{\tau t}^{cap} + \varphi_\lambda C_{\tau t}^{cap}] \quad \forall t
 \end{aligned} \tag{40}$$

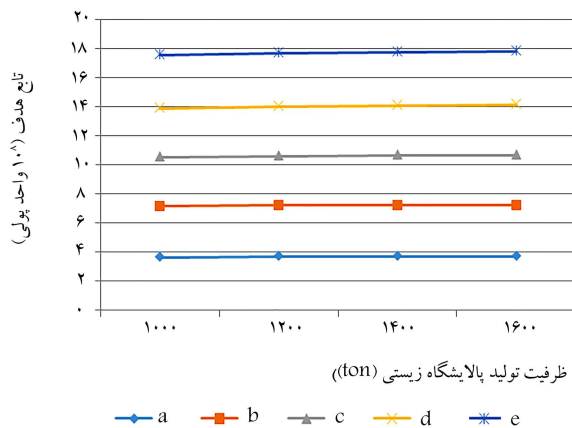
$$e_{\lambda t}^+, e_{\tau t}^+ \geq 0 \quad \forall t \tag{41}$$

به ترتیب مدل اصلی بدون در نظر گرفتن سیاست‌های کربن، مدل اصلی با در نظر گرفتن سیاست‌های ۱ الی ۴ را نشان می‌دهند. در شکل ۳ تأثیر پارامتر تقاضای بازار بر مقدار تابع هدف نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود در اثر افزایش این پارامتر در تمام مدل‌ها، روند تغییرات تابع هدف افزایشی است. چرا که با افزایش تقاضای بازار میزان تولید و میزان فروش بالابیشگاه زیستی نیز افزایش می‌یابد؛ در نتیجه مقدار تابع هدف افزایش خواهد یافت.

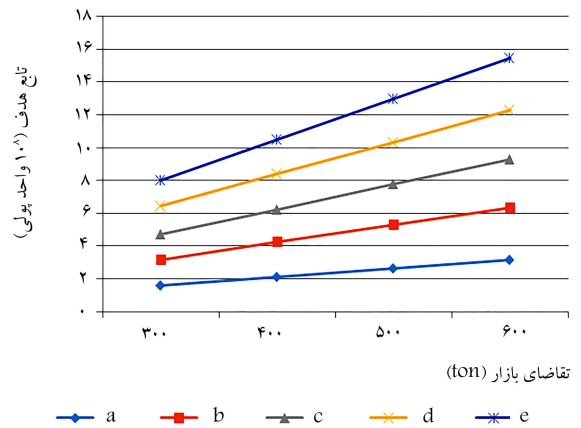
فروش سوخت سبز و ثابت ماندن هزینه‌هایی مثل هزینه کشت، برداشت و جمع‌آوری پسماندهای کشاورزی، هزینه تولید سوخت سبز و هزینه‌های ناشی از حمل و نقل، مقدار تابع هدف افزایش یابد. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان برای دست‌یابی به سود بیشتر، قیمت فروش سوخت سبز را تا حد معقولی که مورد پذیرش بازار مصرف باشد، افزایش داد البته با تلاش بر ثابت نگه داشتن هزینه‌ها که خود امری دشوار است، این هدف تحقق می‌یابد. توجه داشته باشید که در نمودارها a, b, c, d, e و

جدول ۴. مقدارهای تابع هدف قطعی و فازی محدودیت شانس در سیاست‌های مختلف.

