

پیکره‌بندی مدل ریاضی دو مرحله‌ای برای مدیریت زنجیره تأمین سبز

مریم کولیانی^۱، عادل آذر^{۲*}، علی رجب‌زاده قطری^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۲- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۳- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۸

چکیده

هدف این مطالعه، ارائه یک مدل یکپارچه برای زنجیره تأمین سبز با حلقه بسته یک کارخانه فعال در صنعت شیشه تحت شرایط ابهام و عدم قطعیت است. مدل شامل دو مرحله است. در مرحله اول از روش تاپسیس فازی برای ارزیابی تأمین‌کننده‌ها برحسب معیارهای کمی و کیفی استفاده شده است. خروجی این مرحله وزن تأمین‌کننده‌ها برای هر قطعه است که به عنوان پارامتر ورودی مرحله دوم مدل در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد یک مدل ریاضی استوار خطی چند هدفه عدد صحیح مختلط پیشنهاد می‌شود به طوری که تعداد بهینه قطعات و محصولات را در شبکه تعیین کند. همچنین به منظور تحلیل دقیق‌تر قابلیت مدل‌های استوار، از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد که نتایج نشان از قابلیت بسیار بالای مدل استوار نسبت به مدل قطعی در پاسخگویی به عدم قطعیت موجود در پارامترهای مسئله دارد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت زنجیره تأمین سبز، انتخاب تأمین‌کننده، بهبود استوار، رویکرد فازی، برنامه‌ریزی آرمانی.



۱- مقدمه

با افزایش قوانین و مقررات دولتی و بالا رفتن سطح آگاهی عمومی نسبت به اهمیت مسائل محافظت از محیط‌زیست، توجه به زنجیره تأمین سبز بیش از گذشته مورد توجه سازمان‌ها و پژوهشگران قرار گرفته است [۱؛ ۲]. سیرواستاوا (۲۰۰۷)، مدیریت زنجیره تأمین سبز را استراتژی یکپارچه‌سازی تفکر زیست‌محیطی با مسائل زنجیره تأمین تعریف کرد [۳]. سبز کردن زنجیره تأمین هم در سطح فردی و هم در سطح ملی برای شرکت‌ها مزایایی دارد از جمله آن می‌توان به بهبود موقعیت رقابتی شرکت از راه ایجاد تصویر سبز از سازمان اشاره کرد [۴]. انتخاب تأمین‌کننده سبز از جمله مهم‌ترین عواملی است که در طراحی زنجیره تأمین کارا و پایدار مورد توجه قرار می‌گیرد و تأثیرات معناداری بر هزینه کل محصول، سودآوری و انعطاف‌پذیری سازمان می‌گذارد و در نهایت موجب مزیت رقابتی سازمان می‌شود [۵-۸]. به‌علاوه رضایت مشتری که هدف غایی هر کسب‌وکار است، با انتخاب بهترین تأمین‌کننده‌ها افزایش پیدا می‌کند [۹]. پژوهش زیادی در حوزه زنجیره تأمین سبز نوشته شده است [۱۰؛ ۱۱-۱۴]. اما پژوهش‌های اندکی به مسئله انتشار گاز کربن در تولید و ارزیابی تأمین‌کننده پرداختند. والتو و همکاران (۲۰۱۹) مروری بر طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز داشتند. آنها اذعان داشتند که از زمان انقلاب صنعتی انتشار گازهای گلخانه‌ای در آستانه تهدیدکننده خود قرار دارند. انتشار جهانی در ۲۰۱۱، ۱۵۰ برابر سال ۱۸۵۰ است. یکی از متشرکننده‌های اصلی گاز گلخانه‌ای، زنجیره تأمین هستند [۱۵]. همچنین مسئله انتخاب تأمین‌کننده در زنجیره تأمین به صورت یک فعالیت مجزا مورد توجه پژوهشگران بوده است و کمتر به صورت یک فعالیت یکپارچه در زنجیره در نظر گرفته شده است. به‌علاوه در پژوهش‌های انجام شده در حوزه طراحی مدل زنجیره تأمین سبز، معمولاً پارامترها به صورت قطعی در نظر گرفته می‌شدند، بنابراین مدل‌سازی‌ها به صورت قطعی بودند، در حالی که در واقعیت پارامترهایی مانند تقاضا ماهیت غیرقطعی دارند. همچنین در بیشتر مدل‌های زنجیره تأمین سبز، زنجیره تأمین به صورت تعادلی در نظر گرفته شده است، اما در عالم واقع برخی از قطعات و محصولات در طول زنجیره به دلایلی مانند ضایعات طی حمل‌ونقل و یا تولید از بین می‌روند، بنابراین زنجیره تأمین به‌خصوص برای کالاهای آسیب‌پذیر همچون شیشه باید به صورت ناقص در نظر گرفته



شود.

در این پژوهش با هدف غلبه بر خلأ تحقیقاتی ذکر شده، یک مدل یکپارچه شامل دو مرحله برای زنجیره تأمین سبز طراحی می‌شود. در مرحله اول با توجه به اینکه مسئله انتخاب تأمین‌کننده علاوه بر معیارهای کیفی مانند کیفیت، تحویل به موقع و ثبات مالی، معیارهای کمی را نیز در قالب توابع هدف مانند کاهش هزینه شامل می‌شود، از روش تاپسیس فازی برای غلبه بر ابهام و عدم قطعیت در تفکر گروه تصمیم‌گیرنده در ارزیابی و رتبه‌دهی به هر یک از تأمین‌کننده‌ها و پیمانکارها استفاده شده است. خروجی این مرحله به عنوان ورودی مرحله دوم استفاده می‌شود، به این صورت که از رتبه (وزن)‌های به دست آمده از مرحله اول به عنوان پارامتر ورودی یکی از توابع هدف در طراحی مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه استوار (مرحله دوم) استفاده می‌شود. پس از مرور ادبیات این نکته مستفاد می‌شود که مدل طراحی شده جز اولین پژوهش‌هایی است که فرایند ارزیابی و طراحی شبکه استوار برای زنجیره تأمین سبز را به صورت یکپارچه در محیط عدم قطعیت و ابهام در نظر گرفته است.

۲- پیشینه پژوهش

۲-۱ ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده سبز

اولین بررسی در مورد معیارهای انتخاب تأمین‌کننده به وسیله دیکسون (۱۹۹۶) انجام گرفت [۱۶]. پس از آن دسته‌بندی‌های متفاوتی از بهترین معیارهای انتخاب تأمین‌کننده به وسیله پژوهشگران ارائه شد، براساس نظر سرکیس و همکاران (۲۰۰۷) این معیارها با توجه به محیط پویای کسب‌وکار برحسب نیاز به تغییر در طول زمان دارند [۱۷]. تا با نیازهای روز سازمان برحسب نوع صنعت هماهنگ شود. پس از آن تحقیقات زیادی در زمینه ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده سبز انجام شده است و از روش‌های حل متفاوتی به آنها پرداخته شده است. هاشمی و همکاران (۲۰۱۵) معیارهای اقتصادی و محیطی را برای انتخاب و ارزیابی تأمین‌کننده سبز لحاظ کردند و از فرایند تحلیل سلسله مراتبی به این منظور استفاده کردند [۱۸]. بابر و امین (۲۰۱۸) برای انتخاب مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش به آنها برحسب معیارهای کمی و کیفی از مدل ریاضی چند هدفه استفاده کردند [۱۹]. یو و همکاران



