مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۱، صص. ۳۵-۴۸، (پژوهشی)

Original Article

ارائه‌ی مدلی یکپارچه برای قیمت‌گذاری و کنترل موجودی کالاهای فاسدشدنی در زنجیره‌ی تأمین دوسطحی (مطالعه‌ی موردی ملات سبز)

طاها کشاورز* **(استادیار)**
گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان
محمد فراست (کارشناس‌ارشد)
گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

در این مطالعه، مسئله‌ی برنامه‌ریزی هم‌زمان تولید، موجودی، حمل‌ونقل و قیمت‌گذاری محصولات فاسدشدنی در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای رسیدن به جواب بهینه‌ی سراسری، حل تمام این زیرمسائل در قالب یک مدل یکپارچه ضروری است. پارامترهای تأثیرگذار بر تصمیمات مذکور قطعی نیستند و این عدم قطعیت نیز باید کنترل شود. به علاوه اهمیت موضوع هنگامی که محصول فاسدشدنی باشد بسیار بیشتر خواهد بود. در این پژوهش، برنامه‌ریزی امکانی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت به کار گرفته شده و برای اعتبارسنجی مدل از داده‌های یک مطالعه‌ی موردی (ملات سبز که در صنعت فولاد کاربرد دارد) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تصمیم‌گیری یکپارچه می‌توان هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین را به طور متوسط ۱۶٪ کاهش داد. همچنین در مقایسه‌ی رویکرد امکانی استوار با رویکرد اسمی در کنترل عدم قطعیت، ملاحظه می‌شود که بیشینه و میانگین انحراف از بهینگی به ترتیب ۴۶٪ و ۱۱٪ کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین دوسطحی، محصولات فاسد شدنی، قیمت‌گذاری، تصمیم‌گیری یکپارچه، برنامه‌ریزی امکانی استوار.

taha_keshavarz@semnan.ac.ir
m.ferasat@stu.yazd.ac.ir

۱. مقدمه

زنجیره‌ی تأمین مجموعه‌یی از تسهیلات، مشتریان، محصولات، موجودی‌ها و روش‌های خرید، توزیع و کنترل موجودی است که تأمین‌کنندگان را به مشتریان نهایی وصل می‌کند. این زنجیره با تولید مواد خام توسط تأمین‌کننده شروع می‌شود و با مصرف محصول توسط مشتری خاتمه می‌یابد. در این جریان، کالاها بین تأمین‌کننده و مشتری از چندین مرحله عبور می‌کنند و هر مرحله ممکن است شامل تسهیلات متعددی باشد.

به طور کلی زنجیره‌ی تأمین شامل همه‌ی فعالیت‌های مرتبط با جریان کالا و تبدیل مواد، از مرحله‌ی تهیه ماده‌ی اولیه تا مرحله‌ی تحویل کالا به مصرف کننده است. در زنجیره‌ی تأمین علاوه بر جریان کالا، دو جریان اطلاعات و جریان منابع مالی و اعتبارات نیز حضور دارند. لذا، مدیریت زنجیره‌ی تأمین فرایند یکپارچه‌سازی فعالیت‌های زنجیره‌ی تأمین و نیز جریان‌های اطلاعاتی مرتبط با آن از طریق بهبود و هماهنگ‌سازی فعالیت‌های تولید و عرضه محصول است. همچنین مدیریت زنجیره‌ی تأمین از زیر مسائل مهمی مانند برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی، برنامه‌ریزی توزیع و حمل‌ونقل کالا و قیمت‌گذاری تشکیل شده است.

در بسیاری از تحقیقات گذشته هریک از زیرمسائل مهم زنجیره‌ی تأمین به صورت مجزا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با حل مجزای هر یک از این زیرمسائل نیز می‌توان بهبود قابل توجهی در زنجیره‌ی تأمین ایجاد کرد، اما بهینگی سراسری هنگامی به دست می‌آید که همه‌ی زیرمسائل به صورت هم‌زمان و در قالب یک مدل یکپارچه حل شوند.

کنترل موجودی و قیمت‌گذاری، در ابتدا برای یک بنگاه و یک محصول مورد توجه قرارگرفته است ولی در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی این مفاهیم را در مدیریت زنجیره‌ی تأمین مورد توجه قرار داده‌اند. از عواملی که می‌تواند در مطالعه‌ی اقلام موجودی مورد بررسی قرارگیرد می‌توان به موارد مهمی همچون قیمت، مجاز

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۶/۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۰/۲۶، پذیرش ۱۴۰۱/۲/۲۱.
DOI:10.24200/J65.2022.57907.2218

استناد به این مقاله:
کشاورز، طاها و فراست، محمد، ۱۴۰۲. ارائه‌ی مدلی یکپارچه برای قیمت‌گذاری و کنترل موجودی کالاهای فاسدشدنی در زنجیره‌ی تأمین دوسطحی (مطالعه‌ی موردی ملات سبز). مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۳۹(۱)، صص. ۳۵-۴۸.

بودن یا نبودن کمبود، تورم، ارزش زمانی پول و مانند آن اشاره کرد. با ادغام فاکتورهای مختلف در حوزه‌های مختلف (بنگاه تولیدی یا زنجیره‌ی تأمین) می‌توان مدل‌های متفاوتی استخراج کرد. تقاضا به عنوان جلوبرنده‌ی کل سیستم موجودی نقش کلیدی برای مدل‌سازی آن ایفا می‌کند که می‌بایست مورد ملاحظه دقیق قرارگیرد. تقاضای ثابت،[۱] تقاضای وابسته به زمان،[۲] تقاضای وابسته به سطح موجودی،[۳] تقاضای وابسته به قیمت[۴] و تقاضای وابسته به قیمت و زمان[۵] صورت توأمان انواع نمونه‌های تقاضاهای قطعی هستند.

درکنار عامل تقاضا، عوامل دیگری از جمله تخفیف قیمتی، مجاز بودن یا نبودن کمبود، تورم و ارزش زمانی پول نیز مورد توجه محققین بوده است. تخفیف قیمتی یک راهکار مهم است که به طور مداوم خرده‌فروش را تشویق می‌کند که مقدارهای بیشتری خرید کند؛ بسیاری از محققان برای مدل‌سازی موجودی اقلام فاسد شدنی این عامل را مد نظر قرار داده‌اند. مجاز بودن یا نبودن کمبود از دیگر عوامل مهمی است که محققان بر آن تمرکز دارند. مطالعات بسیاری با فرض مجاز بودن کمبود وجود دارد. دو حالت در مورد مواجهه با کمبود رخ می‌دهد: حالت اول فرض می‌کند که کمبود اقلام به صورت کامل پس افت می‌شود (ژو و همکاران[۶]) و در حالت دیگر کمبود اقلام را به صورت پاره‌یی پس‌افت در نظر می‌گیرند که به بیان دیگر مشتریان انتظار دارند بخشی از میزان سفارش خود را که در دوره جاری دریافت نکردند، توسط فروشنده در دوره‌ی آتی برآورده شود. برخی تمایزات در مواجهه با تابع کمبود پس افت وجود دارد اما معمولاً تابع کمبود پس‌افت برابر با مجموع تقاضایی است که در حال حاضر موجود نیست (کمبود داریم) ولی در زمان دیگر باید تحقق یابد.

بسیاری از مقالات در ادبیات حوزه‌ی موجودی، فرض می‌کنند که اقلام موجودی را می‌توان به طور نامحدود برای پاسخ‌گویی تقاضاهای آتی، ذخیره کرد. در حالی که انواع مشخصی از محصولات وجود دارند که در طول زمان زوال[۱] می‌یابند یا منسوخ و در نتیجه، بلااستفاده می‌شوند. برای مثال، کالاهایی مانند میوه‌ها، سبزیجات، گوشت، عطرها، الکل، گازوئیل، مواد رادیواکتیو، فیلم‌های عکاسی و عناصر الکترونیکی، دوره‌ی عمر نامحدود ندارند. بنابراین، اگر نرخ زوال یا فاسد شدن در این محصولات، قابل توجه باشد، نمی‌توان تأثیر فساد را در مدل‌سازی سیستم موجودی آن‌ها نادیده گرفت.

بر اساس دیدگاه گویال و گیری[۷] کالاهای زوال‌پذیر کالاهایی هستند که دچار هرگونه آسیب‌دیدگی، ضایعات، خشک شدن، تبخیر و مانند آن می‌شوند. این نوع کالاها، به دو دسته اساسی زیر تقسیم می‌شوند:

الف) محصولات فاسدشدنی:[۲] این نوع محصولات شامل مواد غذایی، سبزی‌ها، خون انسانی، فیلم‌های عکاسی و غیره می‌شوند که یک مقدار بیشینه‌ی دوره عمر مفید برای استفاده دارند. این محصولات دارای طول عمر مشخصی هستند و پس از اتمام این زمان، قابل استفاده نیستند (لازم به توضیح است مطالعه‌ی موردی این تحقیق در این زمینه قرار می‌گیرد)؛

ب) محصولات کاهش‌پذیر:[۳] این نوع محصولات شامل الکل، بنزین، مواد رادیواکتیو و غیره می‌شوند که بیشترین طول عمر آن‌ها مشخص نیست ولی در طول زمان، بر اثر پدیده‌هایی مانند تبخیر و تصعید، کاهش می‌یابند (بخشی از آن از بین می‌رود).

در این پژوهش به بررسی قیمت‌گذاری و کنترل موجودی هم‌زمان کالاهای فاسدشدنی در زنجیره‌ی تأمین دوسطحی می‌پردازیم. هدف از ارائه‌ی این نوشتار، ارائه‌ی یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی یکپارچه در تصمیمات تولید، موجودی، حمل‌ونقل و قیمت‌گذاری محصول در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی (شامل تولیدکننده و مصرف‌کننده) محصولات فاسدشدنی، با هدف بیشینه‌سازی سود در پایان افق برنامه‌ریزی است. برای مواجهه با عدم قطعیت در مدل پیشنهادی از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار استفاده می‌شود. همچنین برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل و روش‌های حل پیشنهادی از تعدادی مسائل آزمایشی و یک مطالعه‌ی موردی استفاده شده است.

در ادامه ادبیات موضوع مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ سپس به بیان مشخصات مسئله، مدل‌سازی ریاضی مسئله و رویکرد حل مسئله خواهیم پرداخت. در پایان نتایج محاسباتی و نتیجه‌گیری پژوهش بیان خواهد شد.

۲. مرور ادبیات موضوع

دسته‌بندی تحقیقات صورت گرفته در زمینه یکپارچه‌سازی تصمیمات زنجیره‌ی تأمین به سادگی قابل انجام نیست (فهیم‌نیا و همکاران).[۸] طیف وسیعی از فرضیات وجود دارد که در مدل‌های پیشنهادی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین محققین مختلف توابع هدف متنوعی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در نتیجه ادبیات موضوع بسیار وسیع است و طبقه‌بندی واحدی وجود ندارد.

دیاز و همکاران[۹] در یک مطالعه‌ی مروری با هدف شناسایی زمینه‌هایی برای تحقیقات آتی در زمینه‌ی تولید و توزیع و دسته‌بندی، تحقیقات صورت گرفته را با توجه به معیارهایی مانند تولید، موجودی، مسیریابی، نحوه‌ی مدل‌سازی، نوع تابع هدف و نیز روش حل، مورد بررسی قرار داده‌اند.