مثال عددی	مدل	مقدار تابع هدف فازی محدودیت شانس			مقادیر تابع هدف قطعی
		$\varphi = 0/5$	$\varphi = 0/7$	$\varphi = 0/9$	
۱	مدل اصلی	$1/0.94822 \times 10^4$	$1/0.73988 \times 10^4$	$1/0.53134 \times 10^4$	$9/0.67013 \times 10^7$
	سیاست ۱	$1/0.77010 \times 10^4$	$1/0.54529 \times 10^4$	$9/90.9745 \times 10^7$	$7/52291.0 \times 10^7$
	سیاست ۲	$1/0.79576 \times 10^4$	$1/0.59013 \times 10^4$	$1/0.38449 \times 10^4$	$8/94447 \times 10^7$
	سیاست ۳	$1/1.04523 \times 10^4$	$1/1.32837 \times 10^4$	$1/1.22426 \times 10^4$	$9/10.8042 \times 10^7$
	سیاست ۴	$1/0.94026 \times 10^4$	$1/0.73491 \times 10^4$	$1/0.52761 \times 10^4$	$8/988126 \times 10^7$
۲	مدل اصلی	$3/82444 \times 10^4$	$3/75256 \times 10^4$	$3/68067 \times 10^4$	$2/95244 \times 10^8$
	سیاست ۱	$3/75489 \times 10^4$	$3/66616 \times 10^4$	$3/55220 \times 10^4$	$2/85664 \times 10^8$
	سیاست ۲	$3/52345 \times 10^4$	$3/48580 \times 10^4$	$3/41811 \times 10^4$	$2/94409 \times 10^8$
	سیاست ۳	$3/52376 \times 10^4$	$3/48289 \times 10^4$	$3/42998 \times 10^4$	$3/00689 \times 10^8$
	سیاست ۴	$3/81278 \times 10^4$	$3/74192 \times 10^4$	$3/67070 \times 10^4$	$2/93610 \times 10^8$
۳	مدل اصلی	$8/93027 \times 10^4$	$8/76017 \times 10^4$	$8/59007 \times 10^4$	$7/36878 \times 10^8$
	سیاست ۱	$8/76185 \times 10^4$	$8/56951 \times 10^4$	$8/36501 \times 10^4$	$6/75531 \times 10^8$
	سیاست ۲	$8/75075 \times 10^4$	$8/58407 \times 10^4$	$8/41739 \times 10^4$	$7/24959 \times 10^8$
	سیاست ۳	$8/71863 \times 10^4$	$8/58075 \times 10^4$	$8/44228 \times 10^4$	$7/22456 \times 10^8$
	سیاست ۴	$8/92997 \times 10^4$	$8/75993 \times 10^4$	$8/58989 \times 10^4$	$7/23619 \times 10^8$
۴	مدل اصلی	$2/87289 \times 10^9$	$2/81915 \times 10^9$	$2/76443 \times 10^9$	$2/37914 \times 10^9$
	سیاست ۱	$2/87340 \times 10^9$	$2/81669 \times 10^9$	$2/76393 \times 10^9$	$2/37199 \times 10^9$
	سیاست ۲	$2/87195 \times 10^9$	$2/81729 \times 10^9$	$2/76255 \times 10^9$	$2/37852 \times 10^9$
	سیاست ۳	$2/97986 \times 10^9$	$2/92214 \times 10^9$	$2/86773 \times 10^9$	$2/48221 \times 10^9$
	سیاست ۴	$2/87346 \times 10^9$	$2/81878 \times 10^9$	$2/76406 \times 10^9$	$2/37907 \times 10^9$
۵	مدل اصلی	$4/58957 \times 10^9$	$4/50215 \times 10^9$	$4/41473 \times 10^9$	$3/79960 \times 10^9$
	سیاست ۱	$4/58893 \times 10^9$	$4/50152 \times 10^9$	$4/41411 \times 10^9$	$3/79239 \times 10^9$
	سیاست ۲	$4/58653 \times 10^9$	$4/49920 \times 10^9$	$4/41183 \times 10^9$	$3/79832 \times 10^9$
	سیاست ۳	$4/74023 \times 10^9$	$4/65079 \times 10^9$	$4/56152 \times 10^9$	$3/94610 \times 10^9$
	سیاست ۴	$4/58915 \times 10^9$	$4/50164 \times 10^9$	$4/41226 \times 10^9$	$3/79942 \times 10^9$
۶	مدل اصلی	$7/87136 \times 10^9$	$7/72143 \times 10^9$	$7/57150 \times 10^9$	$6/51870 \times 10^9$
	سیاست ۱	$7/87135 \times 10^9$	$7/72142 \times 10^9$	$7/57149 \times 10^9$	$6/51235 \times 10^9$
	سیاست ۲	$7/86880 \times 10^9$	$7/71899 \times 10^9$	$7/56903 \times 10^9$	$6/51690 \times 10^9$
	سیاست ۳	$8/11098 \times 10^9$	$7/95822 \times 10^9$	$7/80543 \times 10^9$	$6/74956 \times 10^9$
	سیاست ۴	$7/87136 \times 10^9$	$7/72143 \times 10^9$	$7/57150 \times 10^9$	$6/51867 \times 10^9$



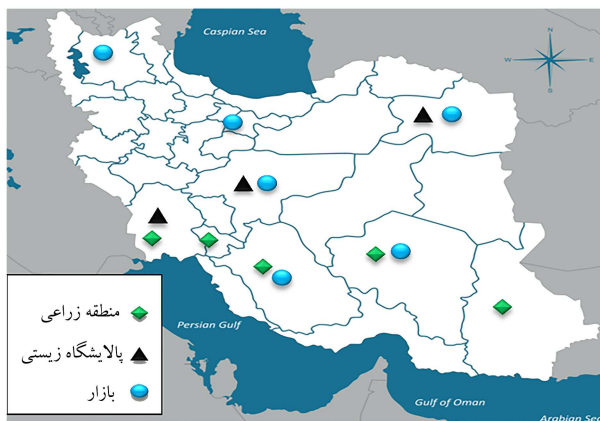
شکل ۴. تأثیر پارامتر ظرفیت تولید پالایشگاه بر مقدار تابع هدف.