(۲۰۱۸) نیز انتخاب تأمین‌کننده سبز را براساس معیارهای اقتصادی همچون قیمت، کیفیت و زمان تحویل و معیارهای محیطی از جمله میزان انتشار گاز کربن مورد توجه قرار دادند. توابع هدف در مدل آنها حداکثرسازی سود و عوامل سبز و حداقل‌سازی میزان انتشار گاز کربن بود [۲۰]. گارنیری و همکاران (۲۰۱۹) براساس سه معیار اصلی اجتماعی، اخلاقی و محیطی به مسئله انتخاب تأمین‌کننده پرداختند. آنها براساس روش الکترون به طبقه‌بندی تأمین‌کننده‌ها پرداختند و برای ارزیابی جواب‌ها از مثال عددی استفاده کردند [۲۱]. عبدالملکی و همکاران (۱۳۹۴) ضمن شناسایی جامع ریسک‌های تأمین‌کننده در صنعت تولید فولاد به روش کوره بلند، یک دسته‌بندی سلسله‌مراتبی ارائه دادند. سپس با در نظر گرفتن رویدادهای ریسکی یک شاخص ترکیبی مبتنی بر معیارهای ارزیابی و اوزان اهمیت آنها به منظور ارزیابی دقیق‌تر هر کدام از تأمین‌کنندگان ارائه دادند و درنهایت از روش الکترون ۳ برای ارزیابی و اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان استفاده کردند [۸].

۲-۲ مدل‌سازی ریاضی زنجیره تأمین سبز

پیشوایی و کیانفر (۲۰۱۰) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه را توسعه دادند که در آن همزمان هزینه کل را به حداقل و پاسخگویی را به حداکثر می‌رساند. آنها از الگوریتم ممیتیک برای یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو استفاده کردند که در آن استراتژی جستجوی پویای جدید با استفاده از کدگذاری مبتنی بر اولویت استفاده شده بود. همچنین آنها یک مدل چند دوره‌ای دو هدفه فازی را برای یک مسئله طراحی شبکه CLSC طراحی کردند که در آن تقاضا، نرخ بازگشت محصول استفاده شده، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های حمل‌ونقل و زمان تحویل غیر قطعی در نظر گرفته شده بود [۲۲]. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح قطعی برای شبکه زنجیره تأمین با حلقه بسته ارائه کردند. آنها از بهبود استوار برای غلبه بر عدم قطعیت استفاده کردند [۲۳]. اوزسیلان و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط یکپارچه را برای بهینه‌سازی تصمیم‌های استراتژیک مرتبط با جریان محصول در زنجیره‌های تأمین مستقیم و معکوس و همچنین بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های تاکتیکی برای تعادل خط تولید در زنجیره تأمین معکوس توسعه دادند [۲۴]. زهل و سلیمانی (۲۰۱۶) یک شبکه زنجیره تأمین با حلقه



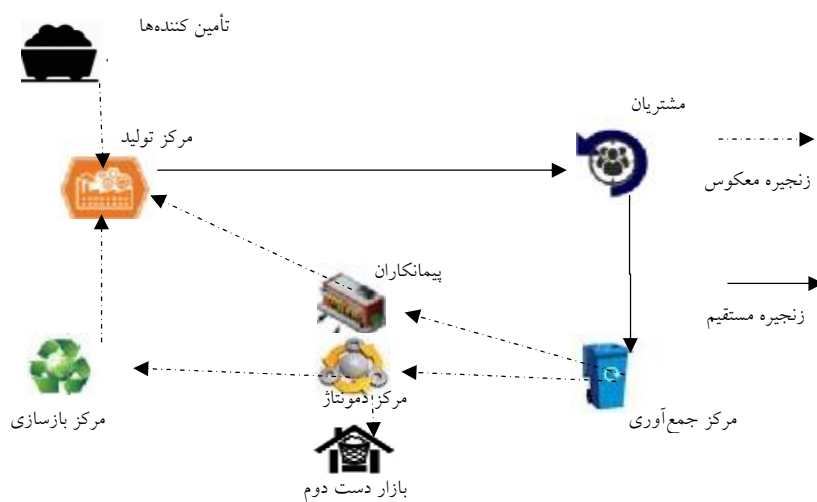
بسته را برای صنعت طلا طراحی کردند. آنها از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان برای یافتن راه‌حل نزدیک به بهینه استفاده کردند. اهداف مدل پیشنهادی آنها به حداقل رساندن هزینه‌های کل شبکه و نرخ انتشار گاز کربن می‌باشد [۲۵]. پوجی و همکاران (۲۰۱۷)، رویکردی برای طراحی زنجیره تأمین سبز پیشنهاد دادند که برای کاهش آثار مضر صنعتی‌سازی بر محیط، مسائل محیطی و اقتصادی را همزمان در نظر می‌گیرد. تقاضا در مدل آنها قطعی در نظر گرفته شده بود، همچنین فرض کردند که نقص کالا وجود ندارد [۲۶]. طالعی و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته طراحی کردند که همزمان هزینه کل شبکه و میزان انتشار دی‌اکسید کربن، را کاهش می‌دهد [۲۷]. سلیمانی، قویندان، شفق و جعفری (۲۰۱۷) به طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پرداختند. آنها از رویکردهای پایدار و سبز در مدل‌سازی و حل مدل زنجیره تأمین حلقه بسته خود استفاده کردند. همچنین برای مقابله با عدم قطعیت تقاضای مشتری از تکنیک فازی و برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده استفاده کردند. امین و باکی (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن عوامل جهانی مانند نرخ ارز و گمرکی تحت الگوی تقاضای نامشخص، یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه را پیشنهاد کردند و یک رویکرد حل فازی را توسعه دادند [۲۸]. پژوهشگران دیگری در سال ۲۰۰۸ پس از بررسی زنجیره تأمین حلقه بسته از الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل خود استفاده کردند [۲۹].

براساس مرور ادبیات، هدف از انجام این پژوهش پر کردن خلأ پژوهش و ارائه مدلی یکپارچه است تا نخست در سطح استراتژیک حلقه‌های قبل (تأمین‌کنندگان) سبز را براساس معیارهای کمی و کیفی ارزیابی و انتخاب کند، سپس در سطوح تاکتیکی و عملیاتی با بهینه‌سازی فرایند تولید، مقدار جریان مواد حمل شده بین عناصر زنجیره و استفاده از مکانیزم‌های جمع‌آوری ضایعات و بازگرداندن دوباره آنها به چرخه تولید در راستای تأمین تقاضای مشتریان به سمت تولید سبز حرکت کند؛ در واقع با این روش می‌توان نظریه یکپارچگی فرایند زنجیره تأمین و به صورت خاص زنجیره تأمین سبز را در عمل پیاده‌سازی کرد.

۳- روش پژوهش

شکل ۱ مدل مفهومی زنجیره تأمین سبز مربوط به یک شرکت تولیدی فعال در صنعت شیشه را نشان می‌دهد [۳۰].

