پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۱۰، شماره ۵، زمستان ۱٤۰٤، صص ۹۲-۱۲٦
نوع مقاله: پژوهشی

سوگیری‌های بهینه‌سازی تصمیمات سه‌حالته (نگه‌داشت، جایگزینی، بازگشت) برای کالاهای فصلی با کیفیت نامطمئن: چارچوب شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

الهام محمودی نژاد [۱]، میثم شهبازی [*۲]، سید حسین رضوی حاج آقا [۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، قم، ایران
۲. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، قم، ایران
۳. استادیار، گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و علوم مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۹/۲۹

چکیده

مدیریت موجودی کالاهای فصلی باکیفیت نامطمئن با چالش تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت هم‌زمان تقاضا و کیفیت روبه‌رو است، درحالی‌که اغلب رویکردهای موجود پس از بازرسی به‌قاعده‌ی دودویی و غیرمنعطف «پذیرش/بازگشت کامل» متکی‌اند. این پژوهش یک مدل روزنامه‌فروش سه‌حالته‌ی آستانه‌ای (نگه‌داشتن، جایگزینی سقف دار، بازگشت) برای کالای فصلی فسادپذیر ارائه می‌کند که در آن خطای بازرسی، مرجوعی مشتری، محدودیت لجستیکی جایگزینی و تقاضای دوکاناله‌ی حساس به تخفیف به‌صورت یکپارچه لحاظ شده و قید مشارکت تأمین‌کننده نیز در طراحی سیاست بهینه اعمال می‌شود. به دلیل غیرخطی بودن و حضور عملگرهای min/max، تابع سود انتظاری به‌صورت بسته قابل‌حل نیست؛ بنابراین از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی–بهینه‌سازی استفاده می‌شود که در آن سود انتظاری با شبیه‌سازی مونت‌کارلو برآورد و سیاست بهینه با کمک بهینه‌سازی بیزی و مقایسه با الگوریتم‌های فرا ابتکاری (GA ,PSO ,SA) به دست می‌آید. نتایج مثال عددی نشان می‌دهد نسبت به سیاست پذیرش/بازگشت، به‌کارگیری مکانیسم جایگزینی در چارچوب سه‌حالته سود مورد انتظار خرده‌فروش را حدود ۱٤٪۳ و سود تأمین‌کننده را حدود ٦٪۲ افزایش می‌دهد و هم‌زمان کمبود و ضایعات را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد. تحلیل سناریوهای بحرانی (شوک‌های هزینه‌ای و اختلالات لجستیکی) نشان می‌دهد عملکرد مدل نسبت به تغییر پارامترهای مدل پایدار است و جایگزینی مدیریت‌شده به‌عنوان ابزار مؤثر پوشش ریسک عمل می‌کند. همچنین تحلیل حساسیت نشان می‌دهد علاوه بر قیمت خریدوفروش، متغیرهای عملیاتی مانند کارایی جایگزینی و دقت بازرسی نقش مستقیمی در کنترل کمبود و ضایعات دارند و گذار از قراردادهای سنتی بازگشت کامل به قراردادهای حاوی مکانیسم جایگزینی سقف دار می‌تواند سودآوری و عملکرد عملیاتی زنجیره تأمین کالاهای فصلی فسادپذیر را بهبود دهد.

کلیدواژه‌ها: کالای فصلی با چرخه عمر کوتاه، کالا معیوب، کالا فسادپذیر، مونت‌کارلو، بهینه‌سازی بیزی

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: meisamshahbazi@ut.ac.ir

۱- مقدمه و بیان مسئله

مدیریت موجودی کالاهای با چرخه عمر کوتاه (مانند کالاهای فصلی و مد روز) یکی از چالش‌های اصلی زنجیره تأمین مدرن است. این کالاها معمولاً با افق فروش محدود و تقاضای ناپایدار همراه هستند. در ادبیات کنترل موجودی تصادفی، چنین شرایطی اغلب با مدل کلاسیک روزنامه‌فروش تحلیل می‌شود که در آن تصمیم‌گیرنده مقدار سفارش را به گونه‌ای تعیین می‌کند تا بین ریسک کمبود و ریسک مازاد موجودی تعادل برقرار کند [۱]. این مسئله نمونه‌ای از تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت است و هنگامی که با ریسک عملیاتی ناشی از کیفیت نامطمئن کالا همراه شود، پیچیدگی تصمیم‌گیری به مراتب افزایش می‌یابد [۲]. در عمل، بسیاری از شرکت‌ها پس از بازرسی اولیه محموله، از یک قاعده‌ی ساده‌ی دودویی (پذیرش کامل یا بازگشت کامل) استفاده می‌کنند. این رویکرد هرچند از نظر اجرایی ساده است، اما در شرایط کیفیت نامطمئن و تقاضای فصلی ناپایدار، می‌تواند ناکارآمد و پرهزینه باشد. بررسی ادبیات موجود نشان می‌دهد که این الگوی تصمیم‌گیری دودویی در بسیاری از مدل‌ها بازتولید شده است [۳].