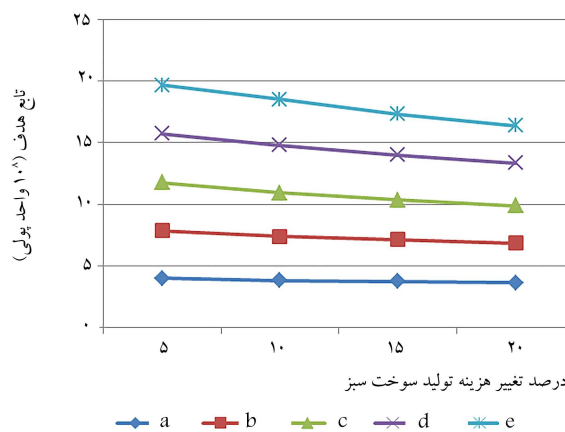
شکل ۳. تأثیر پارامتر تقاضای بازار بر مقدار تابع هدف.

زیستی نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود در تمام مدل‌ها با افزایش ظرفیت تولید، میزان تابع هدف با شیب بسیار کم افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به ظرفیتی مشخص دیگر مقدار تابع هدف با افزایش ظرفیت تولید تغییر نمی‌کند. در مدل اصلی بدون در نظر گرفتن سیاست و در سیاست‌های ۱ و ۴ مقدار تابع هدف از ظرفیت ۱۴۰۰ تن به بعد ثابت می‌شود و در سایر سیاست‌ها هم پس از رسیدن به ظرفیتی معین دیگر تغییر نمی‌کند. این امر به این دلیل اتفاق می‌افتد که افزایش ظرفیت تولید تا حد معینی باعث افزایش سود می‌شود و از آن حد به بعد با

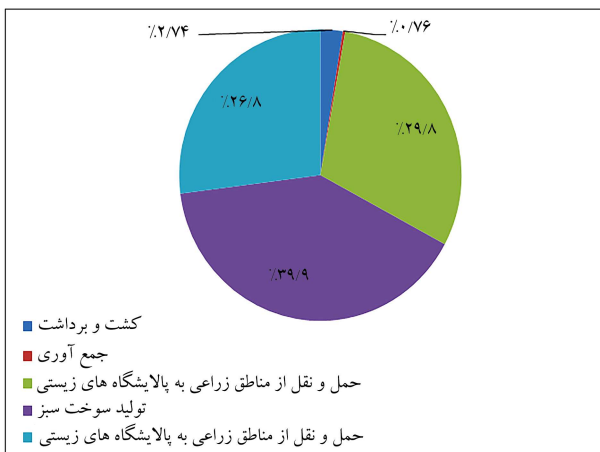
بنابراین برای دستیابی به سود بیشتر باید تقاضای بازار را با استفاده از روش‌های کمی و کیفی مختلف نظیر روش دلفی، تحلیل سری‌های زمانی و تحلیل همبستگی به صورت صحیح پیش‌بینی کرد و با راهکارهایی نظیر تولید در شیفت‌های اضافه‌کاری کل تقاضای بازار را برآورده کرد تا سود زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز به میزان قابل توجهی افزایش یابد. توجه به ظرفیت تولید پالایشگاه زیستی برای تحقق این هدف نیز امری ضروری است. در شکل ۴ تغییرات تابع هدف نسبت به تغییر پارامتر ظرفیت تولید پالایشگاه



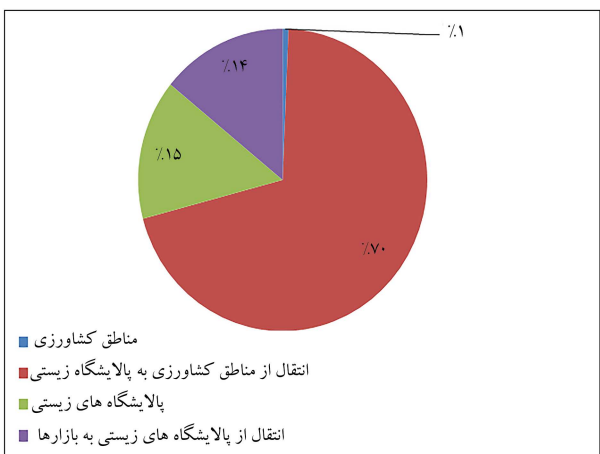
شکل ۶. مکان‌های داوطلب تسهیلات.



شکل ۵. تأثیر درصد تغییر هزینه تولید سوخت سبز بر مقدار تابع هدف.



شکل ۷. هزینه بخش‌های مختلف مدل اصلی.



شکل ۸. انتشار دی‌اکسید کربن در بخش‌های مختلف مدل اصلی.

مربوط به بخش حمل و نقل است که به منظور کاهش این مقدار، لازم است راهکارهایی ارائه شود. در این مقاله از ۴ سیاست مختلف کاهش انتشار کربن به‌عنوان راهکارهای اثربخش استفاده شده است. در جدول ۵ نتایج حاصل از حل مدل برای مطالعه موردی با در نظر گرفتن سیاست‌های کاهش انتشار کربن به ازای سه سطح مختلف عدم قطعیت ارائه شده است.

با توجه به جدول ۵، زمانی که سیاست ۱، ۲ و ۴ به ترتیب در زنجیره‌ی تأمین

توجه به ثابت ماندن تقاضای بازار مصرف و محدودیت‌های ناشی از سیاست‌های انتشار کربن، ثابت می‌ماند. بنابراین تعیین ظرفیت تولید با توجه به تقاضای بازار و سیاست‌های کربن اهمیت بسیاری در سودآوری دارد.