شکل ۱ مدل مفهومی زنجیره تأمین سبز



۳-۱ مدل‌سازی ریاضی

مدل‌سازی در دو سطح استراتژیک و عملیاتی شامل دو مرحله (ارزیابی و مدل‌سازی ریاضی) صورت می‌گیرد. در مدل سطح استراتژیک (ارزیابی)، در آغاز یک دسته‌بندی جدید برای معیارهای انتخاب تأمین‌کننده سبز از بررسی ادبیات و استفاده از نظر خبرگان دانشگاهی و عوامل خرید شرکت مذکور اتخاذ شده است (جدول ۱)، سپس با توجه به عدم قطعیت و ابهام در قضاوت‌های گروه تصمیم‌گیرنده از روش تاپسیس فازی ارائه شده توسط شاهانقی و یزدانیان (۲۰۰۹) برای ارزیابی تأمین‌کننده‌ها و پیمانکارها براساس معیارهای اتخاذ شده استفاده می‌شود [۳۱]. در مرحله دوم (مدل سطح عملیاتی)، مدل ریاضی استوار زنجیره تأمین سبز طراحی می‌شود. اندیس و متغیر و پارامترهای آن در جدول‌های ۲ - ۴ نمایش داده شده‌اند.



جدول ۱ معیارهای انتخاب تأمین‌کننده و پیمانکار سبز

معیارها	عوامل محیطی	تکنولوژی	فرهنگ و استراتژی سازمانی	عملکرد	مالی
زیرمعیارها	- کاهش ضایعات - استفاده از تکنولوژی پاک - استفاده از مواد قابل بازیافت - کاهش آلودگی (برحسب کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای)	- ارزیابی تسهیلات/ ظرفیت‌های جاری - استانداردهای IT - سرعت در توسعه	- ظرفیت تولید - توان هماهنگی با تغییرات - تکنولوژیکی - ساختار سازمانی	- تحویل - کیفیت - قیمت - ثبات مالی - هزینه خدمات	- عملکرد اقتصادی - ثبات مالی - هزینه خدمات

جدول ۲ اندیس های مدل

اندیس	T	D	K	I	M	J	G
تعریف	دوره زمانی	مرکز دمونتاز	مشتری	قطعه	محصول	تأمین (عرضه) کننده	آرمان (تابع هدف)

جدول ۳ متغیرهای اصلی مدل

نماد	تعریف	نماد	تعریف
Q_{tij}	مقدار قطعه i خریداری شده از تأمین‌کننده j در دوره t	N_{ti}	مقدار قطعه i ارسال شده از مرکز دمونتاز d به مرکز بازسازی در دوره t
Q'_{ti}	مقدار قطعه i سالم تحویل گرفته شده از تمامی تأمین‌کننده‌ها در دوره t	Q_{ti}	موجودی سطح اطمینان برای قطعه i در مرکز تولید در دوره t
X_{tm}	مقدار محصول m تولید شده در دوره t	Y_{tij}	متغیر صفر و یک به منظور انتخاب یا عدم انتخاب تأمین‌کننده j در دوره t برای خرید قطعه i
X_{tmk}	مقدار محصول m حمل شده از مرکز تولید به مشتری k در دوره t	d_g^+	متغیر انحراف از آرمان (انحراف مثبت)
V_{tmk}	مقدار محصول m حمل شده از مشتری k به مکان جمع‌آوری در دوره t	d_g^-	متغیر انحراف از آرمان (انحراف منفی)
S_{tmd}	مقدار محصول قابل بازیافت m ارسال شده از مرکز جمع‌آوری به مرکز دمونتاز d در دوره t	N_{ti}	مقدار قطعه i ارسال شده از مرکز دمونتاز d به مرکز بازسازی در دوره t



جدول ۴ پارامترهای اصلی مدل

نماد	تعریف	نماد	تعریف
h_{tij}	هزینه حمل قطعه i از تأمین‌کننده j به مرکز تولید در دوره t	n_{tim}	تعداد قطعه i در هر واحد محصول m در دوره t
p_{tmk}	هزینه حمل یک واحد محصول m از مرکز تولید به مشتری k در دوره t	ca_{tm}	ظرفیت تولید مرکز تولید برای محصول m در دوره t
a_{tmd}	هزینه حمل یک واحد محصول بازگشتی m از مرکز جمع‌آوری به مرکز دمونتاژ d در دوره t	US_{tmd}	ظرفیت مرکز دمونتاژ d برای محصول m در دوره t
a_{ti}	هزینه حمل هر قطعه i از مرکز دمونتاژ d به مرکز بازسازی در دوره t	ca_{tr}	ظرفیت مرکز بازسازی برای قطعه i در دوره t
a'_{ti}	هزینه حمل هر قطعه i از مرکز بازسازی به مرکز تولید در دوره t	lQ_{tji}	حداقل مقدار خرید از تأمین‌کننده j برای قطعه i در دوره t
u_{tmk}	هزینه انگیزشی و جمع‌آوری محصول m بازگشتی از مشتری k به مرکز جمع‌آوری در دوره t	uQ_{tji}	مجموعه ظرفیت تخصیصی از جانب تأمین‌کننده j برای قطعه i در دوره t
r_{tij}	هزینه خرید قطعه i از تأمین‌کننده j در دوره t	β_{tmk}	نرخ بازگشت محصول استفاده شده m از منطقه مشتری k در دوره t
f_{tij}	هزینه ثابت مربوط به تأمین‌کننده j برحسب قطعه i	γ_{tmd}	نرخ کالای معیوب m در مرکز دمونتاژ d در دوره t
p_{tm}	هزینه تولید هر واحد محصول m در دوره t	θ_{ti}	نرخ قطعه معیوب i در مرکز بازسازی در دوره t
p'_{tm}	سود فروش محصول m به مشتریان در دوره t	def_{tij}	نرخ خرابی قطعه i برای تأمین‌کننده j در دوره t
p''_{tim}	سود فروش قطعه غیر قابل بازسازی i به بازار دست دوم در دوره t	g_{tij}	مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای تأمین‌کننده j به ازای هر قطعه i در دوره t
h_{ti}	هزینه نگهداری قطعه i در مرکز تولید در دوره t	C^g	مقدار مجاز انتشار گاز گلخانه‌ای برای تأمین‌کننده‌ها
b_{tmd}	هزینه دمونتاژ محصول m در مرکز دمونتاژ d در دوره t	t_{tij}	ارزش (وزن) تأمین‌کننده j برای قطعه i در دوره t
b_{ti}	هزینه بازسازی قطعه i در مرکز بازسازی در دوره t	Γ_{tmk}	پارامتر استواری: ضریب سطح حفاظت پارامتر تقاضای مشتریان در مدل استوار
d_{tmk}	تقاضای منطقه مشتری k برای محصول m در دوره t	\bar{d}_{tmk}	پارامتر استواری: طول بازه عدم قطعیت برای پارامتر تقاضای مشتریان
\bar{d}_{tmk}	پارامتر استواری: مقدار اسمی تقاضای مشتریان		