چان و همکاران[۱۰] به منظور بهینه‌سازی یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید و توزیع ساده در زنجیره‌ی تأمین چندکارخانه‌یی، از الگوریتم ژنتیک ترکیبی و رویکرد فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی [۴] استفاده کردند. آنها از برنامه‌ریزی خطی[۵] برای مدل‌سازی مسئله و از تحلیل سلسله‌مراتبی برای سازمان‌دهی و وزن‌دهی معیارهای تصمیم‌گیری، استفاده کردند. نیشی و همکاران[۱۱] سیستم تصمیم‌گیری توزیعی را برای بهینه‌سازی یکپارچه زمان‌بندی تولید و برنامه‌ریزی توزیع مورد مطالعه قرار دادند و مدلی یکپارچه با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته ارائه کردند.

صفایی و همکاران[۱۲] روش جدیدی برمبنای یکپارچه‌سازی مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی برای حل یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید و توزیع چندمحصولی و چنددوره‌یی، پیشنهاد کردند. گِن و سیاریف[۱۳] روشی به نام الگوریتم ژنتیک ترکیبی درختی برای حل مسائل تولید، موجودی و توزیع چنددوره‌یی پیشنهاد کردند. یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی و توزیع جزئی در محیط تولید چندکارخانه‌یی توسط کانیالکار و عدیل[۱۴] ارائه شده است.

ترابی و مقدم[۱۵] مسئله‌ی تولید و توزیع یکپارچه و در حالت چندکارخانه‌یی با وجود حمل‌ونقل جانبی را در نظرگرفته و یک رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی برای حل آن ارائه دادند. وی و همکاران[۱۶] یک فرایند تولید دومرحله‌یی را در برنامه‌ریزی تولید و توزیع در نظرگرفتند که در مرحله‌ی اول، مواد خام به منابع پیوسته‌یی تبدیل شده و در مرحله‌ی دوم، تولید گسسته محصولات نهایی را تغذیه می‌کنند. علاوه بر این، زمان‌های آماده‌سازی و هزینه‌های منابع به توالی محصولات پردازش شده در مرحله‌ی اول بستگی دارد.

مسائل موجودی اقلام زوال‌پذیر نیز به طورگسترده، توسط محققان مورد مطالعه قرارگرفته است. تحقیقات در این حوزه با مطالعه‌ی ویتین[۱۷] آغاز شد که زوال‌پذیری کالاهای جدید و مد را در پایان دوره‌ی انبارش تعیین شده‌شان، در نظرگرفت. لیوتکه و

همکاران[۱۸] برای تولید محصولی خوراکی، مانند ماست، سه مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته پیشنهاد دادند که موضوع دوره‌ی عمر را در برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی مرحله‌ی بسته‌بندی در نظر بگیرند. آن‌ها میزان تازگی محصول را به صورت تابعی خطی از زمان مدل‌سازی کرده‌اند.

مسئله‌ی کنترل موجودی مروردوره‌یی برای محصولات فاسدشدنی با محدودیت‌های سطح سرویس، توسط مینر و ترانچیل[۱۹] مورد بررسی قرار گرفته است. آنها روشی را برای تعیین مقادیر سفارش پویا برای محصولات فاسدشدنی با دوره‌ی عمر محدود و موعد تحویل مشخص ارائه دادند. فراهانی و همکاران[۲۰] نیز برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه را برای محصولات غذایی فاسدشدنی، مورد بررسی قرار دادند.

کوهلو و لاپورته[۲۱] در تحقیق خود سیاست‌های مدیریت موجودی، تحویل و بازپرسازی را به صورت یکپارچه برای محصولات فاسدشدنی مطالعه کردند. آن‌ها تصمیمات مربوط به این که چه موقع، چگونه و چه مقدار از محصولات مختلف با عمرهای مختلف جایگزین شوند را بررسی کرده‌اند. یک مدل ریاضی دوهدفه برای کمینه‌سازی کل هزینه‌ی سیستم توسط رشیدی و همکاران[۲۲] برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین با تصمیمات مکان‌یابی و موجودی محصولات فاسدشدنی ارائه شده است. آنها هزینه‌های انتقال اقلام فاسدشدنی از مراکز هاب به مراکز توزیع و سپس از مراکز توزیع به مراکز نهایی، هزینه‌های انتقال سفارش‌های غیرمعمولی و هزینه‌ی ثابت مراکز توزیع را در تابع هدف اول و همچنین کمینه‌سازی کل هزینه‌های عدم پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان را به عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته‌اند.

بهینه‌سازی توزیع محصولات فاسدشدنی با در نظرگرفتن رفتار زیست‌شناختی پس از برداشت در زنجیره‌ی غذایی کشاورزی، توسط قضاوتی و همکاران[۲۳] بررسی شده است. در این تحقیق، آن‌ها یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی دوره‌یی را در سطح عملیاتی تصمیم‌گیری برای توزیع محصولات کشاورزی تازه پس از جداسازی کیفی با مطالعه‌ی موردی گوجه فرنگی ارائه کرده‌اند. رافعی و همکاران[۲۴] نیز مدلی را برای یکپارچه‌سازی تصمیمات موجودی، مکان‌یابی و مسیریابی در یک زنجیره‌ی تأمین چندمحصولی فاسدشدنی و چنددوره‌یی با وجود عدم قطعیت توسعه دادند.

میرمحمدی[۲۵] مسئله‌ی تعیین راهکار قیمت‌گذاری پویا و طول دوره‌ی بازپرسازی را برای کالاهای زوال‌پذیر با نرخ زوال متغیر و تقاضای وابسته به سطح موجودی مورد بررسی قرار داده است که در آن نرخ زوال به صورت متغیر فرض شده و در طول دو بازه‌ی زمانی متمادی، به صورت پله‌یی افزایش می‌یابد. یک مدل موجودی برای اقلام فاسدشدنی با نرخ فساد با توزیع وایبول نیز توسط پورعلیخانی و همکاران[۲۶] توسعه یافته است که در آن کنترل موجودی، قیمت‌گذاری و برنامه‌ریزی تولید، با هدف بیشینه‌سازی سود تولیدکننده تعیین می‌شود.

چانگ و همکاران[۲۷] یک مدل اقتصادی تولید را برای محصولات فاسدشدنی در یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده و مشتری توسعه داده‌اند که در آن نرخ تقاضا وابسته به قیمت فروش و تازگی کالای فاسدشدنی فرض می‌شود و تأمین کننده می‌بایست به منظور بیشینه‌سازی ارزش فعلی کل سود سالانه که با استفاده از تحلیل جریان نقدی تخفیف محاسبه می‌شود، به تعیین مقدار فروش بهینه، زمان بهینه تولید و چرخه‌ی بازپرسازی محصول بپردازد.

تائو و همکاران[۲۸] در سال ۲۰۱۹، بر راهکارهای قیمت‌گذاری و سیاست‌های موجودی در زنجیره‌ی تأمینی تمرکز داشته‌اند که در آن هدف، مقابله با عدم قطعیت در موجودی تعریف شده است. زنجیره‌ی تأمین مورد مطالعه در این تحقیق دوسطحی و شامل یک تأمین کننده و یک خرده‌فروش بوده و تفاوت‌های عملکردی بین «قرارداد قیمت عمده‌فروشی» و «قرارداد ارسال» در رفتار خرده‌فروش و تأمین‌کننده در شرایطی که خرده‌فروش نقش رهبر را در بازی استکلبرگ ایفا می‌کند، در حالت‌های مختلف مقایسه و بررسی شده است.

همچنین از بین نزدیک‌ترین مقالات به موضوع پژوهشی این مقاله که موضوع هم‌زمانی بهینه‌سازی قیمت‌گذاری و کنترل موجودی را با فرض عدم قطعیت و به صورت چنددوره‌یی در مدل‌سازی مسئله‌ی خود وارد کرده‌اند می‌توان به مقالات ارائه شده توسط جبیرا و همکاران[۲۹] و آزادی و همکاران[۳۰] اشاره کرد.

در مقاله‌ی جبیرا و همکاران،[۲۹] مسئله‌ی تعیین راهکار مشترک بازپرسازی موجودی و قیمت‌گذاری بهینه برای یک سیستم موجودی فاسدشدنی که در آن تقاضا احتمالی و وابسته به قیمت است، در نظرگرفته شده است. در این مقاله فرض شده است که کالاهای فاسد شدنی دارای طول عمر ثابت بوده و خرده‌فروش می‌تواند به منظور تقویت تقاضای مشتری به تغییر قیمت‌ها در هر دوره از فصل فروش مبادرت ورزد. هدف از حل این مسئله، یافتن بهترین راهکار قیمت‌گذاری پویا و مقدار سفارش بهینه بوده و اثربخشی قیمت‌گذاری بر سود حاصله و مقدار کالای تلف شده در سناریوهای مختلف، تحلیل و بررسی شده است.

آزادی و همکاران[۳۰] یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی تصادفی را پیشنهاد کرده‌اند که به انتخاب تأمین‌کنندگان، تشخیص زمان‌بندی بازپرسازی در یک سیستم موجودی دوره‌یی با تقاضا و عرضه‌ی غیرثابت پرداخته و زمان و اندازه‌ی کاهش قیمت را به منظور بیشینه‌سازی سود خرده‌فروش تعیین می‌کند. مدل پیشنهاد شده در این تحقیق از یک نرخ تنزیل قیمت برای تحریک تقاضا و کمینه‌سازی در هدر رفت کالاهای فاسدشدنی استفاده می‌کند.

گرچه هریک از زیرمسائل برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی، قیمت‌گذاری، حمل‌ونقل و توزیع محصول به صورت جدا از هم در مقالات متعددی بررسی شده‌اند، اما مقالاتی نیز با توجه به اهمیت یکپارچگی برنامه‌ریزی، این تصمیمات را به صورت هم‌زمان مورد توجه قرار داده‌اند. در این بین، پرداختن به فسادپذیری محصول و مقالاتی که به قیمت‌گذاری و کنترل موجودی این محصولات بپردازد، کم‌تر ملاحظه می‌شود. با توجه به اهمیت یافتن بیش از پیش زنجیره‌ی تأمین محصولات فسادپذیر در این تحقیق به موضوع یکپارچه‌سازی تصمیمات زنجیره‌ی تأمین این محصولات پرداخته می‌شود. نوآوری‌های اصلی این تحقیق عبارت‌اند از: ۱. ارائه‌ی مدلی چنددوره‌یی برای برنامه‌ریزی یکپارچه در تصمیمات تولید، موجودی، حمل‌ونقل و قیمت‌گذاری محصولات در زنجیره‌ی تأمین محصولات فاسدشدنی، ۲. به کارگیری رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت تقاضای دوره‌یی مشتریان، ۳. ارائه‌ی یک مطالعه‌ی موردی در زمینه‌ی ملات سبزکه در صنعت فولاد کاربرد دارد. لازم به ذکر است که نمونه‌ی مشابه پژوهش حاضر در مجلات انگلیسی مشاهده نشده است.

در جدول ۱، تحقیقات صورت گرفته به طور مختصر جمع‌بندی شده و حاصل آن همراه با نوآوری‌هایش با پژوهش حاضر مقایسه شده است.