در شکل ۵ تأثیر درصد تغییر هزینه تولید سوخت سبز در پالایشگاه‌های زیستی بر مقدار تابع هدف نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود در اثر افزایش درصد تغییر این پارامتر روند تغییرات در تمام مدل‌ها کاهش می‌یابد. هزینه تولید سوخت سبز و ثابت ماندن سایر پارامترها مانند درآمد حاصل از فروش سوخت سبز، هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین افزایش یافته و میزان سودآوری کاهش می‌یابد. بنابراین برای جلوگیری از کاهش سود زنجیره‌ی تأمین می‌توان قیمت فروش سوخت سبز در بازار را افزایش داد.

۷. مطالعه‌ی موردی

با توجه به رشد جمعیت، استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی و اهمیت مسائل زیست‌محیطی، تولید و استفاده از سوخت سبز در ایران اهمیت زیادی دارد.^[۴۰] ایران به واسطه‌ی موقعیت جغرافیایی خود پتانسیل حائز اهمیتی برای کشت و پرورش گیاهانی که به‌عنوان ماده اولیه در تولید سوخت سبز استفاده می‌شود، دارد. ذرت، نیسکر، آفتابگردان نمونه‌هایی از این گیاهان هستند.^[۴۱] در این نوشتار علاوه بر مکان‌یابی بهینه برای احداث پالایشگاه‌های زیستی، نحوه‌ی عملکرد سیاست‌های مختلف کاهش انتشار کربن در زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز نیز بررسی می‌شود. بدین منظور از دو نوع پسماند ذرت و نیسکر تأمین شده توسط ۵ منطقه‌ی زراعی استفاده می‌شود که به ۳ پالایشگاه زیستی کاندید انتقال می‌یابند. سوخت سبز تولید شده در این پالایشگاه‌ها به ۶ بازار در ۴ دوره زمانی ارسال می‌شود.

در شکل ۶، مکان‌های کاندید برای مناطق زراعی و پالایشگاه‌های زیستی به کارگرفته شده در زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز در ایران نشان داده شده است. در شکل ۷، هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز برای مدل اصلی قطعی مطالعه‌ی موردی نشان داده شده است. بر این اساس مشخص می‌شود که هزینه‌های تولید و حمل و نقل درصد زیادی از هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین را تشکیل می‌دهند. برای کاهش این هزینه‌ها می‌توان راهکاری مانند افزایش ظرفیت تولیدی پالایشگاه‌های زیستی با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های جدید ارائه داد.

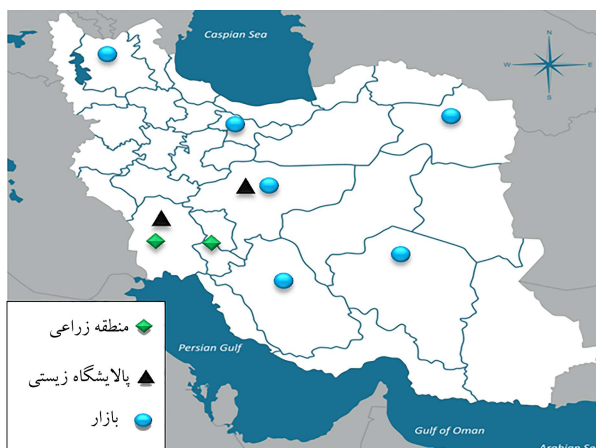
شکل ۸، میزان انتشار دی‌اکسید کربن در مدل اصلی قطعی مطالعه موردی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، بخش قابل توجهی از انتشارات دی‌اکسید کربن

جدول ۵. مقدارهای تابع هدف قطعی و فازی محدودیت شانس در سیاست‌های مختلف مطالعه موردی.

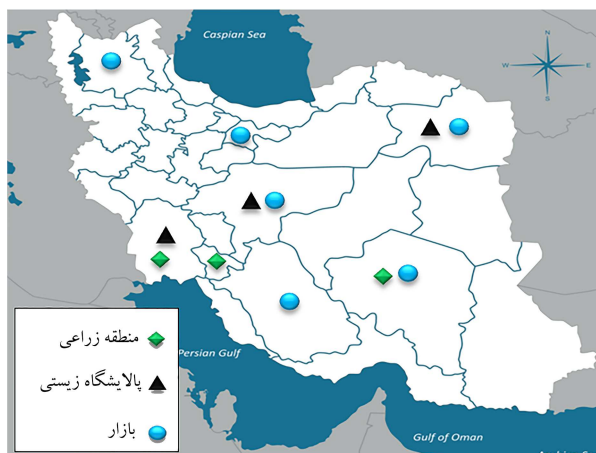
مقدار تابع هدف قطعی	مقدار تابع هدف فازی محدودیت شانس			مدل
	$\varphi = 0,9$	$\varphi = 0,7$	$\varphi = 0,5$	
$2,578736 \times 10^8$	$3,412926 \times 10^8$	$3,480509 \times 10^8$	$3,548092 \times 10^8$	مدل اصلی
$2,495398 \times 10^8$	$3,415449 \times 10^8$	$3,483312 \times 10^8$	$3,551130 \times 10^8$	سیاست ۱
$2,571130 \times 10^8$	$3,304257 \times 10^8$	$3,369688 \times 10^8$	$3,435119 \times 10^8$	سیاست ۲
$4,830129 \times 10^8$	$5,736304 \times 10^8$	$5,798462 \times 10^8$	$5,860330 \times 10^8$	سیاست ۳
$2,577926 \times 10^8$	$3,437548 \times 10^8$	$3,505618 \times 10^8$	$3,573688 \times 10^8$	سیاست ۴