صورت‌بندی کامل مدل چند هدفه برای شرکت تولیدی شیشه ایمنی به نور

$$\begin{aligned}
 \text{Min}Z_1 &= \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M p'_{tm} X_{tm} \\
 \text{Min}Z_2 &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (r_{tij} + h_{tij}) Q_{tij} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J f_{tij} Y_{tij} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M p_{tm} X_{tm} + \\
 &\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K p_{tmk} X_{tmk} + \\
 &\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K u_{(t-1)mk} V_{(t-1)mk} + \\
 &\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D [(b_{(t-1)md} + a_{(t-1)md}) S_{(t-1)md} + \sum_{i=1}^I (b_{(t-1)i} + a_{(t-1)i} + \\
 &a'_{(t-1)i}) N_{(t-1)i} + \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \gamma_{(t-1)im} n_{(t-1)im} S_{(t-1)md} p''_{(t-1)im} \\
 \text{Max}Z_3 &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J t_{tij} Q_{tij} \\
 \text{Min}Z_4 &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I n_{ti} Q_{ti} \\
 \text{Min}Z_5 &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J g_{tij} Q_{tij} \\
 \text{Subject to} \\
 [1] \sum_{m=1}^M n_{tim} X_{tm} &= Q_{(t-1)t} + (1 - \theta_{(t-1)t}) N_{(t-1)t} + Q'_{ti} \quad \forall i, t \\
 [2] (1 - \gamma_{(t-1)md}) \times n_{(t-1)im} \times \sum_{d=1}^D S_{(t-1)md} &= N_{(t-1)t} \quad \forall i, t, m \\
 [3] \sum_{k=1}^K V_{(t-1)mk} &= \sum_{d=1}^D S_{(t-1)md} \quad \forall m, t \\
 [4] X_{tm} &= \sum_{k=1}^K X_{tmk} \quad \forall m, t \\
 [5] \beta_{tmk} X_{tmk} &= V_{tmk} \quad \forall m, k, t \\
 [6] d_{tmk} &\leq X_{tmk} \quad \forall t, m, k \\
 [7] Q'_{ti} &= \sum_{j=1}^J \frac{q_{tj}}{(1 - def_{tj})} \quad \forall t, i \\
 [8] |Q_{tij} Y_{tj} &\leq Q_{tij} \leq u Q_{tij} Y_{tj} \quad \forall i, j, t \\
 [9] S_{tmd} &\leq U S_{tmd} \quad \forall m, t, d \\
 [10] N_{ti} &\leq c a_{tr} \quad \forall i, t \\
 [11] X_{tm} &\leq c a_{tm} \quad \forall m, t \\
 [12] \sum_{i=1}^I Q_{tij} g_{tij} &\leq C^g \quad \forall t, j \\
 Q_{tij}, Q'_{ti}, X_{tm}, X_{tmk}, V_{tmk}, S_{tmd}, Q_{ti} &\geq 0 \text{ and integer } \forall i, j, t, m, k, d, Y_{tj}, Z_{ts} = 0 \text{ or } 1
 \end{aligned}$$

تابع هدف اول بیشینه‌سازی سود شرکت، تابع هدف دوم کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره مستقیم و زنجیره معکوس، تابع هدف سوم بیشینه‌سازی ارزش (وزن) هر یک از تأمین‌کنندگان که از مرحله قبل مدل حاصل شده است، تابع هدف چهارم کمینه‌سازی هزینه نگهداری موجودی پایه و درنهایت تابع هدف پنجم کمینه‌سازی مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای به‌وسیله هر یک از تأمین‌کننده‌ها لحاظ می‌کند. محدودیت‌های تعادلی اول و دوم محدودیت‌های تعادلی برای مرکز تولید را نشان می‌دهند. محدودیت تعادلی سوم نشان می‌دهد که همه محصولات بازگشتی جمع‌آوری شده در مرکز جمع‌آوری به مراکز دمونتاز فرستاده خواهد شد. محدودیت تعادلی چهارم بیانگر این است که تولید براساس تقاضا صورت می‌پذیرد و مجموعه کالاهای تولید شده با مجموعه محصولات ارسال شده به هر یک از منطقه مشتریان K در دوره t برابر



است. با توجه به نظر ونگ و ژو^۱ (۲۰۱۰) محدودیت پنجم بیانگر این است که محصول m که از مرکز توزیع به مشتری k در دوره t می‌رود، با نرخ β به مرکز جمع‌آوری و چرخه بازمی‌گردد و این نرخ برای هر محصول و هر مشتری متفاوت است [۳۲]. محدودیت تعادلی ششم تضمین می‌کند که تقاضای مشتریان در هر دوره برآورده شود. محدودیت تعادلی هفتم نرخ نقص را در کالای خریداری شده از تأمین‌کننده در نظر می‌گیرد و به عبارتی زنجیره تأمین را یک زنجیره ناقص به شمار می‌آورد که به دنیای واقعی نزدیک‌تر است.

محدودیت هشتم: در واقع ظرفیت دوره‌ای که هر عرضه‌کننده به خریدار تخصیص می‌دهد به مجموعه‌ای از مواد عرضه‌شده اختصاص دارد که باید کمتر یا مساوی مقدار خاصی در هر دوره باشد. از طرفی تولیدکننده بنا بر برخی مسائل استراتژیک ترجیح می‌دهد که حداقل مقدار خرید را از برخی از عرضه‌کننده‌ها داشته باشد. این ملاحظات در محدودیت نهم لحاظ می‌شود. محدودیت مرتبط با ظرفیت برای مراکز دمونتاژ، بازسازی و مرکز تولید در سه محدودیت ۹-۱۱ لحاظ شده‌اند. محدودیت آخر نیز تضمین می‌کند که مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای به‌وسیله هر یک از تأمین‌کننده‌ها از مقدار مجاز اعلام‌شده تجاوز نکند. ضرایب اهمیت در تابع هدف: با بهره‌گیری از نظر خبرگان شرکت و با استفاده از پرسشنامه مقایسات زوجی آرمان‌ها، تمامی آرمان‌ها دوبه‌دو مورد مقایسه قرار گرفته و وزن هر آرمان به‌ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۲۲ و ۰/۲۴ و ۰/۱۵ و ۰/۲۵ آمده است.

همتای استوار مدل زنجیره تأمین با حلقه بسته برای شرکت تولیدی شیشه ایمنی به نور همان‌طور که مطرح شد به منظور استوار کردن مدل اسمی، از مدل برتیمیس و سیم استفاده شده است [۳۳].

$$\begin{aligned} \min Z = & U_1(d_1^+ + d_1^-) + U_2(d_2^+ + d_2^-) + U_3(d_3^+ + d_3^-) + U_4(d_4^+ + d_4^-) + U_5(d_5^+ + d_5^-) \\ \text{Subject to:} \\ [G1] & \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M p'_{tm} X_{tm} - d_1^+ + d_1^- = G_1 \\ [G2] & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (r_{tij} + h_{tij}) Q_{tij} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J f_{tij} Y_{tij} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M p_{tm} X_{tm} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K p_{tmk} X_{tmk} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K u_{(t-1)mk} V_{(t-1)mk} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D [(b_{(t-1)md} + a_{(t-1)md}) S_{(t-1)md} + \sum_{i=1}^I (b_{(t-1)i} + a_{(t-1)i} + a'_{(t-1)i}) N_{(t-1)i}] - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Y_{(t-1)md} N_{(t-1)im} S_{(t-1)md} P''_{(t-1)im} - d_2^+ + d_2^- = G_2 \\ [G3] & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J t_{tij} Q_{tij} - d_3^+ + d_3^- = G_3 \\ [G4] & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I h_{ti} Q_{ti} - d_4^+ + d_4^- = G_4 \\ [G5] & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J g_{tij} Q_{tij} - d_5^+ + d_5^- = G_5 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 [1] \sum_{m=1}^M n_{tm} X_{tm} &= Q_{(t-1)i} + (1 - \theta_{(t-1)i}) N_{(t-1)i} + Q'_{ti} \quad \forall i, t \\
 [2] (1 - \gamma_{(t-1)md}) \times n_{(t-1)im} \times \sum_{d=1}^D S_{(t-1)md} &= N_{(t-1)i} \quad \forall i, t, m \\
 [3] \sum_{k=1}^K V_{(t-1)mk} &= \sum_{d=1}^D S_{(t-1)md} \quad \forall m, t \\
 [4] X_{tm} &= \sum_{k=1}^K X_{tmk} \quad \forall m, t \\
 [5] \beta_{tmk} X_{tmk} &= V_{tmk} \quad \forall m, k, t \\
 [6] n_{tmk} \bar{a}_{tmk} &\leq X_{tmk} - Z_{tmk} \Gamma_{tmk} - q_{tmk} \quad \forall m, k, t \\
 [7] Z_{tmk} + q_{tmk} &\geq \bar{a}_{tmk} y_{tmk} \quad \forall m, k, t \\
 [8] -y_{tmk} &\leq n_{tmk} \leq y_{tmk} \quad \forall m, k, t \\
 [9] n_{tmk} &= 1 \\
 [10] Q'_{ti} &= \sum_{j=1}^J \frac{Q_{tj}}{(1 - def_{tj})} \quad \forall t, i \\
 [11] |Q_{tj} Y_{tj}| &\leq Q_{tj} \leq u Q_{tj} Y_{tj} \quad \forall i, j, t \\
 [12] S_{tmd} &\leq U S_{tmd} \quad \forall m, t, d \\
 N_{ti} &\leq ca_{tr} \quad \forall i, [13] \\
 [14] X_{tm} &\leq ca_{tm} \quad \forall m, t \\
 [15] \sum_{i=1}^I Q_{tj} g_{tj} &\leq C^g \quad \forall t, j \\
 Q_{tj}, Q'_{ti}, X_{tm}, X_{tmk}, V_{tmk}, S_{tmd}, Q_{ti} &\geq 0 \text{ and integer } \forall i, j, t, m, k, d \\
 Y_{tj} &= 0 \text{ or } 1
 \end{aligned}$$