۳. مشخصات مسئله

یک زنجیره‌ی تأمین دو سطحی[۶] را در نظر بگیرید که در آن محصولی فاسدشدنی[۷] با طول عمر محدود، از مراکز تولید به مشتریان عرضه می‌شود. در سطح اول، کارخانه‌ها (مراکز تولید) یا به عبارت دیگر عرضه‌کنندگان با ظرفیت محدود قرار دارند. در سطح دوم نیز مشتریان محصول این زنجیره‌ی تأمین قرارگرفته‌اند که در دوره‌های مختلف

جدول ۱. مقایسه‌ی پژوهش حاضر با برخی از پژوهش‌های اخیر.

منبع	ساختار زنجیره‌ی تأمین			تصمیمات					فسادپذیری محصول		عدم قطعیت	روش حل	مطالعه‌ی موردی
	تعداد سطوح	تک دوره‌یی	چند دوره‌یی	قیمت‌گذاری	موجودی	حمل و نقل	قیمت‌گذاری- موجودی	قیمت‌گذاری- موجودی- حمل و نقل	B	A			
[۱۲]	۲	-	*	-	*	*	-	-	-	-	-	MMS	-
[۱۳]	۲	-	*	-	*	*	-	-	-	-	-	HGA	-
[۱۵]	۲	-	*	-	*	*	-	-	-	-	*	FGP	-
[۱۸]	۳	-	-	-	-	-	*	-	-	*	-	MILP	-
[۱۹]	۲	-	*	-	-	-	-	-	-	*	-	-	*
[۲۰]	۲	-	*	-	*	*	-	-	-	*	-	-	-
[۲۱]	۳	-	*	-	-	-	-	-	-	*	-	-	-
[۲۳]	۴	-	-	-	*	-	-	-	-	*	-	BDA	-
[۲۴]	۳	-	*	-	*	*	-	-	-	*	-	LR&HA	-
[۲۶]	۲	-	*	-	-	-	*	-	-	*	*	-	-
[۲۷]	۳	-	*	-	-	-	*	-	*	-	-	EPQ	-
[۲۸]	۲	-	-	-	-	-	*	-	-	-	*	SP	-
[۲۹]	۲	-	*	-	-	-	*	-	*	-	*	SP	-
[۳۰]	۲	-	*	-	-	-	-	*	*	-	*	SP	*
تحقیق حاضر	۲	-	*	*	*	*	*	*	-	*	*	RPP	*

MILP: برنامه‌ریزی خطی آمیخته، LP: برنامه ریزی خطی، AHP: تحلیل سلسله مراتبی، NLP: برنامه‌ریزی غیرخطی، SP: برنامه‌ریزی تصادفی، RPP: برنامه‌ریزی امکانی استوار، FGP: برنامه ریزی آرمانی فازی، MMS: مدل ریاضی شبیه سازی، BDA: الگوریتم تجزیه بندرز LR&HA: آزادسازی لاگرانژ و یک الگوریتم ابتکاری، EPQ: مدل اقتصادی تولید

A: فساد پذیری از نوع طول عمر ثابت و محدود، B: فسادپذیری از نوع زوال دوره‌یی با نرخ مشخص.

متقاضی محصول هستند. مقدار تقاضای مشتریان به صورت اسمی برآورد شده است ولی قطعی نیست.

تقاضای مشتریان به قیمت و تازگی محصول وابسته است که به ترتیب با عامل اول، رابطه‌ی معکوس و با عامل دوم، رابطه‌ی مستقیم دارد. عدم تازگی محصول (نزدیک شدن به تاریخ انقضاء) بر تقاضای بالقوه، تأثیرگذار است و از ارزش محصول می‌کاهد. به ازای قیمت پایه‌ی تعیین شده برای محصول تازه، یک برآورد از تقاضای مشتریان در دسترس است که بر اساس نظر کارشناس، تقاضا به صورت اعداد فازی بیان می‌شود. مشتریان در صورتی که محصول تازه نباشد از تقاضای خود می‌کاهند. عرضه‌کننده برای جلوگیری از کاهش تقاضا، باید قیمت‌گذاری محصول را با نرخ‌های تخفیف برای محصولاتی که تازه نیستند انجام دهد تا بار دیگر مشتریان متمایل شوند تقاضای خود را به طور کامل سفارش دهند. از طرف دیگر، هزینه‌های تولید، بازاریابی محصول، راه‌اندازی کارخانه، حمل‌ونقل، نگهداری و غیره موجب می‌شود که حداقل قیمت تولیدکننده محدود شود. در نتیجه، تولیدکننده باید با کنترل هزینه‌های خود و با در نظرگرفتن این که تازگی محصول برای مشتریان حائز اهمیت است، قیمت محصول را طوری تعیین کند که بیشترین سود (و نه الزاماً بیشترین تولید) حاصل شود.

مشتریان محصول تمایل دارند که محصول را با عمر باقیمانده بیشتر (موعد تحویل نزدیک به هم و با حجم سفارش کم) و قیمت کم‌تری خریداری کنند که هم ریسک فاسد شدن آن کم‌تر شود و هم با فروش آن، سود بیشتری کسب کنند. این در حالی است که عرضه کننده تمایل دارد برای کم‌تر شدن هزینه‌های حمل‌ونقل و توزیع محصول و سرشکن کردن هزینه‌های ثابت راه‌اندازی کارخانه، میزان تولید در هر دوره‌ی تحویل، افزایش یابد و تحویل به خرده‌فروشان در دفعات کم‌تر و با حجم بیشتر صورت پذیرد.

به منظور مدیریت موجودی انبار مراکز توزیع و خرده‌فروشان، سه سیاست مختلف قابل اجراست. در سیاست اول که آن را سیاست ابتدا ـ تازه (FF) [۸] می‌نامیم، ابتدا محصولات تازه‌تر از انبار خارج می‌شوند. در سیاست دوم که آن را سیاست ابتدا ـ قدیمی (OF) [۹] می‌نامیم، ابتدا محصول با عمر بیشتر (نزدیک‌تر به تاریخ انقضاء) از انبار خارج می‌شود. و در نهایت در سیاست سوم که اولویت بهینه (OP) [۱۰] نامیده می‌شود، اولویت خروج محصولات از انبار به صورت بهینه با در نظرگرفتن تصمیمات دیگر، مشخص می‌شود. نتایج عددی ارائه شده در یکی از مطالعات[۲۱] نشان می‌دهد که به کارگیری سیاست OP در مدیریت موجودی انبار محصولات فاسد شدنی با عمر محدود، موجب بیشینه شدن سود می‌شود. از این رو، در این تحقیق نیز سیاست OP برای مدیریت موجودی محصول در نظرگرفته می‌شود.

فرض می‌شود محصول قابل استفاده مجدد (بازیافت) است. به عبارت دیگر، در صورت فاسد شدن محصول، می‌توان از آن ارزش کسب کرد (با استفاده مجدد به عنوان ماده‌ی اولیه، فروش به بازار دیگر و مانند آن) و به درآمدها افزود. واضح است که درآمد بازیافت هر واحد محصول از قیمت فروش آن کم‌تر است ولی غیر صفر بودن آن می‌تواند بر تصمیمات اندازه انباشته و سطح موجودی در هر دوره تأثیرگذار باشد.

هدف بیشینه‌سازی سود شرکت/بنگاه عرضه‌کننده‌ی محصول است. مدیران این بنگاه اقتصادی قصد دارند با برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی بهینه (تعیین دوره‌های تولید، اندازه انباشته تولید در هر دوره، سطح موجودی بهینه‌ی انبار) و هماهنگ‌سازی آن با برنامه‌ریزی توزیع (حمل‌ونقل محصول به مشتریان) سود خود را بهینه کنند. تقاضای مشتریان به قیمت و تازگی محصول وابسته است که به ترتیب با عامل اول، رابطه‌ی معکوس و با عامل دوم، رابطه‌ی مستقیم دارد. عدم تازگی محصول (نزدیک شدن به تاریخ انقضاء) بر تقاضای بالقوه، تأثیرگذار است و از ارزش محصول می‌کاهد. به ازای ارزش/قیمت پایه‌ی تعیین شده برای محصول تازه، یک برآورد از تقاضای مشتریان در دسترس است که بر اساس نظر کارشناس، تقاضا به صورت اعداد فازی بیان می‌شود. مشتریان در صورتی که محصول تازه نباشد از تقاضای خود می‌کاهند. عرضه‌کننده برای جلوگیری ازکاهش تقاضا، باید قیمت‌گذاری محصول را با نرخ‌های تخفیف برای محصولاتی که تازه نیستند انجام دهد تا بار دیگر مشتریان راغب شوند تقاضای خود را به طور کامل سفارش دهند. از طرف دیگر، هزینه‌های تولید، بازاریابی محصول، راه‌اندازی کارخانه، حمل‌ونقل، نگهداری و غیره موجب می‌شوند که حداقل قیمت تولیدکننده محدود شود. ازاین‌رو، تولیدکننده باید با کنترل هزینه‌های تولید، نگهداری، کمبود، حمل‌ونقل و غیره و با در نظرگرفتن این که تازگی محصول برای مشتریان حائز اهمیت است، قیمت بهینه‌ی محصول را طوری تعیین کند که بیشترین سود (نه لزوماً بیشترین تولید) حاصل شود.

در کنار تصمیمات قیمت‌گذاری محصول، برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی محصول، بسیار مهم است. اهمیت این تصمیمات زمانی بیشتر می‌شود که محصول مورد نظر، فاسد شدنی با عمر محدود است و تازگی محصول بر ارزش آن اثرگذار است. فرض کنید پس از تعیین قیمت، کل تقاضای بازار در یک سیکل مشخص (مثلاً سالانه یا ماهانه یا هفتگی) برآورد شده و معین است؛ ولی در تقاضای دوره‌یی مشتریان، نوسان وجود دارد. ساختار زنجیره‌ی تأمین مورد نظر در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

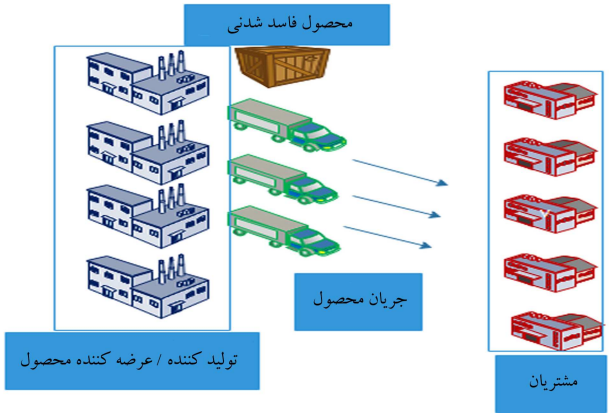
به طور خلاصه، در این تحقیق در پی یافتن مقدار بهینه‌ی متغیرهای تصمیم‌گیری تولید کننده به شرح زیر هستیم:

۱. قیمت‌گذاری محصول (نرخ تخفیف برای محصولات با تازگی مختلف)؛

۲. برنامه‌ریزی تولید (دوره‌های تولید و اندازه انباشته تولید در هر دوره)؛

۳. کنترل موجودی مبتنی بر سیاست OP؛

۴. تخصیص تقاضای مشتریان به مراکز تولیدی و حمل‌ونقل.



شکل ۱. ساختار زنجیره‌ی تأمین دوسطحی مسئله.