جدول ۶. مقدارهای دی‌اکسید کربن منتشر شده در مدل‌های قطعی و فازی محدودیت شانس در سیاست‌های مختلف مطالعه موردی.

مقدار دی‌اکسید کربن منتشر شده	مقدار دی‌اکسید کربن منتشر شده در مدل‌های فازی محدودیت شانس			مدل
	$\varphi = 0,9$	$\varphi = 0,7$	$\varphi = 0,5$	
$1,681367 \times 10^6$	$2,754442 \times 10^6$	$2,786445 \times 10^6$	$2,876400 \times 10^6$	مدل اصلی
$1,631914 \times 10^6$	$2,651247 \times 10^6$	$2,708866 \times 10^6$	$2,765554 \times 10^6$	سیاست ۱
$1,631003 \times 10^6$	$2,654332 \times 10^6$	$2,846787 \times 10^6$	$2,935678 \times 10^6$	سیاست ۲
$1,615788 \times 10^6$	$2,800124 \times 10^6$	$2,885433 \times 10^6$	$2,982156 \times 10^6$	سیاست ۳
$1,657844 \times 10^6$	$2,700571 \times 10^6$	$2,757885 \times 10^6$	$2,864567 \times 10^6$	سیاست ۴



شکل ۹. مکان تسهیلات در مدل اصلی.



شکل ۱۰. مکان تسهیلات تحت سیاست ۱.

سوخت سبز به کار گرفته شود، در حالت قطعی میزان سودآوری به اندازه $3,24\%$ ، 30% و 40% کاهش می‌یابد و تنها با اعمال سیاست ۳ میزان سودآوری به اندازه $87,3\%$ افزایش می‌یابد. بنابراین درآمد حاصل از فروش سوخت سبز در پالایشگاه‌های زیستی تحت سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشترین مقدار مجاز، بیشتر از درآمد حاصل از فروش سایر سیاست‌ها است. به کارگیری سیاست بیشینه مقدار مجاز انتشار کربن، سیاست مالیات کربن و سیاست جبران کربن در پالایشگاه زیستی موجب کاهش درآمد حاصل از فروش می‌شود، زیرا تحت این سیاست پالایشگاه‌های زیستی با محدودیت تولید مواجه می‌شوند و نمی‌توانند سوخت سبز بیشتری تولید کنند.

در جدول ۶ میزان انتشار دی‌اکسید کربن منتشر شده تحت سیاست‌های مختلف کاهش انتشار کربن ارائه شده است. چنان که مشهود است، مقدار انتشار دی‌اکسید کربن منتشر شده در حالت قطعی تحت سیاست‌های ۱ تا ۴ به میزان $2,95\%$ ، $2,92\%$ ، $3,91\%$ و $1,40\%$ به ترتیب کاهش می‌یابد. مقدار انتشار دی‌اکسید کربن تحت سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشترین مقدار مجاز به میزان بیشتری کاهش می‌یابد. پس می‌توان نتیجه گرفت که سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز علاوه بر این که باعث افزایش سودآوری زنجیره‌ی تأمین سوخت سبز می‌شود، راهکار مناسبی برای کاهش میزان انتشارات در بخش‌های مختلف زنجیره‌ی تأمین به حساب می‌آید.

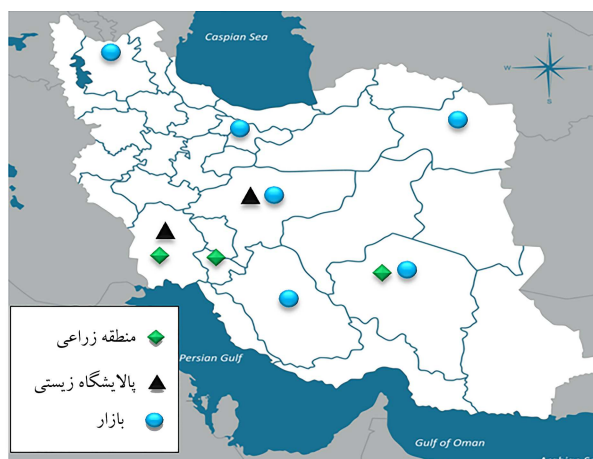
نتایج حاصل از حل مدل اصلی و مدل تحت سیاست‌های مختلف با سطح عدم قطعیت $0,9$ در شکل‌های ۹ تا ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل‌ها مناطق زراعی برای تأمین پسماندهای ذرت و نیشکر، مکان تأسیس پالایشگاه‌های زیستی و بازارهای مصرف مشخص شده است. به عنوان نمونه در شکل ۱۰ زمانی که مدل اصلی تحت سیاست بیشینه مقدار مجاز انتشار کربن به اجرا درمی‌آید، سه پالایشگاه زیستی در استان‌های خراسان رضوی، اصفهان و خوزستان احداث می‌شود که از پسماندهای نیشکر و ذرت برای تولید سوخت سبز استفاده می‌کنند. این پسماندها از مناطق زراعی واقع در استان‌های کهگیلویه و بویر احمد، کرمان