۲-۳ تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

براساس این پژوهش، سه محصول که ۴ مشتری اصلی دارد، با توجه به نظر کارشناسان شرکت برای بررسی در سه دوره انتخاب می‌شوند. این محصولات از ده قطعه تشکیل شده‌اند. برای تأمین این قطعات بعد از فیلتر اولیه، ۵ تأمین‌کننده حایز شرایط شناسایی شده که در ادامه باید براساس معیارهای کمی و کیفی ارزیابی شوند. همچنین لازم به ذکر است که این شرکت دو مرکز برای دمونتاژ محصولات دارد.

جدول ۵ رتبه نهایی هر یک از تأمین‌کننده‌ها براساس روش تاپسیس فازی را نشان می‌دهد.

جدول ۵ ارزیابی نهایی تأمین‌کننده‌ها (A_i)

\bar{C}_{10}	\bar{C}_9	\bar{C}_8	\bar{C}_7	\bar{C}_6	\bar{C}_5	\bar{C}_4	\bar{C}_3	\bar{C}_2	\bar{C}_1	N
۰	۰	۰/۵۵۴	۰/۳۳۲	۰	۰/۰۰۱	۰	۰	۰/۳۱۱	۰	A ₁
۰	۰	۰/۳۳۵	۰/۱۲۹	۰/۳۴۹	۰/۶۶۳	۰	۰	۰/۲۰۹	۰/۶۷۷	A ₂
۰	۰/۱۴۰	۰/۱۰۰	۰	۰/۱۲۲	۰/۱۴۲	۰/۱۰۶	۰/۱۲۶	۰	۰/۶۶۳	A ₃
۰/۳۴۲	۰/۳۰۹	۰	۰	۰/۳۹۸	۰	۰/۱۴۵	۰/۳۱۲	۰	۰/۱۴۲	A ₄
۰/۶۷۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۶۹۹	۰	۰/۱۵۴	۰/۳۴۲	A ₅

با توجه به نتایج گسترده، مهم‌ترین نتایج مدل قطعی و استوار یکپارچه برای زنجیره تأمین سبز، یعنی آرمان‌ها و تابع هدف در سطح کلان به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه خواهد شد.



جدول ۶ میزان تحقق هر آرمان

ردیف	شماره آرمان	نوع آرمان	نوع انحراف	مقدار بهینه هدف	مقدار آرمان پس از حل	مقدار انحراف d_i^-, d_i^+	میزان تحقق آرمان
۱	اول	Max	d_1^-	۴۲۹۱۰۰۰۰۰۰	۱۸۷۶۹۷۰۰۰۰۰	۲۴۱۴۰۳۰۰۰۰۰	۴۳.۷٪
۲	دوم	Min	d_2^+	۷۰۶۰۶۱۴۵۱۶	۸۷۷۶۵۷۶۳۰۹	۷۱۵۹۶۱۷۹۳	۸۰.۴٪
۳	سوم	Max	d_3^-	۹۳۰۰۰	۹۰۰۰۰	۳۰۰۰	۹۶.۷٪
۴	چهارم	Min	d_4^+	۲۴۲۴۰۲۲۸۷۴	۲۴۲۴۰۹۰۴۴۸	۶۷۵۷۴	۹۹.۹٪
۵	پنجم	Min	d_5^+	۲۹۹۹۹.۹۲۰۷۲	۲۹۹۹۹.۹۲۰۷۲	.	۱۰۰٪

جدول ۷ مقادیر انحراف از آرمان‌ها و تابع هدف مدل استوار در حالت‌های مختلف سطح حفاظت

سطح حفاظت (I)	d_1^-	d_2^+	d_3^+	d_4^-	d_5^+	مقدار تابع هدف
صفر	۲۴۴۰۳۰۰۰۰۰	۷۱۵۹۶۱۷۹۳	۳۰۰۰	۶۷۵۷۴	.	۸,۸۴۵,۸۸۴,۹۸
۰/۱	۲۴۰۰۰۸۴۱۰۰۰	۱۵۸۰۵۷۶۴۵۸۲	۸۹۴۸۵۴۰	۶۰۷۸۲	۱۰۷۸۱۳۵۶۸۲۱	۱۴,۶۶۰,۷۵۳,۲
۰/۲	۲۳۶۰۶۰۹۶۰۰۰	۳۱۵۹۷۹۶۰۴۴۹	۱۰۱۹۷۰۸۰	۵۰۳۴۶	۱۵۸,۴۰۵,۱۸۳۴	۲۱,۹۸۳,۰۹۲,۰
۰/۳	۲۳۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۴۷۳۸۸۵۷۴۷۹۵	۲۳۲۰۲۷۴۰	۳۰۰۱۱	۲۰۸۹۹۳۸۵۱۰۳	۲۷,۹۸۴,۰۹۴,۶
۰/۴	۲۳۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۶۳۱۸۱۹۰۹۳۲۳	۲۹۱۰۲۲۸۰	۱۹۰۰۰	۲۵۹۵۹۱۵۱۹۷۳	۳۲,۹۰۳,۰۹۳,۰
۰/۵	۲۲۹۸۷۹۶۰۰۰۰۰	۷۸۹۶۹۱۰۰۹۴۵	۳۲۹۰۲۸۲۰	۱۰۰۰۰	۳۱۰۱۳۹۹۳۲۱۰	۳۹,۹۹۶,۹۹۰,۲
۰/۶	۲۱۸۳۲۵۰۰۰۰۰۰	۹۴۷۷۴۹۱۷۲۱۹	۵۲۸۲۴۹۸۰	۵۰۰۰	۳۶۰۸۲۱۷۲۲۹۳	۴۵,۹۰۵,۹۰۸,۹
۰/۷	۲۱۲۵۴۰۹۰۰۰۰۰	۱۱۱۵۰۷۴۲۹۳۶۵	۵۹۹۰۰۱۶۰	۱۳۰۰	۴۱۰۹۳۶۴۵۲۴۸	۵۱,۹۰۰,۹۸۶,۳
۰/۸	۲۰۹۸۶۹۹۳۰۰۰	۱۲۸۳۲۴۴۲۰۴۰۰	۶۹۹۲۴۱۱۰	۸۵۶	۴۶۰۹۷۸۵۷۴۰۰	۶۰,۸۹۸,۹۰۴,۰
۰/۹	۲۰۲۰۹۹۳۴۰۰۰	۱۴۵۱۴۳۶۰۰۵۲۱	۸۹۷۹۴۳۹۰	۰.۱	۵۱۱۰۴۵۳۲۳۶	۶۹,۲۰۰,۰۰۸,۸
۱	۱۹۷۸۹۹۰۰۰۰۰۰	۱۶۱۹۵۷۶۴۱۹۱۳	۹۰۰۰۲۵۷۳	۰.۰۳	۵۶۱۰۹۱۲۷۶۷۱	۷۶,۵۷۴,۸۶۰,۹۹