همچنین مفروضاتی که در مدل‌سازی و حل مسئله‌ی در نظر گرفته شده است عبارت‌اند از:

۱. در هر دوره، ظرفیت تسهیلات تولید محدود است؛

۲. در هر دوره، ظرفیت حمل‌ونقل محدود است؛

۳. گنجایش انبار در هر کارخانه محدود است؛

۴. طول عمر محصول محدود است. در جابه‌جایی موجودی انبار از دوره t به $t+1$، یک روز تاریخ انقضاء محصول نزدیک‌تر می‌شود؛

۵. قیمت فروش به همه مشتریان یکسان است؛

۶. رابطه‌ی تقاضا نسبت به عدم تازگی محصول، خطی معکوس است؛

۷. رابطه‌ی تقاضا نسبت به تخفیف، خطی مستقیم است؛

۸. کمبود دوره‌یی غیرمجاز (و به صورت سفارش از دست رفته[11] است) و در صورت بروز، هزینه‌ی کمبود اعمال می‌شود؛

۹. تقاضای مشتریان در هر دوره غیرقطعی است و با نظر کارشناسان در هر دوره به صورت اعداد فازی ذوزنقه‌یی (TFN)[12] بیان می‌شود ($\tilde{f}=(f_1,f_2,f_3,f_4)$).

۴. مدل‌سازی ریاضی مسئله

در این بخش به بررسی نحوه‌ی مدل‌سازی ریاضی مسئله می‌پردازیم. در ادامه، نمادها و علائم ریاضی به کارگرفته شده در مدل پیشنهادی شرح داده شده است.

۱.۴. مجموعه‌ها و نمایه‌های مدل

$\mathcal{F}=\{1,2,...,|\mathcal{F}|\}$: مجموعه‌ی کارخانه‌ها (نمایه‌گذاری با f)؛

$\mathcal{R}=\{1,2,...,|\mathcal{R}|\}$: مجموعه‌ی مشتریان (نمایه‌گذاری با r)؛

$\mathcal{T}=\{1,2,...,|\mathcal{T}|\}$: مجموعه‌ی دوره‌های زمانی (نمایه‌گذاری با t)؛

$\mathcal{G}=\{1,2,...,|\mathcal{G}|\}$: مجموعه‌ی دوره‌های قابل مصرف محصول (نمایه‌گذاری با g). $|\mathcal{G}|$ معادل عمر محصول است.

- **پارامترهای مدل**

A_f: هزینه‌ی ثابت راه‌اندازی کارخانه‌ی f در هر دوره؛

pc_f: هزینه‌ی متغیر تولید یک واحد محصول در کارخانه f؛

h_f^g: هزینه‌ی نگهداری هر واحد محصول با عمر g در انبار کارخانه f؛

b_r: هزینه‌ی کمبود هر واحد تقاضای مشتری r؛

$tc^{f\to r}$: هزینه‌ی حمل‌ونقل واحد محصول از کارخانه f به مشتری r؛

$Tcap_{fr}$: ظرفیت دوره‌یی حمل‌ونقل از کارخانه f به مشتری r؛

$Pcap_f$: ظرفیت دوره‌یی تولید کارخانه‌ی f؛

$Hcap_f$: گنجایش انبار کارخانه‌ی f؛

ρ: قیمت (ارزش) هر واحد محصول؛

γ: قیمت (ارزش) هر واحد محصول بازیافت شده؛

$\tilde{D}_{rt}=\left(D_{rt}^{(1)},D_{rt}^{(2)},D_{rt}^{(3)},D_{rt}^{(4)}\right)$: مقدار تقاضای مشتری r در دوره t به صورت یک عدد فازی ذوزنقه‌یی.

- **متغیرهای تصمیم مدل**

y_{ft}: به صورت متغیر صفر و ۱ است؛ اگر کارخانه‌ی f در دوره‌ی t محصول

تولید کند برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد بود؛

p^g: قیمت محصول با عمر g؛

d^g: نرخ تخفیف محصول با عمر g؛

Q_{ft}: مقدار تولید کارخانه‌ی f در دوره‌ی t؛

I^g_{ft}: سطح موجودی محصول با عمر g درکارخانه‌ی f در دوره‌ی t؛

L_{rt}: مقدار فروش از دست رفته مربوط به مشتری r در دوره‌ی t؛

$S^{gf\to r}_l$: میزان فروش محصول با عمر g ازکارخانه‌ی f به مشتری r در دوره‌ی t؛

w_t: مقدار محصول فاسد شده در دوره‌ی t.

هرچند برخی از پارامترهای در نظرگرفته شده و بعضی از متغیرهای تصمیم وابسته به زمان هستند اما چون تغییرات آنها در طول افق زمانی ناچیز بوده (به علت فضای رقابتی بازار) و همچنین برای سادگی در مدل‌سازی، این پارامترها وابسته به زمان در نظرگرفته نشده‌اند.

با این فرض که تقاضا برای محصول تازه در حداقل قیمت برابر با ψ باشد، تابع تقاضا نسبت به قیمت، چنین تعریف می‌شود:

$$\mathfrak{D}(\rho)=\psi(1-\alpha\rho)^{\frac{1}{\upsilon}} \qquad (1)$$

که در آن ρ قیمت محصول و α و υ ثابت‌های نامنفی هستند وکشش قیمتی تقاضا را بیان می‌کنند،[۳۱و۳۲] توجه کنید که $\rho\le\frac{1}{\alpha}$ است. همچنین اگر $\upsilon=1$ باشد، تابع خطی خواهد بود. حالات $\upsilon<1$ و $\upsilon>1$ نیز به ترتیب موجب تحدب و تقعر تابع تقاضا می‌شوند. با برآورد ψ، α و υ (براساس داده‌های تاریخی و نظرکارشناسان)، یک مقدار اسمی[۱۳] برای تقاضای هر مشتری برآورد می‌شود ($\overline{D}_{rt}$ به عنوان برآورد اسمی تقاضای مشتریان). سپس، برای کاهش ریسک برآورد نقطه‌یی، آشفتگی[۱۴] در مقدار اسمی نیز در نظرگرفته می‌شود. برآورد فازی مقدار تقاضا به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\tilde{D}_{rt}=\left(D^{(1)}_{rt},D^{(2)}_{rt},D^{(3)}_{rt},D^{(4)}_{rt}\right)\\
&D^{(1)}_{rt}=(1-\beta_{1rt})\,\bar{D}_{rt}\\
&D^{(2)}_{rt}=(1-\beta_{2rt})\,\bar{D}_{rt}\\
&D^{(3)}_{rt}=(1+\beta_{3rt})\,\bar{D}_{rt}\\
&D^{(4)}_{rt}=(1+\beta_{4rt})\,\bar{D}_{rt}
\end{aligned} \qquad (2)$$

به نحوی که $1\ge\beta_{1rt}\ge\beta_{2rt}\ge0$ کمینه و بیشینه‌ی درصد آشفتگی رو به پایین نسبت به مقدار اسمی هستند و $2\ge\beta_{3rt}\ge\beta_{4rt}\ge0$ کمینه و بیشینه درصد آشفتگی رو به بالا نسبت به مقدار اسمی هستند. با توجه به آن که $\tilde{D}_{rt}$ تابع تقاضا برای محصول تازه ($g=1$) است و عدم تازگی محصول به صورت خطی موجب کاهش تقاضا می‌شود، لذا بیشترین مقدار قابل عرضه محصول با عمر g چنین بیان می‌شود:

$$\mathcal{S}^g=\begin{cases}\theta\tilde{D}_{rt} & \forall g\in\mathcal{G}\\ 0 & \forall g>|\mathcal{G}|\end{cases} \qquad (3)$$

که در آن $\theta=1-\frac{g-1}{|\mathcal{G}|}$ تازگی محصول (نسبت باقیمانده عمر محصول) را نشان می‌دهد. این رابطه یعنی به دلیل عدم تازگی محصول، بخشی از تقاضای بالقوه محصول به صورت از دست رفته است و با استفاده از سیاست تخفیف جذب مشتری، باید جبران شود. در این‌جا، متغیر تصمیم‌گیری در مورد نرخ تخفیف (یا قیمت‌گذاری) محصولات با درجه تازگی مختلف مطرح می‌شود. با توجه به آن‌که فرض شده است تخفیف به صورت خطی موجب افزایش تقاضا می‌شود، با اعمال تخفیف d^g، مقدار تقاضا (مقدار قابل عرضه محصول با عمر g) برابر با $(1-\frac{g-1}{|\mathcal{G}|}+d^g)\tilde{D}_{rt}$ می‌شود. توجه شود که $d^g\le(g-1)/|\mathcal{G}|$ است. با توجه به توضیحات داده شده، مدل ریاضی ارائه شده برای مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}
\max z=&\Big(\sum_f\sum_r\sum_g\sum_t p^gS^{gf\to r}_t+\sum_t\gamma w_t\Big)-\\
&\Big(\sum_f\sum_t A_f y_{ft}+\sum_f\sum_t pc_fQ_{ft}+\\
&\sum_f\sum_g\sum_t h^g_fI^g_{ft}+\sum_r\sum_t b_rL_{rt}+\\
&\sum_f\sum_r\sum_g\sum_t tc^{f\to r}S^{gf\to r}_t\Big)
\end{aligned} \qquad (4)$$

$$Q_{ft}\le Pcap_f y_{ft}\qquad\forall f,t \qquad (5)$$

$$Q_{ft}=\sum_r S^{g=1\,f\to r}_t+I^1_{ft}\qquad\forall f,t \qquad (6)$$

$$I^g_{ft}=I^{g-1}_{ft-1}-\sum_r S^{gf\to r}_t\qquad\forall d,t,g\in\mathcal{G}\setminus\{1\} \qquad (7)$$

$$\sum_{g\in\mathcal{G}}I^g_{ft}\le Hcap_f\qquad\forall f,t \qquad (8)$$

$$S^{gf\to r}_t\le Tcap_{fr}\qquad\forall f,r,t \qquad (9)$$

$$\sum_f\sum_g S^{gf\to r}_t=\tilde{D}_{rt}-L_{rt}\qquad\forall r,t \qquad (10)$$

$$\sum_f S^{gf\to r}_t\le\left((1-\frac{g-1}{|\mathcal{G}|})+d^g\right)\tilde{D}_{rt}\qquad\forall r,g,t \qquad (11)$$

$$0\le d^g\le\frac{g-1}{|\mathcal{G}|}\le1\qquad\forall g \qquad (12)$$

$$w_t=\sum_f I^{|\mathcal{G}|}_{ft-1}-\sum_r S^{|\mathcal{G}|f\to r}_t\qquad\forall t \qquad (13)$$

$$p^g=(1-d^g)\,\rho^g\qquad\forall g \qquad (14)$$

$$p^g,Q_{ft},q^{f\to d}_t,S^{gf\to r}_t,I^g_{ft},L_{rt},w_t,d^g\ge0$$

$$y_{ft}\in\{0,1\} \qquad (15)$$

بیشینه کردن سود به کمک رابطه‌ی ۴ بیان شده است. بخش اول این رابطه، مقدار درآمد حاصل از فروش محصول در دوره عمرو محصول فاسد شده را نشان می‌دهد (توجه کنید که در حالتی خاص، امکان دارد $\gamma=0$ باشد که به این معناست که محصول فاسد شده بدون استفاده است و بازیافت و استفاده مجدد از آن ارزش ندارد). بخش دوم نیز نشان‌دهنده‌ی مجموع هزینه‌هاست که به پنج زیربخش، تفکیک شده است. زیربخش اول، هزینه‌های مربوط به راه‌اندازی کارخانه‌های تولیدی است (لازم به توضیح است که این هزینه مربوط به مکان‌یابی و استقرارکارخانه‌ها نیست چرا که فرض شده است این تسهیلات از پیش موجودند؛ ولی برای تولید در هر دوره نیاز به هزینه‌ی ثابت راه‌اندازی است). زیربخش دوم، هزینه‌ی متغیر تولید را نشان می‌دهد. زیربخش سوم و چهارم به ترتیب هزینه‌های نگهداری و کمبود را نشان می‌دهند و نهایتاً در زیربخش پنجم، هزینه‌های حمل‌ونقل محصول محاسبه می‌شود.