کرد و همچنین مناطق زراعی بیشتری باید در نظر گرفت تا بتوان کل مواد اولیه مورد نیاز برای تولید سوخت سبز را فراهم کرد. سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشترین مقدار مجاز با افزایش سودآوری و کاهش میزان انتشارات دی‌اکسید کربن در زنجیره تأمین به‌عنوان بهترین سیاست برای پیاده‌سازی در این مطالعه شناخته می‌شود.

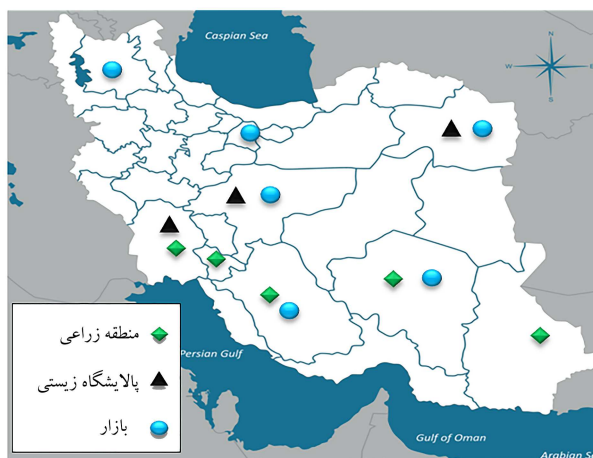
۸. نتیجه‌گیری

با توجه به آثار مخرب سوخت‌های غیرقابل تجدید فسیلی بر زندگی بشر و محیط زیست، نیاز به طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت سبز روز به روز افزایش می‌یابد. برای توسعه سوخت سبز از پسماندهای کشاورزی، در این مقاله یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین پایدار چندسطحی شامل مناطق زراعی، پالایشگاه‌های زیستی و بازارهای مصرف با هدف بهینه‌سازی سود حاصل از فروش سوخت سبز ارائه شد. از آنجا که انتشار دی‌اکسید کربن و گازهای گلخانه‌ای در حین تولید سوخت سبز موجب گرمایش جهانی می‌شود، توجه به مسائل زیست‌محیطی در طراحی مدل اهمیت می‌یابد. به منظور بررسی تأثیرات زیست‌محیطی، چهار سیاست مختلف انتشار کربن شامل سیاست بیشینه میزان مجاز انتشار کربن، مالیات کربن، طرح ترکیبی تجارت کربن و بیشترین مقدار مجاز و طرح جبران کربن بررسی شد. نظر به این که بسیاری از پارامترهای زنجیره تأمین سوخت سبز ماهیت غیرقطعی دارند، عدم قطعیت پارامترهایی نظیر درآمد حاصل از فروش سوخت سبز، هزینه کشت، برداشت، جمع‌آوری، حمل و نقل و تولید هر واحد سوخت سبز بررسی شد. همچنین از رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها استفاده شد. در نهایت کارایی مدل پیشنهادی با استفاده از مثال‌های عددی و مطالعه موردی بررسی و تحلیل حساسیت سود زنجیره تأمین نیز انجام شد. طبق نتایج عددی، سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز می‌تواند باعث افزایش سودآوری زنجیره تأمین شود که با توجه به شرایط اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی کشور می‌توان از آن برای دست‌یابی به سود بالاتر استفاده کرد. همچنین نتایج حاصل از مطالعه موردی نشان می‌دهد که پیاده‌سازی سیاست ترکیبی تجارت کربن و بیشینه مقدار مجاز علاوه بر افزایش سودآوری باعث کاهش میزان انتشارات دی‌اکسید کربن در زنجیره تأمین سوخت سبز نیز می‌شود.