در جدول ۷ ملاحظه می‌شود که با افزایش سطح حفاظت، مقدار انحرافات و همچنین تابع هدف (مجموع انحرافات) بدتر می‌شود که این امر با منطق ریاضیاتی استوارسازی مدل کاملاً سازگار است، زیرا مدل‌های استوار هزینه بیشتری نسبت به همتای قطعی خود دارند و افزایش تابع هدف جبران‌کننده تغییرات سناریوهای متفاوت است که منجر به جواب‌های استوار مدل می‌شود و علت هزینه‌های غرامتی است که در ازای انحراف از مقادیر موجودی ذخیره



(آرمان‌ها) رخ می‌دهد، بنابراین مقدار تابع هدف (کل انحرافات) با افزایش سطح حفاظت به‌طور فزاینده‌ای بدتر می‌شود.

۳-۳ نتایج حل مدل استوار در سطح عملیاتی

با توجه به حجم بسیار بالای متغیرهای مدل و به منظور نمایش تفاوت میزان خرید، تولید، توزیع به ازای سطوح مختلف مدل استوار برخی از داده‌های مدل در دوره دوم به عنوان نمونه در این بخش گزارش می‌شود (جدول‌های ۸-۱۱).

جدول ۸ میزان تغییر X_{tm} براساس سطوح مختلف حفاظت

۱	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰	Γ_{tm}/X_{tm}
۵۴۰۰۰	۵۳۱۹۰	۵۲۸۴۳	۵۱۹۹۹	۵۱۰۹۲	۴۹۳۲۰	۴۷۶۱۰	۴۷۵۴۳	۴۵۰۷۵	۴۳۳۹۰	۴۳۳۹۰	X_{21}
۶۷۹۲۰۰	۶۶۷۸۸	۶۵۶۵۶	۶۴۵۲۴	۶۳۳۹۲	۶۲۲۶۰	۶۱۱۲۸	۵۹۹۹۶	۵۸۸۶۴	۵۷۷۳۲	۵۶۸۰۰	X_{22}
۷۵۰۰۰	۷۴۹۰۱	۷۳۷۹۱	۷۲۹۹۸	۷۲۳۹۰	۷۱۹۰۹	۷۱۰۲۳	۷۰۱۲	۶۹۲۰۰	۶۶۵۰۰	۶۶۱۰۰	X_{23}

جدول ۹ میزان تغییر X_{tmk} براساس سطوح مختلف حفاظت

۱	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰	Γ_{tm}/X_{tm}
۵۳۴۹۲	۶۰۳۰۹	۶۷۸۴۴	۷۰۳۶۶	۷۳۰۶۸	۷۶۷۴۰	۸۰۴۱۲	۹۰۳۳۹	۱۰۰۰۰	۱۰۹۳	۱۱۰۲	X_{213}
۲۱۸۹۸	۲۳۳۸۹	۲۴۱۸۹	۲۴۵۷۸	۲۵۰۰۰	۲۵۸۹۴	۲۷۰۹۰	۳۰۴۲۱	۳۱۰۰۰	۳۱۰۱	۳۲۰۰	X_{223}
۳۲۸۸۹	۳۳۷۸۲	۳۳۰۹۲	۳۳۷۸۳	۳۴۹۸۳	۳۵۷۶۳	۳۶۰۰۲۱	۳۶۹۲۱۲	۳۷۲۹۸۲	۳۸۲۹۱	۳۸۹۰۳	X_{233}

جدول ۱۰ میزان تغییر V_{tmk} براساس سطوح مختلف حفاظت

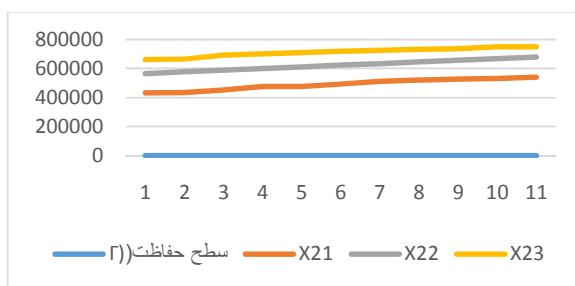
۱	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰	Γ_{tm}/X_{tm}
۲۳۰۰	۲۰۰۷۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۹۹۲	۱۹۸۹۰	۱۹۸۰۰	۱۹۰۰	۱۸۹۹	۱۸۹۳	V_{213}
۷۱۱۱۵	۷۰۰۰۰	۶۸۶۲۹	۶۷۶۵۴	۶۶۶۶۵	۶۵۰۵۵	۶۳۸۲۵	۶۲۹۲۲	۶۲۴۸۷	۶۰۲۲۲	۵۹۰۲۰	V_{223}
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	V_{233}



جدول ۱۱ میزان تغییر Q'_{ti} در دوره دوم برای سه قطعه اصلی براساس سطوح مختلف حفاظت

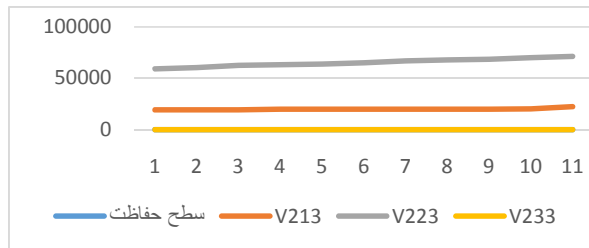
۱	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰	Γ_{ti} / Q'_{ti}
۹۵۱۰۹	۹۴۰۰۵	۹۳۸۴۲	۹۱۹۸۷	۸۹۶۶۰	۸۵۹۸۹	۸۴۰۵۱	۸۱۳۸۸	۷۷۹۸۸	۷۷۵۳۰	۷۵۶۵۰	Q'_{21}
۳۵۵۹۷	۳۶۱۰۸	۳۵۸۴۲	۳۴۷۰۸	۳۳۸۹۸	۳۳۶۶۹	۳۳۰۴۰	۳۲۸۲۷	۳۲۴۰۱	۳۱۹۹۱	۳۰۹۹۹	Q'_{22}
۵۷۱۳۸	۵۱۳۹۹۴	۵۱۲۰۰۹	۴۹۹۲۲۳	۴۹۸۱۲۳	۴۸۳۰۱۲	۴۷۴۹۹۱	۴۷۴۰۰۱	۴۷۳۹۸۲	۴۷۲۹۸۳	۴۷۱۳۷	Q'_{23}

به منظور تحلیل بهتر اطلاعات جدول‌های ۸-۱۱ برخی از نمودارهای نظیر آنها ارائه خواهند شد (نمودارهای ۱-۳).