دسته محدودیت ۵ بیان می‌کند که تولید در هر کارخانه در هر دوره، مستلزم راه‌اندازی کارخانه است و بیشترین مقدار تولید نیز برابر با ظرفیت کارخانه می‌تواند باشد. دسته محدودیت ۶ تعادل بین مقدار تولید در هر کارخانه، مقدار محصول تازه ($g=۱$) عرضه شده به مشتریان و موجودی کارخانه را برقرار می‌کند. توجه شود که به طور بدیهی محصولی که در هر دوره تولید می‌شود کاملاً تازه است. موجودی محصول با عمر $g \in \mathcal{G}\backslash\{۱\}$ در هر کارخانه به کمک دسته محدودیت ۷ محاسبه می‌شود. برای اطمینان از رعایت شدن بیشترین گنجایش نگهداری محصولات تولید شده در هر کارخانه دسته محدودیت ۸ به مدل اضافه شده است.

دسته محدودیت ۹ تضمین می‌کند که ظرفیت حمل‌ونقل (بیشینه‌ی توزیع محصول) از هر کارخانه به هر مشتری در هر دوره رعایت شود. برآورده شدن تقاضای مشتریان با دسته محدودیت ۱۰ اعمال می‌شود. در رویکرد اسمی، $\tilde{D}_{et}=\overline{D}_{rt}$ جایگزین و مقدار کمبود نسبت به این برآورد اسمی در نظر گرفته می‌شود. کاهش تقاضا نسبت به عامل عدم تازگی و افزایش تقاضا نسبت به کاهش قیمت یا تخفیف به کمک ۱۱ اعمال می‌شود. دسته محدودیت ۱۲ بیان‌گر بیشترین تخفیف است. مشخص است که اگر محصول کاملاً تازه باشد نیاز به تخفیف نیست.

مقدار محصولات فاسد شده به کمک دسته محدودیت ۱۳ محاسبه می‌شود. محدودیت ۱۴ قیمت محصول را مشخص می‌کند. در نهایت نوع متغیرهای تصمیم مسئله‌به کمک محدودیت ۱۵ بیان شده است.

۵. رویکرد حل مسئله

تقاضای مشتریان در دوره‌های مختلف از جمله مواردی است که در تصمیم‌گیری بسیار تأثیرگذار است و معمولاً در دنیای واقعی با عدم قطعیت همراه است. عدم ارائه‌ی رویکردی مناسب برای مواجهه با این عدم قطعیت، ریسک تصمیم‌گیری را بالا می‌برد. تصمیم‌گیری بر اساس نتایج مدل اسمی، ممکن است بهینه نباشد و از آنچه در عمل اتفاق خواهد افتاد انحراف زیادی داشته باشد. در این پژوهش، فرض می‌کنیم گرچه مقدار قطعی تقاضای مشتریان در دوره‌های مختلف در دسترس نیست، اما بر اساس داده‌های تاریخی و همچنین نظر کارشناسان، مقادیر غیرقطعی تقاضا به صورت یک عدد فازی قابل بیان است. از این رو از روش برنامه‌ریزی امکانی استوار[۱۵] برای حل مسئله استفاده می‌شود که در ادامه به آن می‌پردازیم.

۱.۵. توسعه برنامه‌ریزی امکانی استوار برای حل مسئله

مدل برنامه‌ریزی فازی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \min \tilde{c}x \\ s.t. \\ Ax \geq \tilde{b} \\ x \in X \end{cases} \qquad (۱۶)$$

$\tilde{b}=(b^{(۱)},b^{(۲)},b^{(۳)},b^{(۴)})$ و $\tilde{c}=(c^{(۱)},c^{(۲)},c^{(۳)},c^{(۴)})$ بردار اعداد فازی ذوزنقه‌یی و $c^{(۱)}<c^{(۲)}\leq c^{(۳)}<c^{(۴)}$ و $b^{(۱)}<b^{(۲)}\leq b^{(۳)}<b^{(۴)}$ اعداد قطعی[۱۶] هستند. بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی امکانی، ابتدا یک سطح $\alpha(\alpha\times ۱۰۰)٪$ برای برقراری قیود در نظر گرفته می‌شود، سپس اندازه‌ی امکان[۱۷] α برای قیود چنین لحاظ می‌شود:

$$\begin{cases} \min E\left(\tilde{c}\right)x \\ s.t. \\ \text{Poss}\left(Ax\geq\tilde{b}\right)\geq\alpha \\ x\in X \end{cases} \qquad (۱۷)$$

با توجه به مفهوم امید ریاضی اعداد فازی ذوزنقه‌یی و با در نظرگرفتن خواص اندازه الزام، برنامه‌ریزی امکانی فوق بر اساس روش برنامه‌ریزی با شانس محدود شده‌ی فازی معادل با مدل غیرفازی شده زیر خواهد بود:[۳۳]

$$\begin{cases} \min\left(\frac{c^{(۱)}+c^{(۲)}+c^{(۳)}+c^{(۴)}}{۴}\right)x \\ s.t. \\ Ax\geq\alpha b^{(۴)}+(۱-\alpha)b^{(۳)} \\ x\in X \end{cases} \qquad (۱۸)$$

پیشوایی و همکاران[۳۴] با در نظرگرفتن دو مفهوم استواری موجه بودن و استواری بهینگی، رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار را توسعه دادند که در آن سطح امکان α به عنوان یک متغیر در نظرگرفته شده و به صورت فعالانه و واقع‌گرایانه در مدل به دست می‌آید. فرم کلی مدل امکانی استوار به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} &\min\left(\frac{c^{(۱)}+c^{(۲)}+c^{(۳)}+c^{(۴)}}{۴}\right)x+ \\ &\varphi\left[b^{(۴)}-\left(\alpha b^{(۴)}+(۱-\alpha)b^{(۳)}\right)\right] \\ &s.t. \\ &Ax\geq\alpha b^{(۴)}+(۱-\alpha)b^{(۳)} \\ &x\in X \\ &۰/۵\leq\alpha\leq۱ \end{aligned} \qquad (۱۹)$$

که در آن $\varphi\geq ۰$ یک پارامتر کنترلی برای استواری موجه بودن است (معمولاً یا با تحلیل حساسیت به دست می‌آید و یا برابر با هزینه‌ی کمبود در نظرگرفته می‌شود). در رویکرد امکانی استوار این بار α یک متغیر است که نشان می‌دهد تا چه اندازه امکان برقراری قیود وجود دارد.

در مدل پیشنهادی این پژوهش، رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ دارای پارامتر غیرقطعی $\tilde{D}_{rt}$ هستند. با به کارگیری رویکرد امکانی استوار، این رابطه‌ها به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\sum_f\sum_g S_t^{gf\to r}=\alpha {d_{rt}}^{(۴)}+(۱-\alpha){d_{rt}}^{(۳)}-L_{rt} \qquad (۲۰)$$

$$\begin{aligned} &\sum_f S^{gf\to r}_t\leq \\ &(۱-\tfrac{g-۱}{|\mathcal{G}|})+d^g)(\alpha {d_{rt}}^{(۴)}+(۱-\alpha){d_{rt}}^{(۳)}) \\ &\forall r,g,t \end{aligned} \qquad (۲۱)$$

همچنین تابع هدف مدل نیز به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\begin{aligned}\max z = &(\sum_f \sum_r \sum_g \sum_t p^g S^{gf\to r}_t + \sum_t \gamma w_t) - \\ &(\sum_f \sum_t A_f y_{ft} + \sum_f \sum_t pc_f Q_{ft} + \sum_f \sum_g \sum_t h^g_f I^g_{ft} + \\ &\sum_r \sum_t \varphi_r (d_{rt}{}^{(۴)} - (\alpha d_{rt}{}^{(۴)} + (۱-\alpha) d_{rt}{}^{(۳)})) + \\ &\sum_f \sum_r \sum_g \sum_t tc^{f\to r} S^{gf\to r}_t)\end{aligned} \qquad (۲۲)$$

که در آن $0 \le \varphi_r \le b_r$ و $d_{rt}{}^{(۴)} - (\alpha d_{rt}{}^{(۴)} + (۱-\alpha) d_{rt}{}^{(۳)}) = (۱-\alpha)(d_{rt}{}^{(۴)} - d_{rt}{}^{(۳)})$ به ترتیب جریمه‌ی کمبود و مقدار ریسک هستند. اگر φ_r زیاد باشد، $(۱-\alpha)$ برابر صفر می‌شود تا از جریمه بیش از حد کمبود جلوگیری شود (دقت کنید که $d^{(۴)}_{rt} - d^{(۳)}_{rt}$ مقداری ثابت است).

مدل نهایی (چه در حالت اسمی و چه در حالت امکانی استوار) یک مدل برنامه‌ریزی درجه دو آمیخته است. دلیل خطی نبودن مدل، ضرب متغیر قیمت در مقدار فروش در تابع هدف است. گرچه مدل‌های درجه دو آمیخته از رده‌ی قابل حل مدل‌های غیرخطی هستند[۳۵] ولی می‌توان از تقریب خطی نیز استفاده کرد (مثلاً با استفاده از روش مک‌کورمیک).[۳۶] لازم به توضیح است که تقریب خطی مبتنی بر روش مک‌کورمیک با فرض $x = p^g$ و $y = S^{gf\to r}_t$ چنین انجام می‌شود:

$$\begin{cases} u \approx x.y : x \in [x^L, x^U], y \in [y^L, y^U] \\ u \ge xy^U + x^U y - x^U y^U \\ u \ge xy^L + x^L y - x^L y^L \\ u \le xy^U + x^L y - x^L y^U \\ u \le xy^L + x^U y - x^U y^L \end{cases} \qquad (۲۳)$$

در صورتی که مدل درجه دو آمیخته اجرا شود، استفاده از حل کننده BARON پیشنهاد می‌شود. در صورت خطی‌سازی نیز، CPLEX می‌تواند به کار گرفته شود. در این پژوهش با استفاده از روش مک‌کورمیک مدل به یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته تبدیل و سپس حل می‌شود.

۶. نتایج محاسباتی

در این بخش به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده و نشان دادن کاربردپذیری آن، به حل یک مطالعه‌ی موردی و همچنین مثال‌های عددی از مسئله می‌پردازیم. شرکت پاترون یک شرکت دانش‌بنیان و تولیدکننده‌ی ملات سبز است. از داده‌های این شرکت به عنوان یک مطالعه‌ی موردی از مسئله استفاده شده است. لازم به ذکر است، از آن‌جا که مدل ریاضی این تحقیق با در نظر گرفتن رویکردهای حل پیشنهادی به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته در می‌آید، برای حل آن از CPLEX Solver موجود در نرم‌افزار GAMS نسخه‌ی ۲۴,۷,۱، که جواب بهینه‌ی سراسری مسئله را تضمین می‌کند استفاده شده است.