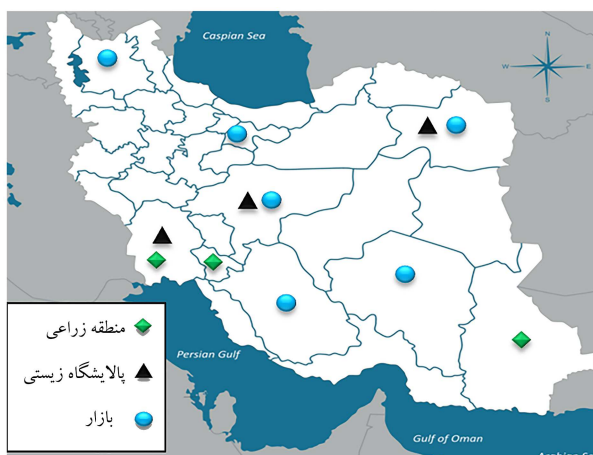
برای تحقیقات آتی، می‌توان عدم قطعیت پارامترهای مدل پیشنهادی را در مدل‌سازی زنجیره تأمین سوخت سبز با استفاده از دیگر رویکردهای برخورد با عدم قطعیت نظیر برنامه‌ریزی تصادفی و نظریه‌ی فازی مهار کرد و نتایج را با رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس مقایسه کرد. همچنین می‌توان علاوه بر بعد اقتصادی، دیگر ابعاد پایداری زنجیره تأمین را مورد بررسی قرار داد و توابع هدف اجتماعی و زیست‌محیطی را در نظر گرفت. با توجه به اهمیت انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش در زنجیره تأمین، می‌توان از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند تاپسیس و ویکور برای اولویت‌بندی مناطق زراعی به‌عنوان تأمین‌کننده‌ی پسماندهای زراعی استفاده کرد و تخصیص سفارش به آن‌ها را انجام داد. علاوه بر این‌ها اضافه کردن لایه‌های بیشتر به زنجیره تأمین مانند مرکز پیش پردازش و مراکز توزیع برای بررسی زنجیره تأمین به صورت گسترده‌تر و کلی‌تر می‌توان پیشنهاد جالبی برای توسعه مدل ارائه شده در تحقیقات آتی باشد.



شکل ۱۱. مکان تسهیلات تحت سیاست ۲.



شکل ۱۲. مکان تسهیلات تحت سیاست ۳.



شکل ۱۳. مکان تسهیلات تحت سیاست ۴.

و خوزستان تأمین می‌شوند. سوخت سبز تولید شده باید تمام تقاضای بازارهای واقع در استان‌های آذربایجان شرقی، تهران، خراسان رضوی، اصفهان، فارس و کرمان را پوشش دهد. با توجه به نتایج حاصل از حل مدل‌ها در مطالعه موردی می‌توان نتیجه گرفت که با به‌کارگیری سیاست‌های کاهش انتشار کربن تعداد پالایشگاه‌های زیستی بیشتری باید تأسیس شود تا بتوان تقاضای بازار را تأمین

1. Bushel

منابع (References)

1. Asadi, E., Habibi, F., Nickel, S. and et al. "A bi-objective stochastic location-inventory-routing model for microalgae-based biofuel supply chain", *Applied Energy*, **228**, pp. 2235-2261 (2018).
2. EIA. "World proved reserves of oil and natural gas, most recent estimates", EIA (2009).
3. Herzog, H.J. and Drake, E.M. "Carbon dioxide recovery and disposal from large energy systems", *Annual Review of Energy and the Environment*, **21**(1), pp. 145-166 (1996).
4. Brennan, L. and Owende, P. "Biofuels from microalgae-a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products", *Renew Sustain Energy Review*, **14**(2), pp. 557-577 (2010).
5. Cambero, C. and Sowlati, T. "Incorporating social benefits in multi-objective optimization of forest-based bioenergy and biofuel supply chains", *Applied Energy*, **178**, pp. 721-735 (2016).
6. Lee, K.H. "Integrating carbon footprint into supply chain management: the case of hyundai motor company (HMC) in the automobile industry", *Journal of Cleaner Production*, **19**(11), pp. 1216-1223 (2011).
7. Bozbas, K. "Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the European Union", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**(2), pp. 542-552 (2008).
8. Sharma, B., Ingalls, R.G., Jones, C.L. and et al. "Biomass supply chain design and analysis: basis, overview, modeling, challenges, and future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **24**, pp. 608-627 (2013).
9. Shalaby, A., *Biofuel: Sources, Extraction and Determination. Liquid, Gaseous and Solid Biofuels-Conversion Techniques*, Croatia: In Tech, pp. 451-78 (2013).
10. EIA. "International energy outlook report", Energy Information Administration Washington, US. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484%282013%29.pdf>, (2013).
11. IEA. "CO2 Emissions from fuel combustion", International Energy Agency Statistics, Paris, France. http://www.iea.org/publications/free_publications/publication/CO2emissionfromfuelcombustion_HIGHLIGHTS.pdf (2012).
12. WWF. "Sustainability standards for bioenergy. report", World Wide Fund for Nature, Frankfurt, Germany. http://www.biofuelstp.eu/downloads/WWF_Sustainable_Bioenergy_final_version.pdf (2006).
13. Naik, S.N., Goud, V.V., Rout, P.K. and et al. "Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(2), pp. 578-597 (2010).
14. Edwards, R., Mahieu, V., Griesemann, J.C. and et al. "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context", *SAE Transactions*, pp. 1072-1084 (2004).
15. Hombach, L.E., Cambero, C., Sowlati, T. and et al. "Optimal design of supply chains for second generation biofuels incorporating European biofuel regulations", *Journal of Cleaner Production*, **133**, pp. 565-575 (2016).
16. Bokhari, A., Chuah, L.F., Yusup, S. and et al. "Cleaner production of rubber seed oil methyl ester using a hydrodynamic cavitation: optimisation and parametric study", *Journal of Cleaner Production*, **136**, pp. 31-41 (2016).
17. Ghafoor, A., ur Rehman, T., Munir, A. and et al. "Current status and overview of renewable energy potential in Pakistan for continuous energy sustainability", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **60**, pp. 1332-1342 (2016).
18. Shankar, R., Gupta, R. and Pathak, D.K. "Modeling critical success factors of traceability for food logistics system", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **119**, pp. 205-222 (2018).
19. AFDC. "Alternative fuels data center", <https://afdc.energy.gov/data/10339>, (2016).
20. Arnold, K., Targiel, T., Zeiss, C. and et al. "BioCoupleskopplung der stofflich/ energetischen Nutzung von Biomasse: analyse und bewertung der konzepte und der einbindung in bestehende bereitstellungs-und nutzungszenarien", *Endbericht* (2014).
21. Hugo, A. and Pistikopoulos, E.N. "Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks", *Journal of Cleaner Production*, **13**(15), pp. 1471-1491 (2005).
22. Guillén-Gosálbez, G. and Grossmann, I.E. "Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty", *AIChE Journal*, **55**(1), pp. 99-121 (2009).
23. You, F. and Wang, B. "Life cycle optimization of biomass-to-liquid supply chains with distributed-centralized processing networks", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50**(17), pp. 10102-10127 (2011).
24. Nikolopoulou, A. and Ierapetritou, M.G. "Optimal design of sustainable chemical processes and supply chains: a review", *Computers & Chemical Engineering*, **44**, pp. 94-103 (2012).
25. De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmäki, J. and et al. "Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **31**, pp. 657-670 (2014).
26. Azadeh, A., Arani, H.V. and Dashti, H. "A stochastic programming approach towards optimization of biofuel supply chain", *Energy*, **76**, pp. 513-525 (2014).
27. Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J. and et al. "Sustainable supply chain network design: an optimization-oriented review", *Omega*, **54**, pp. 11-32 (2015).