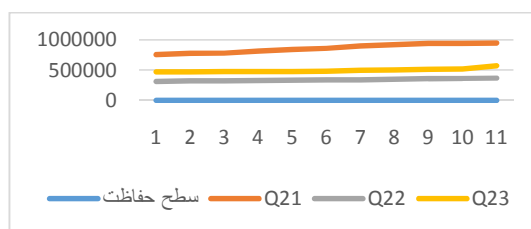


نمودار ۱ مقدار محصول تولیدشده X_{im} به ازای سطوح مختلف حفاظت

همانطور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، مقدار X_{22} (تولید محصول اول در دوره دوم) در حالت مدل قطعی - سطح حفاظت صفر-، ۴۳۲۹۰۰ است. این مقدار با افزایش سطح حفاظت افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر افزایش احتیاط یا محافظه‌نگری ناشی از افزایش سطح حفاظت است که موجب می‌شود کارخانه مقدار محصول بیشتری را تولید کند تا بتواند کنترل بهتری بر پدیده عدم قطعیت در تأمین نیاز مشتری داشته باشد تا بتواند تقاضای مشتریان را تأمین کند.



نمودار ۲ میزان محصولات بازگشتی براساس سطوح مختلف حفاظت



نمودار ۳ میزان قطعه دریافت شده ۱، ۲ و ۳ از تأمین‌کننده‌ها در دوره دوم

براساس سطوح مختلف حفاظت

در نمودار ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش سطح حفاظت میزان کلای بازگشتی از هر یک از مشتریان نیز افزایش پیدا می‌کند، به طوری که مقدار بازگشت محصول اول در حالت قطعیت کامل از مشتری سوم در دوره دوم $18923V_{223}$ است و این مقدار با افزایش عدم قطعیت نیز افزایش پیدا می‌کند و دلیل آن را می‌توان در این مسئله ردیابی کرد که با افزایش مقدار تولید، مقدار بازگشت که درصدی از مقدار تولید است، نیز افزایش پیدا خواهد کرد. از بررسی نمودار ۳ (که تغییر مقدار خرید سه قطعه اصلی شرکت در دوره دوم را نشان می‌دهد) می‌توان دریافت که با افزایش سطح حفاظت مقدار قطعات خریداری شده از تأمین‌کننده‌ها افزایش پیدا می‌کند، زیرا تصمیم‌گیرنده با افزایش محافظه‌کاری کارخانه در تولید و تأمین تقاضای مشتری‌ها ترجیح می‌دهد که مقدار قطعه بیشتری را از هر یک از تأمین‌کننده‌ها خریداری کند تا مطمئن شود که به تقاضای تمامی مشتریان به نحو مطلوبی پاسخ داده است.



۴- نتیجه‌گیری

رویکرد اصلی تحقیق طراحی و ارائه مدل ریاضی یکپارچه برای مدیریت زنجیره تأمین سبز یک شرکت فعال در صنعت شیشه بوده است. از آنجاییکه در راستای سبز شدن، زنجیره تأمین یکی از برنامه‌های بلندمدت شرکت ارزیابی تأمین‌کنندگان از منظر رعایت اصول زیست‌محیطی است، با مطالعه ادبیات موضوع و مصاحبه با خبرگان مدل ریاضی دو مرحله‌ای طراحی شده در سطوح استراتژیک و عملیاتی و تاکتیکی مورد بررسی قرار گرفتند. در سطح استراتژیک از رویکرد مدل‌سازی نرم و در سطح عملیاتی و تاکتیکی از رویکرد مدل‌سازی سخت استفاده شد. همچنین برای از بردن ابهام موجود در قضاوت‌های گروه تصمیم‌گیرنده در مدل سطح استراتژیک از رویکرد فازی و در مدل سخت از رویکرد استوار برای غلبه بر عدم قطعیت نهفته در پارامترهای مدل ریاضی عدد صحیح مختلط چند هدفه و چند دوره‌ای استفاده شد. پس از طراحی مدل‌ها و حل آنها به ارائه نتایج حاصل شده از حل هر مدل و بررسی کیفیت جواب‌ها پرداخته شد. با توجه به جواب‌های حاصل از مدل و استفاده از نظر خبرگان در مورد جواب‌های حاصل شده و مقایسه آن با وضع موجود، کارایی مدل تحقیق در بهبود تصمیم‌گیری‌های زنجیره تأمین سبز بررسی شدند. در مجموع استفاده از مدل آرمانی تحقیق، نتایج مثبت زیادی برای شرکت‌های استفاده‌کننده به دنبال دارد که می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

از آنجاییکه ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص کالا به آنها، با برنامه‌ریزی تولید و توزیع و بازگشت مجدد کالا به زنجیره یکپارچه شده است، پس علاوه بر تمامی مزایایی که از کلی‌نگری ناشی از یکپارچه‌سازی زنجیره به دست می‌آید، می‌توان پذیرفت که خرید کالا براساس مدل برحسب نیاز زنجیره و با در نظر گرفتن عواملی همچون میزان موجودی پایه، مقدار قطعات بازگشتی به زنجیره صورت می‌پذیرد و در نتیجه موجودی مواد اولیه خام در انبار مواد اولیه کاهش پیدا می‌کند که این عدم انباشت موجودی هزینه‌های نگهداری مواد اولیه در انبار را کاهش داده و باعث کاهش قیمت تمام شده کالا می‌شود که در نهایت نیز برای سازمان سود چشمگیری را به دنبال خواهد داشت.



همچنین با اجرای مدل ریاضی، سطح تولید محصول براساس مقدار تقاضا و منابع موجود انجام می‌شود که می‌توان پذیرفت مقدار تولید بر بیش از حد نیاز نمی‌باشد و تمام تقاضاها علاوه بر کاهش مقدار زیاد موجودی انبار، پاسخ داده شده‌اند.

همچنین استفاده از مدل آرمانی طراحی شده این اجازه را به شرکت می‌دهد تا به جای دنبال کردن یک هدف خاص برای مثال کاهش هزینه‌ها، چندین هدف مختلف و گاهی اوقات متضاد را همزمان در نظر بگیرد که مدل به دنیای واقع نزدیک‌تر باشد. بدیهی است که مدل بالا با توجه به اوزان اهمیت اهداف و سایر محدودیت‌ها تا آنجا که ممکن است اهداف مورد نظر را برآورده می‌سازد.

از جمله فواید دیگر توجه به زنجیره تأمین با حلقه بسته می‌توان به حداکثرسازی استفاده از منابع طبیعی، کاهش قیمت تمام شده محصولات، افزایش رضایت مشتری و کاهش آلاینده‌گی زیست محیطی اشاره کرد. از این رو طراحی کارای مدل ریاضی زنجیره تأمین با حلقه بسته می‌تواند منجر به ایجاد یک مزیت رقابتی پایدار برای سازمان شود.