گرین‌پات (ملات سبز یا کرومیتی) از جمله محصولات و تولیدهای مهم شرکت پارتون است که به عنوان یک ماده‌ی اولیه‌ی مهم به کارخانجات فولادسازی عرضه می‌شود. این ملات سبز، معمولاً در تمام ماه‌های سال مورد تقاضا قرار می‌گیرد ولی در مقدار تقاضای ماهانه‌ی آن نوسانات زیادی وجود دارد. تاریخ انقضای محصول تقریباً ۳ ماه است. ظرفیت بالقوه‌ی ماهیانه ۲۰۰۰ کیلوگرم قابل تولید است که در صورت راه‌اندازی خط تولید برای این محصول در هر دوره (ماه) هزینه‌یی نزدیک به ۳۰ میلیون تومان (برای آماده‌سازی خط تولید ملات سبز) در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌ی واحد تولید محصول ۲۹ هزار تومان به ازای هر کیلوگرم است. هزینه‌ی نگهداری هر واحد محصول نیز ماهانه ۲٫۵ هزار تومان است و ظرفیت نگهداری تقریباً ۶۰۰۰ کیلوگرم وجود دارد. در صورت کمبود، هزینه‌ی ۱۵ هزار تومانی برای هر کیلوگرم برآورد شده است. اطلاعات مربوط به مطالعه‌ی موردی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. داده‌های مطالعه‌ی موردی (ملات سبز شرکت پاترون).

داده	مقدار
$\lvert\mathcal{F}\rvert$	۱
$\lvert\mathcal{R}\rvert$	۲۰
$\lvert\mathcal{T}\rvert$	۱۲ (ماه‌های سال)
$\lvert\mathcal{G}\rvert$	۳
A_f	۳۰ میلیون (۳۰۰۰۰۰ هزار)
pc_f	۲۹ هزار
h^g_f	۲٫۵ هزار
b_r	۱۵ هزار
$tc^{f\to r}$	۳ هزار
$Tcap_{fr}$	۶ تن (۶۰۰۰ کیلوگرم)
$Pcap_f$	۶ تن (۶۰۰۰ کیلوگرم)
$Hcap_f$	۶ تن (۶۰۰۰ کیلوگرم)
γ	۳۶ هزار
ρ	۱۳۰ هزار
$\tilde{D}_{rt}$	در جدول ۳ با انحراف ٪۳۰

شرکت ۲۰ مشتری اصلی دارد که در جدول ۳ معرفی و تقاضای اسمی آن‌ها به صورت ماهانه برآورد شده است. لازم به توضیح است که تقاضای هر مشتری در هر ماه امکان دارد تا ٪۳۰± از مقدار اسمی انحراف داشته باشد که در تولید اعداد فازی ذوزنقه‌یی متناظر با آن‌ها در نظر گرفته می‌شود.

نتایج حاصل از حل مسئله برای داده‌های مطالعه‌ی موردی به کمک مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار ارائه شده در قبل در جداول ۴ و ۵ گزارش شده است.

چنان که پیش‌تر اشاره شد، با استفاده از ضریب کنترلی φ می‌توان میزان شدنی بودن مدل و ریسک‌گریزی آن را تنظیم کرد. مقدار تابع هدف متأثر از مقدار هزینه است و هزینه‌ی کل نیز به شدت متأثر از مقدار φ است. در واقع φ جریمه‌ی هر واحد نقض قیود را نشان می‌دهد. اگر این مقدار بالا باشد موجب می‌شود که مدل کاملاً ریسک‌گریز باشد و شدنی بودن آن بیشینه شود؛ اما این موضوع موجب می‌شود که هزینه‌ی زیادی بر سیستم تحمیل شود. لذا، با کاهش مقدار φ و پذیرش مقدار اندکی ریسک می‌توان مقادیر تابع هدف (به خصوص کل هزینه‌ی زنجیره‌ی تأمین) را به طور قابل قبولی بهبود داد.

مدل را به ازای مقادیر $0 \le \varphi \le ۲۰$ حل و در هر اجرا، مقدار هزینه‌ی کل و میزان نقض در قیود در جدول ۶ گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به ازای $\varphi \ge ۱۶$، مجموع نقض قیود (تقاضای تحقق نیافته) برابر صفر می‌شود و استواری مدل بیشترین مقدار ممکن است. به عبارت دیگر به ازای جمیع مقادیر $\varphi \ge ۱۶$، به علت آن که جریمه‌ی نقض قیود بالاست، پاسخ مسئله همواره شدنی خواهد بود. برای این مقادیر، هزینه‌ی کل به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

در شکل‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود که با کاهش φ تا مقدار ۱۲، هزینه به

جدول ۳. تقاضای اسمی (متوسط (ملات سبز) واحد کیلوگرم).

مشتری	کد	فروردین $T=1$	اردیبهشت $T=2$	خرداد $T=3$	تیر $T=4$	مرداد $T=5$	شهریور $T=6$	مهر $T=7$	آبان $T=8$	آذر $T=9$	دی $T=10$	بهمن $T=11$	اسفند $T=12$
شرکت صنعت فولاد آلیاژ تهران (سهامی خاص)	۱	۵۲۵	۹۹۰			۱۵۰				۶۴۵			
شرکت ذوب بریس	۲	۹۰۰		۲۷۰		۳۰۰	۳۰۰						
شخص حقیقی	۳	۱۸۰		۱۸۰	۱۵۰								
شرکت فولاد کویر دامغان	۴	۶۰		۹۰			۹۰			۹۰			
شرکت صنعت تجارت پردیس آذربایجان	۵	۲۲۵			۱۹۵	۳۰۰	۳۶۰	۳۴۵			۱۶۵		۱۹۵
شرکت تعاونی ریخته‌گری فولاد سپند مهریز	۶		۱۹۵										
شرکت تعاونی سریر صنعت پایتخت	۷		۹۰	۱۲۰	۱۲۰								۱۲۰
شرکت صنایع شمش‌ریزان البرز	۸		۹۰					۳۰۰					
شرکت مجتمع ذوب آهن بیستون	۹		۴۹۵	۲۲۵	۱۵۰	۳۰۰	۱۳۵						۸۴۰
شرکت تعاونی ذوب و ریخته‌گری فولاد سفید دشت	۱۰		۱۵۰	۱۵۰			۱۸۰			۳۰۰		۳۳۰	
شرکت فولاد شاهرود	۱۱			۳۰۰	۴۹۵								۱۹۵
شرکت فولاد تابان کویر	۱۲					۱۵۰							
شرکت سپهر فولاد لنجان	۱۳					۳۰۰							
شرکت تعاونی مجتمع فولاد شمش نگین مشهد	۱۴					۱۶۵							
شرکت صنایع ذوب آذرخش	۱۵					۱۲۰		۱۹۵			۷۵	۱۰۵	
شرکت غلتک سازان سپاهان	۱۶						۳۰۰	۴۹۵					
شرکت فولاد آلیاژی سمنان	۱۷						۱۵۰						
شرکت نورد و تولید قطعات فولادی	۱۸						۱۵۰	۱۵۰		۱۲۰			۶۳۰

ادامه‌ی جدول ۳.

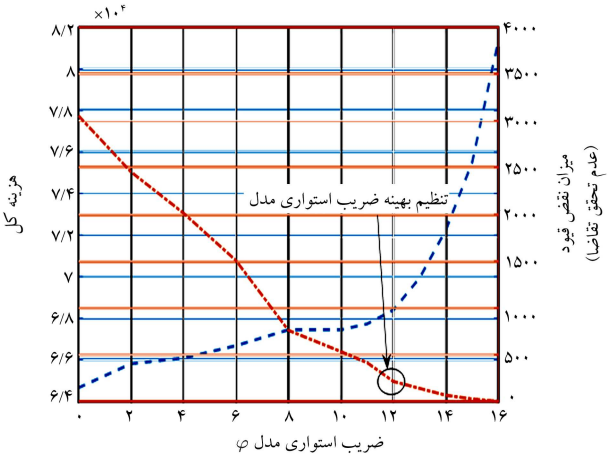
مشتری	کد	فروردین $T=1$	اردیبهشت $T=2$	خرداد $T=3$	تیر $T=4$	مرداد $T=5$	شهریور $T=6$	مهر $T=7$	آبان $T=8$	آذر $T=9$	دی $T=10$	بهمن $T=11$	اسفند $T=12$
شرکت کلاچ	۱۹								۱۰۵				۴۵
شرکت ذوب آهن آسیا	۲۰									۱۰۵			

جدول ۴. قیمت و مقدار تخفیف محصول در عمرهای مختلف قابل مصرف.

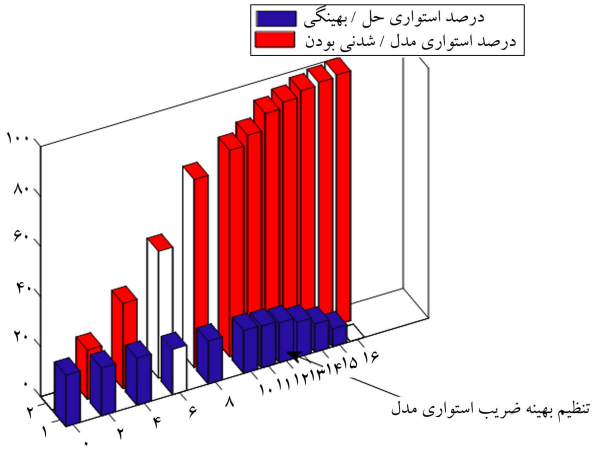
دوره عمر محصول	$g=1$ (محصول تازه)	$g=2$	$g=3$
قیمت فروش محصول	۶۵	۵۳٫۶۹	۳۶٫۵۳
نرخ تخفیف اعمال شده	۰	۱۷٫۴	۴۳٫۸

جدول ۵. مقدار تولید (کیلوگرم) در دوره‌های مختلف.

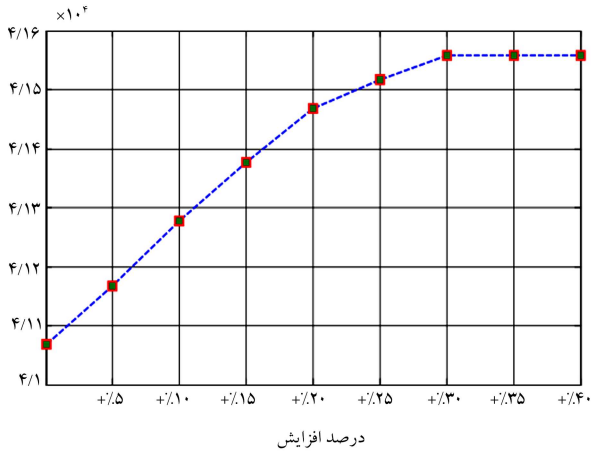
دوره	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مقدار تولید	۵۶۷۰	۶۰۰۰	۴۰۰۵	۰	۵۳۵۵	۴۹۹۵
دوره	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
مقدار تولید	۱۹۳۵	۰	۳۴۲۰	۱۱۷۰	۱۲۱۵	۰



شکل ۲. تحلیل حساسیت ضریب استواری مدل.



شکل ۳. مقایسه‌ی استواری مدل و استواری حل به ازای مقادیر φ .



شکل ۴. تغییرات هزینه‌ی تولید (PC) با افزایش ظرفیت تسهیلات.