28. Ren, J., An, D., Liang, H. and et al. "Life cycle energy and CO₂ emission optimization for biofuel supply chain planning under uncertainties", *Energy*, **103**, pp. 151-166 (2016).
29. 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).
30. Fattahi, M. and Govindan, K. "A multi-stage stochastic program for the sustainable design of biofuel supply chain networks under biomass supply uncertainty and disruption risk: a real-life case study", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **118**, pp. 534-567 (2018).
31. Chávez, M.M.M., Sarache, W. and Costa, Y. "Towards a comprehensive model of a biofuel supply chain optimization from coffee crop residues", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **116**, pp. 136-162 (2018).
32. Nugroho, Y.K. and Zhu, L. "Platforms planning and process optimization for biofuels supply chain", *Renewable Energy*, **140**, pp. 563-579 (2019).
33. Ghosh, T. and Bakshi, B.R. "Designing biofuel supply chains while mitigating harmful algal blooms with treatment wetlands", *Computers & Chemical Engineering*, **126**, pp. 113-127 (2019).
34. Kesharwani, R., Sun, Z., Dagli, C. and et al. "Moving second generation biofuel manufacturing forward: investigating economic viability and environmental sustainability considering two strategies for supply chain restructuring", *Applied Energy*, **242**, pp. 1467-1496 (2019).
35. Esmaili, S.A.H., Szmerekovsky, J., Sobhani, A. and et al. "Sustainable biomass supply chain network design with biomass switching incentives for first-generation bioethanol producers", *Energy Policy*, p. 111222 (2020).
36. Mahjoub, N., Sahebi, H., Mazdeh, M. and et al. "Optimal design of the second and third generation biofuel supply network by a multi-objective model", *Journal of Cleaner Production*, **256**, p. 120355 (2020).
37. Kang, S., Heo, S., Reaff, M.J. and et al. "Three-stage design of high-resolution microalgae-based biofuel supply chain using geographic information system", *Applied Energy*, **265**, p. 114773 (2020).
38. Inuiguchi, M. and Ramk, J. "Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem", *Fuzzy Sets and Systems*, **111**(1), pp. 3-28 (2000).
39. Talaei, M., Moghaddam, B.F., Pishvae, M.S. and et al. "A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry", *Journal of Cleaner Production*, **113**, pp. 662-673 (2016).
40. Mohseni, S. and Pishvae, M.S. "Supply chain management models for the development of green fuel production from microalgae in Iran", *Journal Of Environmental Science And Technology*, **20** (81), pp. 189-210 (2019).
41. Babazadeh, R., Ghaderi, H. and Pishvae, M.S. "A benders-local branching algorithm for second-generation biodiesel supply chain network design under epistemic uncertainty", *Computers & Chemical Engineering*, **124**, pp. 364-380 (2019).