این مقاله همچنین فرصت‌های پژوهشی زیادی را برای محققان ایجاد می‌کند که در زیر به برخی از آنها اشاره می‌شود:

۱. ارائه روش‌هایی کارا و منطقی به منظور تعیین تعداد حالات لحاظ شده سطوح حفاظت؛
۲. در این تحقیق با استفاده از یکی از رویکردهای حل مدل‌های استوار که دارای کارایی بالایی است، به حل مدل پرداخته شده است که می‌توان با توجه به رویکردهای گوناگونی که در فصل دوم به تفصیل بحث شد، به حل مدل پرداخت؛
۳. لحاظ کردن عدم قطعیت در پارامترهای دیگر: با توجه به عدم قطعیت در پارامترهایی نظیر هزینه، تقاضا، لحاظ کردن عدم قطعیت در اینگونه پارامترها مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌کند؛
۴. رویکردهای سناریویی در مدل‌های استوار را (که دارای شرایط ابهام و عدم قطعیت‌اند) با مدل‌های فازی ترکیب کرد و به حل مدل‌های ترکیبی پرداخت و یا هر کدام را به‌طور مجزا حل کرد و نتایج آن را با هم مقایسه نمود؛



۵. استفاده از سایر فنون وزن‌دهی به معیارهای ارزیابی تأمین‌کننده‌ها؛
۶. علاوه بر تمرکز به کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای می‌توان توابع دیگری که جز پارامترهای زنجیره تأمین سبز به حساب می‌آیند مانند تابع مصرف انرژی، مصرف آب، تولید الودگی صوتی و... نیز استفاده کرد. بدیهی است که در این صورت محدودیت‌های بیشتری به مدل اضافه می‌شود و فرایند تولید به صورت هدفمند به سمت سبز شدن سوق پیدا می‌کند.

۵- منابع

- [1] Lee A. H. I. (2009) "A fuzzy supplier selection model with the consideration of benefits opportunities, costs and risks", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 36, No. 2, pp. 2879–2893.
- [2] Lin Y.-L., Chang W.-D., Hsieh J.-G. (2008) "A particle swarm optimization approach to nonlinear rational filter modeling", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 34, No. 2, pp. 1194–1199.
- [3] Srivastava S. K. (2008) "Network design for reverse logistics", *Omega*, Vol. 36, No. 4, pp. 535–548.
- [۴] خیرآبادی م. (۱۳۹۱) طراحی مدل زنجیره تأمین سبز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مدیریت و اقتصاد.
- [5] Araz C., Ozfirat P., Ozkarahan I. (2007) "An integrated multi-criteria decisionmaking methodology for outsourcing management", *Comput. Oper. Res.*, Vol. 34, No. 12, pp. 3738–3756.
- [6] Özceylan E., Paksoy T., Bektas T. (2014) "Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing", Vol. 61, pp. 142–164.
- [7] Ghodsypour S. H., O'Brien C. (2001) "The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint", *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 73, No. 1, pp. 15–27.
- [۸] عبدالملکی م.، صیادی. ا.، حیاتی م. (۱۳۹۴) "انتخاب تأمین‌کنندگان بر مبنای ریسک تأمین‌کننده با استفاده از روش الکتور ۳"، پژوهش‌های مدیریت منابع سازمانی، دوره ۵، ش. ۲.



- [9] Amin S. H., RazmiJ. (2009)"An integrated fuzzy model for supplier management: A case study of ISP selection and evaluation",*Expert Syst. Appl.*, Vol. 36, No. 4, pp. 8639–8648.
- [10] Bai C., SarkisJ.(2010)"Green supplier development: Analytical evaluation using rough set theory, *J. Clean. Prod.*, Vol. 18, No. 12, pp. 1200–1210.
- [11] GalankashiM. R., ChegeniA., SoleimanyanadeganyA., MemariA., AnjomshoaeA., HelmiS. A., DargiA.(2015)"Prioritizing green supplier selection criteria using fuzzy analytical network process",*Procedia CIRP*, Vol. 26, pp. 689–694.
- [12] Hsu C.-W., HuA. H.(2009)"Applying hazardous substance management to supplier selection using analytic network process", *J. Clean. Prod.*, Vol. 17, No. 2, pp. 255–264.
- [13] KuoR. J., WangY. C., TienF. C. (2010)"Integration of arti fi cial neural network and MADA methods for green supplier selection",*J. Clean. Prod.*, Vol. 18, No. 12, pp. 1161–1170.
- [14] Rao. P. (2005)"The greening of suppliers in the South East Asian context", *J. Clean. Prod.*, Vol. 13, No. 9, pp. 935–945.
- [15] Trucost (2009) Carbon emissions – measuring the risks, Available from:
<www.nsf.org/business/sustainability/SUS_NSF_Trucost_Report.pdf>
- [16] DicksonG. W. (1996)*An analysis of vendor selection systems and decisions*, Journalof Purchasing.
- [17] GunasekaranA., SarkisJ., TalluriS., GunasekaranA. (2007)"A strategic model for agile virtual enterprise partner selection", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, Vol. 27, No. 11, pp. 1213–1234.
- [18] HashemiS. H., KarimiA., TavanaM.(2015)"An integrated green supplier selection approach with analytic network process and improved Grey relational analysis", *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 159, pp. 178–191, 2015.
- [19] Babbar C., AminS. H. (2018) "A multi-objective mathematical model integrating environmental concerns for supplier selection and order allocation based on fuzzy QFD in beverages industry", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 92, pp. 27–38.
- [20] Y. YangF. Yu ChangD. (2018)"Carbon footprint based green supplier selection under dynamic environment", *J. Clean. Prod.*, Vol. 170, pp. 880–889.
- [21] GuarnieriP., TrojanF.(2019)"Decision making on supplier selection based on social, ethical, and environmental criteria: A study in the textile industry", *Resour. Conserv. Recycl.*, Vol. 141, No. April 2018, pp. 347–361.

- [22] Pishvae M. S., KianfarK.(2010)"Reverse logistics network design using simulated annealing",pp. 269–281.
- [23] PishvaeM. S., RabbaniM., TorabiS. A. (2011)"A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Appl. Math. Model.*, Vol. 35, No. 2, pp. 637–649.
- [24] ÖzceylanE., PaksoyT., BektaşT. (2014)"Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing", *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, Vol. 61, pp. 142–164.
- [25] Zohal M., SoleimaniH.(2016)"Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design : A case study in gold industry", *J. Clean. Prod.*, Vol. 133, pp. 314–337.
- [26] PujiK., CarvalhoM. S., Costa L.(2017)"Int . J . production economics green supply chain design : A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model", *Intern. J. Prod. Econ.*, Vol. 183, pp. 421–432.
- [27] TalaeiM., FarhangB., SamanM.(2016)"A robust fuzzy optimization model for carbon-ef fi cient closed-loop supply chain network design problem : Anumerical illustration in electronics industry", *J. Clean. Prod.*, Vol. 113, pp. 662–673.
- [28] Hassanzadeh S., BakiF. (2017) "A facility location model for global closed-loop supply chain network design", *Appl. Math. Model.*, Vol. 41, pp. 316–330.
- [29] NahrJ. G., KianR., RezazadehH.(2018) "A modified priority-based encoding for design of a closed-loop supply chain network using a discrete league championship algorithm".
- [۳۰] کولیائی م.، آذر ع.، رجب‌زاده قطری. (۱۳۹۵) "طراحی مدل یکپارچه برای زنجیره تأمین با حلقه بسته"، پژوهش‌های مدیریت در ایران، دوره ۲۰، ش. ۱، صص. ۱–۲۳.
- [31] Shahanaghi K., Yazdian S. A.(2009)"Vendor selection using a new fuzzy group TOPSIS approach", *J. Uncertain Syst.*, Vol.3, No. 3, p. hal.221-231. IUST. Tehran.
- [32] Wang H. F., HsuH. W.(2010)"A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm", *Comput. Oper. Res.*, Vol. 37, No. 2, pp. 376–389.
- [33] Bertsimas D., Sim M. (2004)"The price of robustness", *Oper. Res.*, Vol. 52, No. 1, pp. 35–53.