طور قابل ملاحظه‌یی (تقریبا ۱۶٪) کاهش می‌یابد در حالی که استواری مدل کاهش زیادی نداشته است (تقریباً ۹۳٪). اما در مقادیر $\varphi < ۱۲$، گرچه هزینه‌ی کل کاهش می‌یابد اما نقض قیود افزایش زیادی دارد و استواری مدل به شدت کاهش می‌یابد. با این استدلال، $\varphi = ۱۲$ تنظیم مناسبی برای ضریب استواری مدل در رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار پیشنهادی برای حل مثال عددی مطالعه‌ی موردی گفته شده است. لازم به توضیح است که فرایند مذکور برای تنظیم ضریب استواری مدل در هر مطالعه‌ی عددی دیگر نیز قابل به کارگیری است.

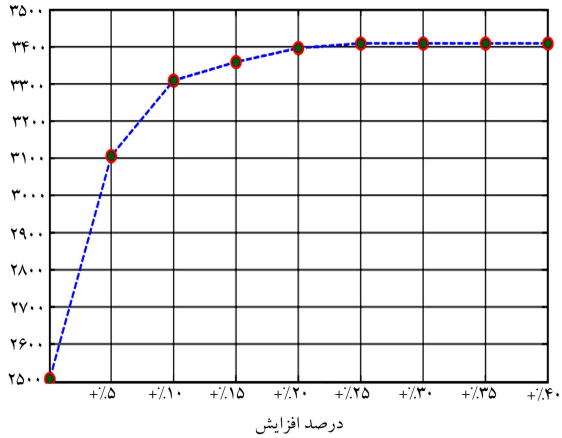
ظرفیت تسهیلات از جمله پارامترهایی است که بر تصمیمات دوره‌یی میزان تولید، موجودی و غیره تأثیرگذار است. به تبع آن، هزینه‌ها (هزینه‌ی تولید (PC)، هزینه‌ی نگهداری (HC)، هزینه‌ی کمبود (BC) و هزینه‌ی حمل‌ونقل (TC)) نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در ادامه به تحلیل حساسیت این هزینه‌ها به ازای تغییرات این پارامتر پرداخته می‌شود. مقدار این پارامتر به میزان ۴۰٪ با طول گام ۵٪ افزایش یافته و روند تغییرات هزینه‌ها در شکل‌های ۴ تا ۷ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۴، با افزایش ظرفیت تولید، میزان تولید بیشتری انجام می‌شود (البته با توجه به این که در سیستم کمبود وجود داشت) و این سبب می‌شود هزینه‌ی تولید افزایش یابد. همچنین توجه کنید از میزان افزایش ۳۰٪ به بعد تغییری در هزینه‌ی تولید رخ نمی‌دهد زیرا نیازی به تولید بیشتر نیست چرا که کمبود تقاضای سیستم جبران شده است. همچنین افزایش هزینه‌های نگهداری در نتیجه‌ی افزایش تولید و افزایش موجودی انبار دور از ذهن نیست. این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است.

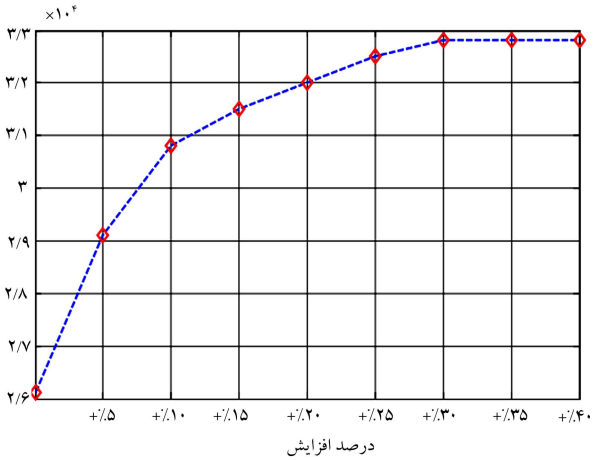
روند تغییرات هزینه‌ی حمل‌ونقل در شکل ۶ نشان داده شده است. افزایش تولید کارخانه‌ها سبب می‌شود که جریان محصول از کارخانه به انبار و از انبار به مشتریان افزایش یابد. این افزایش جریان سبب می‌شود هزینه‌ی حمل و نقل افزایش یابد. توجه کنید که تقریباً از افزایش ۳۰٪ به بعد هزینه‌ی حمل و نقل افزایش پیدا

جدول ۶. تحلیل حساسیت ضریب استواری مدل (φ).

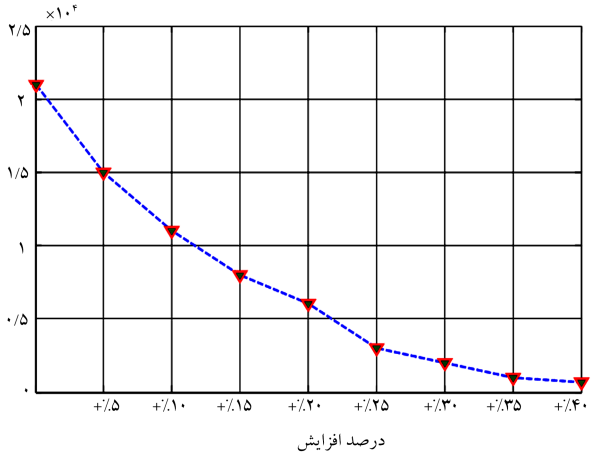
ضریب استواری مدل φ	کل هزینه زنجیره‌ی تأمین		عدم تحقق و استواری مدل	
	مقدار هزینه	درصد کاهش هزینه نسبت به سخت‌ترین حالت ($\varphi = ۱۶$)	کل تقاضای تحقق نیافته	درصد استواری مدل نسبت به منعطف‌ترین حالت ($\varphi = ۰$)
۰	۶۴۶۵۶.۹۶	۲۰.۵۴	۳۰۵۶.۰۰	۰
۲	۶۵۸۱۲.۴۲	۱۹.۱۲	۲۴۵۴.۸۸	۱۹.۶۷
۴	۶۶۰۸۹.۰۸	۱۸.۷۸	۲۰۱۴.۸۲	۳۴.۰۷
۶	۶۶۶۸۳.۰۸	۱۸.۰۵	۱۵۰۸.۱۴	۵۰.۶۵
۸	۶۷۴۴۷.۹۷	۱۷.۱۱	۷۶۰.۳۳	۷۵.۱۲
۱۰	۶۷۴۴۷.۹۷	۱۷.۱۱	۵۳۲.۹۷	۸۲.۵۶
۱۱	۶۷۷۳۲.۷۶	۱۶.۷۶	۴۱۴.۷۰	۸۶.۴۳
۱۲	۶۸۴۰۰.۰۰	۱۵.۹۴	۲۱۳.۶۱	۹۳.۰۱
۱۳	۶۹۹۴۶.۰۴	۱۴.۰۴	۱۳۹.۹۶	۹۵.۴۲
۱۴	۷۲۲۴۸.۸۲	۱۱.۲۱	۶۶.۳۲	۹۷.۸۳
۱۵	۷۵۵۰۳.۶۴	۷.۲۱	۲۶.۸۹	۹۹.۱۲
≥ ۱۶	۸۱۳۷۰.۴۵	۰	۰.۰۰	۱۰۰



شکل ۵. تغییرات هزینه‌ی نگهداری (HC) با افزایش ظرفیت تسهیلات.



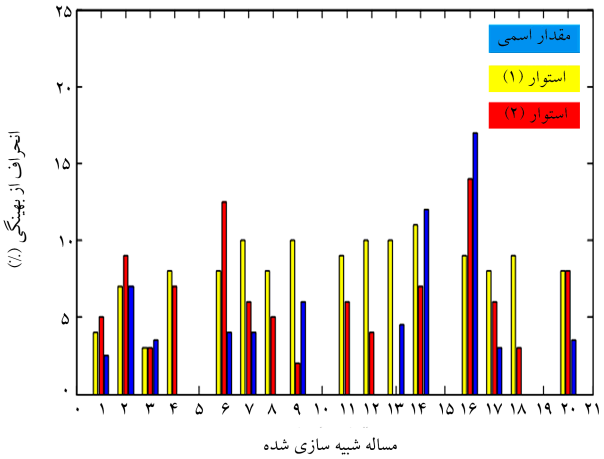
شکل ۶. تغییرات هزینه‌ی حمل‌ونقل (TC) با افزایش ظرفیت.



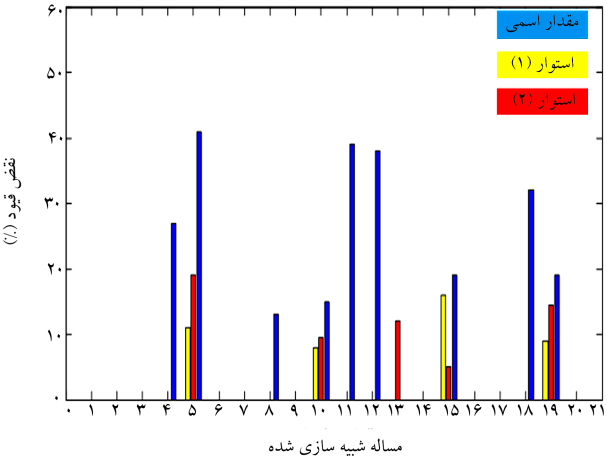
شکل ۷. تغییرات هزینه‌ی کمبود (BC) با افزایش ظرفیت تسهیلات.

نکرده است چرا که از این افزایش ظرفیت به بعد، افزایش تولید صورت نمی‌گیرد و به تبع آن حمل و نقل بیشتری هم صورت نمی‌گیرد. مطابق شکل ۷، با افزایش ظرفیت تولید، تقاضای بیشتری از مشتریان برآورده شده است و با افزایش تأمین تقاضای مشتریان، میزان کمبود و به تبع آن هزینه‌ی کمبود کاهش یافته است. لازم به توضیح است که چون میزان کاهش هزینه‌ی کمبود بیشتر از افزایش هزینه‌های تولید، موجودی و حمل و نقل است، نهایتاً هزینه‌ی کل بهبود یافته است. بدیهی است که افزایش ظرفیت تسهیلات شبکه منجر به افزایش سود شده است.

در ادامه برای سنجش عملکرد رویکردهای ارائه شده در شرایط غیرقطعی از دو شاخص «انحراف از بهینگی» و «نقض قیود» استفاده می‌کنیم. برای این منظور، پارامترهای غیرقطعی تقاضای محصول، ۲۰ مرتبه شبیه‌سازی شده و عملکرد رویکرد امکانی استوار پیشنهادی ارزیابی شده است. فرض می‌شود که متوسط



شکل ۸. مقایسه‌ی انحراف از بهینگی در رویکردهای استوار و اسمی.



شکل ۹. مقایسه‌ی نقض قیود در رویکردهای استوار و اسمی.

داده‌های فازی در رویکرد مقدار اسمی جایگزین آن‌ها می‌شود. همچنین منظور از رویکرد امکانی استوار ۱، همان رویکرد امکانی کلاسیک است که مقدار α از قبل تعیین می‌شود (در این‌جا $\alpha = ٪۹۵$ در نظر گرفته شده است). همچنین در رویکرد امکانی استوار ۲ مقدار α متغیر در نظر گرفته شده و از حل مدل به دست می‌آید ($\alpha = ٪۶۷$) بر اساس نتایج حاصله، نوسان بهینگی در رویکردهای استوار پیشنهادی بسیار کم‌تر از رویکرد مقدار اسمی است و همچنین رویکردهای امکانی استوار پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌یی نسبت به رویکرد مقدار اسمی نقض قیود را کم‌تر می‌کند (شکل‌های ۸ و ۹) که این خود سبب کاهش ریسک در تصمیم‌گیری می‌شود.

نتایج عددی نشان می‌دهد که با به کارگیری رویکرد پیشنهادی این پژوهش می‌توان پاسخ بهینه متغیرهای تصمیم را به طور یکپارچه به دست آورد و هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین را نزدیک به ۱۶٪ کاهش داد. همچنین در مقایسه‌ی رویکرد امکانی استوار پیشنهادی با رویکرد اسمی در کنترل عدم قطعیت، ملاحظه می‌شود که بیشترین انحراف از بهینگی و میانگین انحراف از بهینگی به ترتیب تقریباً ۴۶٪ و ۱۱٪ کاهش می‌یابد.

برای بررسی توانایی مدل در حل مسائل در ابعاد واقعی، تعدادی نمونه مسئله‌ی تصادفی تولید و به کمک نرم‌افزار CPLEX و با محدودیت زمانی یک ساعت حل شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل پیشنهادی قادر است نمونه مسائلی با حداکثر ۴ کارخانه تولیدی و ۵۰ مشتری را برای افق برنامه‌ریزی یک‌ساله حل کند.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مسئله‌ی برنامه‌ریزی یکپارچه تصمیمات تولید، موجودی، توزیع و قیمت‌گذاری در یک زنجیره‌ی تأمین دوسطحی از محصولات فاسدشدنی پرداخته شده است. با توجه به طول عمر ثابت و محدود محصول و هزینه‌هایی که ممکن است به علت فاسد شدن محصول ایجاد شود و همچنین تنوع در زمان درخواست و مقدار تقاضای مشتریان، سیستم برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی در این مسئله دارای اهمیت مضاعف است. چالش دیگر عدم قطعیت در تقاضای مشتریان محصول است. از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار برای مدل‌سازی مسئله استفاده شده و به منظور نشان دادن کاربردی بودن مدل، به حل یک مطالعه‌ی موردی (شرکت پاترون، تولیدکننده نوعی محصول فاسدشدنی و مورد استفاده در کارخانجات فولادسازی) پرداخته شده است. در مقایسه‌ی رویکرد پیشنهادی این تحقیق نسبت به رویکرد مقدار اسمی، بر اساس دو معیار میانگین انحراف از بهینگی و بیشینه انحراف از بهینگی (به عنوان دو معیار مهم ارزیابی استواری) ملاحظه می‌شود که رویکرد پیشنهادی در هر دو معیار مذکور به طور قابل ملاحظه‌یی نسبت رویکرد اسمی برتری دارد و پاسخ قابل اتکاتری ارائه می‌کند.

نتایج حاصل از مطالعه‌ی موردی و تحلیل حساسیت پارامترها حاکی از آن است که هرچند با افزایش ظرفیت تسهیلات می‌توان تقاضاهای بیشتری را پاسخ داد اما این افزایش ظرفیت تا جایی می‌تواند منجر به افزایش سود شرکت شود که میزان کاهش هزینه‌ی کمبود بیشتر از افزایش هزینه‌های تولید، موجودی و حمل و نقل باشد.

در نظرگرفتن عدم قطعیت و اختلال در ظرفیت تولید کارخانه‌های تولیدی و نیز اختلال در خطوط انتقال و حمل‌ونقل محصول می‌تواند یکی از زمینه‌های تحقیقاتی آینده باشد. همچنین بررسی سایر روش‌های مواجهه با عدم قطعیت و استوار سازی مدل نیز یکی دیگر از گزینه‌های چالش برانگیز برای توسعه پژوهش ارائه شده است.

پانوشت‌ها

1. Deterioration
2. Perishable Products
3. Decaying Products
4. Analytic Hierarchy Process (AHP)
5. Linear Programming (LP)
6. Two Tier/Echelon Supply Chain

7. Deteriorable/Perishable
8. Fresh-First (FF)
9. Old-First (OF)
10. Optimized Priority (OP)
11. Backorder
12. Trapezoidal Fuzzy Number (TFN)
13. Nominal
14. Perturbation
15. Robust Possibilistic Programming (RPP)
16. Crisp
17. Possibility Measure

منابع (References)

1. Benkherouf, L., Boumenir, A. and Aggoun, L. "A diffusion inventory model for deteriorating items", *Applied Mathematics and Computation*, **138**(1), pp. 21-39 (2003).
2. Teng, J.-T., Chang, H.-J., Dye, C.-Y. and et al. "An optimal replenishment policy for deteriorating items with time-varying demand and partial backlogging", *Operations Research Letters*, **30**(6), pp. 387-393, (2002).
3. Chen, S.-C., Min, J., Teng, J.-T. and et al. "Inventory and shelf-space optimization for fresh produce with expiration date under freshness-and-stock-dependent demand rate", *Journal of The Operational Research Society*, **67**(6), pp. 884-896 (2016).
4. Valliathal, M. and Uthayakumar, R. "An EOQ model for rebate value and selling-price-dependent demand rate with shortages", *International Journal of Mathematics in Operational Research*, **3**(1), pp. 99-123, (2010).
5. Maihami, R. and Kamalabadi, I.N. "Joint pricing and inventory control for non-instantaneous deteriorating items with partial backlogging and time and price dependent demand", *International Journal of Production Economics*, **136**(1), 116-122 (2012).
6. Zhou, S.X. and Yu, Y. "Optimal product acquisition, pricing, and inventory management for systems with remanufacturing", *Operations Research*, **59**(2), pp. 514-521 (2011).
7. Goyal, S.K. and Giri, B.C. "Recent trends in modeling of deteriorating inventory", *European Journal of Operational Research*, **134**(1), pp. 1-16, (2001).
8. Fahimnia, B., Farahani, R.Z., Marian, R. and et al. "A review and critique on integrated production-distribution planning models and techniques", *Journal of Manufacturing Systems*, **32**(1), pp. 1-19 (2013).
9. Diaz- Madroñero, M., Peidro, D. and Mula, J. "A review of tactical optimization models for integrated production and transport routing planning decisions", *Computers & Industrial Engineering*, **88**, pp. 518-535 (2015).
10. Chan, F.T., Chung, S. and Wadhwa, S. "A hybrid genetic algorithm for production and distribution", *Omega*, **33**(4), pp. 345-355 (2005).
11. Nishi, T., Konishi, M. and Ago, M. "A distributed decision making system for integrated optimization of production scheduling and distribution for aluminum production line", *Computers & Chemical Engineering*, **31**(10), pp. 1205-1221 (2007).
12. Safaei, A., Moattar Husseini, S., Z.-Farahani, R. and et al. "Integrated multi-site production-distribution planning in supply chain by hybrid modelling", *International Journal of Production Research*, **48**(14), pp. 4043-4069 (2010).
13. Gen, M. and Syarif, A. "Hybrid genetic algorithm for multi-time period production/distribution planning", *Computers & Industrial Engineering*, **48**(4), pp. 799-809 (2005).
14. Kanyalkar, A. and Adil, G. "An integrated aggregate and detailed planning in a multi-site production environment using linear programming", *International Journal of Production Research*, **43**(20), pp. 4431-4454 (2005).
15. Torabi, S. and Moghaddam, M. "Multi-site integrated production-distribution planning with trans-shipment: A fuzzy goal programming approach", *International Journal of Production Research*, **50**(6), pp. 1726-1748 (2012).
16. Wei, W., Guimarães, L. and Amorim, P. "Tactical production and distribution planning with dependency issues on the production process", *Omega*, **67**, pp. 99-114 (2017).
17. Whitin, T.M. "Theory of inventory management", Princeton University Pres (1957).
18. Lütke Entrup, M., Günther, H.-O., Van Beek, P. and et al. "Mixed-integer linear programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yoghurt production", *International Journal of Production Research*, **43**(23), pp. 5071-5100, (2005).
19. Minner, S. and Transchel, S. "Periodic review inventory-control for perishable products under service-level constraints", *OR spectrum*, **32**(4), pp. 979-996 (2010).
20. Farahani, P., Grunow, M. and Günther, H.-O. "Integrated production and distribution planning for perishable food products", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, **24**(1), pp. 28-51 (2012).
21. Coelho, L.C. and Laporte, G. "Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products", *Computers & Operations Research*, **47**, pp. 42-52 (2014).
22. Rashidi, S., Saghaei, A., Sadjadi, S. and et al. "Optimizing supply chain network design with location-inventory decisions for perishable items: A pareto-based MOEA approach", *Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering*, **23**(6), pp. 3025-3045 (2016).
23. Ghezavati, V., Hooshyar, S. and Tavakkoli-Moghaddam, R. "A Benders' decomposition algorithm for optimizing distribution of perishable products considering postharvest biological behavior in agri-food supply chain: A case study of tomato", *Central European Journal of Operations Research*, **25**(1), pp. 29-54 (2017).
24. Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S.H.R. and Naderi, B. "Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation algorithm", *Computers & Chemical Engineering*, **109**, pp. 9-22 (2018).
25. Mirmohammadi, S. "Determining a dynamic pricing strategy and the duration of the optimal replenishment

period for non-instantaneous perishable goods with variable rate of deterioration and inventory-dependent demand", Msc Thesis, Isfahan University of Technology, (In Persian) (1395/2017).

26. Pouralikhani, H., Kimiagari, A. and Keivanlou, M. "Inventory control, pricing and production planning for a manufacturer with time-dependent perishable goods", *Journal of Operational Research and Its Applications*, **10**(3), pp. 11-23 (2013).
27. Chang, C.-T., Ouyang, L.-Y., Teng, J.-T. and et al. "Manufacturer's pricing and lot-sizing decisions for perishable goods under various payment terms by a discounted cash flow analysis", *International Journal of Production Economics*, **218**, pp. 83-9 (2019).
28. S Tao, F., Fan, T., Wang, Y.-Y. and et al. "Joint pricing and inventory strategies in a supply chain subject to inventory inaccuracy", *International Journal of Production Research*, **57**(9), pp. 2695-2714 (2019).
29. A Jbira, A., Jaoua, A., Bouchery, Y. and et al. "Simulation based optimisation Model for a joint inventory pricing problem for perishables", *Paper presented at the 2018 4th International Conference on Logistics Operations Management* (2018).
30. Azadi, Z., Eksioglu, S.D., Eksioglu, B. and et al. "Stochastic optimization models for joint pricing and inventory replenishment of perishable products", *Computers & Industrial Engineering*, **127**, pp. 625-642 (2019).
31. Amirtaheri, O., Zandieh, M., Dorri, B. and et al. "A bi-level programming approach for production-distribution supply chain problem", *Computers & Industrial Engineering*, **110**, pp. 527-537 (2017).
32. Mohammadi, H., Ghazanfari, M., Pishvaee, M. S. and et al. "Fresh-product supply chain coordination and waste reduction using a revenue-and-preservation-technology-investment-sharing contract: A real-life case study", *Journal of Cleaner Production*, **213**, pp. 262-282 (2019).
33. Dai, C., Cai, Y., Ren, W. and et al. "Identification of optimal placements of best management practices through an interval-fuzzy possibilistic programming model", *Agricultural Water Management*, **165**, pp. 108-121 (2016).
34. Pishvaee, M., Rabbani, M. and Torabi, A. "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, **35**(2), pp. 637-649 (2012).
35. Boyd, S. and Vandenberghe, L. "Convex optimization", Cambridge University Press (2004).
36. Castro, P.M. "Tightening piecewise McCormick relaxations for bilinear problems", *Computers & Chemical Engineering*, **72**, pp. 300-311 (2015).