از سوی دیگر، در شاخه‌ای دیگر از ادبیات، بسط‌هایی از مدل روزنامه‌فروش با امکان سفارش اضطراری یا تأمین تکمیلی میان فصل برای محصولات با چرخه‌ی عمر کوتاه پیشنهادشده است مانند کار ژو[۱] و همکاران (۲۰۲۳)[۱]، تمرکز اصلی بر مدیریت کمبود و ضایعات ناشی از عدم قطعیت تقاضا و تفاوت تازگی موجودی در یک افق دو دوره‌ای است و کیفیت محموله‌ی اولیه، نرخ اقلام معیوب و خطاهای بازرسی به‌صورت صریح مدل نمی‌شوند. همچنین، ساختار تقاضا معمولاً تک‌کاناله فرض می‌شود و قیود اجرایی مهمی مانند خطای بازرسی، محدودیت زمانی و ظرفیتی جایگزینی درون فصل و مرجوعی مشتری نادیده گرفته می‌شوند؛ درحالی‌که آثاری مانند خان و حسین[۲] (۲۰۱۹)[٤] هسیو وهسیو[۳] (۲۰۱۳)[٥]، نشان داده‌اند دخالت این عوامل می‌تواند سیاست‌های بهینه‌ی سفارش و هزینه‌ی کل را به‌طور معناداری تغییر دهد. نادیده گرفتن شکاف‌های موجود در سیاست‌های دودویی (فقط پذیرش یا بازگشت) پیامدهای پرهزینه‌ای برای زنجیره تأمین کالاهای فصلی دارد: خرده‌فروش بین ریسک کمبود و اضافه‌موجودی گرفتار می‌شود، تأمین‌کننده متحمل زیان ناشی از تولید، لجستیک و بازخرید

[۱] Zhou [۲] Khan & Hussain [۳] Hsu & Hsu

می‌گردد و مشتری تجربه خرید نامطلوبی پیدا می‌کند. همچنین نادیده گرفتن دوگانگی مشتریان (حساس به تازگی در برابر حساس به قیمت) باعث از دست رفتن مشتریان کیفیت‌محور و عدم بهره‌مندی از تخفیف هدفمند روی موجودی نزدیک به انقضا می‌شود. عدم توجه یکپارچه به قیود عملیاتی مانند خطاهای بازرسی، محدودیت زمانی و مرجوعی مشتری نیز به سیاست‌هایی می‌انجامد که در عمل ناپایدار و اتلاف‌دهنده هستند [٤]. در پاسخ، این پژوهش یک مدل روزنامه‌فروش سه‌حالته‌ی آستانه‌ای شامل «نگه‌داشتن، جایگزینی سقف‌دار و بازگشت» ارائه می‌کند. در این مدل، مقدار سفارش اولیه، دو آستانه کیفی و نرخ تخفیف انتهای فصل به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که با در نظر گرفتن تقاضای دوکاناله حساس به تخفیف و قیود عملیاتی (بازرسی خطادار، مرجوعی مشتری و محدودیت ظرفیت جایگزینی)، سود مورد انتظار خرده‌فروش بیشینه شده و سازگاری با شرایط زنجیره تأمین حفظ گردد.

پژوهش حاضر به دنبال پاسخ به سه پرسش اصلی است: ۱- طراحی مدلی از نوع روزنامه‌فروش باقاعده‌ی سه‌حالته‌ی آستانه‌ای (نگه‌داشتن، جایگزینی سقف‌دار و بازگشت) که عدم قطعیت هم‌زمان تقاضا و کیفیت، بازرسی خطادار، مرجوعی مشتری و تقاضای دوکاناله‌ی حساس به تخفیف را یکپارچه کند؛ ۲- مقایسه عملکرد این سیاست سه‌حالته با سیاست‌های دودویی (فقط پذیرش یا بازگشت) از نظر سود مورد انتظار، کمبود و ضایعات؛ ۳- بررسی پایداری نتایج و سیاست‌های بهینه نسبت به تغییر پارامترهای کلیدی هزینه‌ای و عملیاتی. از منظر کاربردی، این مسئله با سودآوری و پایداری زنجیره تأمین کالاهای فصلی گره خورده است. سیاست سه‌حالته به خرده‌فروش امکان مدیریت هوشمندانه ریسک می‌دهد تا هم از کمبود فروش جلوگیری کند و هم ضایعات را کاهش دهد. برای تأمین‌کننده نیز جایگزینی سقف‌دار به جای بازگشت کامل، هزینه‌های بازخرید را کاهش داده و به بهره‌وری تولید و لجستیک کمک می‌کند. در سطح کل زنجیره، این رویکرد بهبود همزمان سود، سطح خدمت و کاهش ضایعات را رقم زده و وضعیت برد-برد پایداری ایجاد می‌کند. در ادامه، پیشینه پژوهش مرور، چارچوب سه‌حالته فرمول‌بندی، نتایج عددی و تحلیل حساسیت ارائه و در پایان جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی مطرح می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

پژوهش حاضر در تقاطع سه خط اصلی ادبیات مدیریت موجودی قرار دارد: نخست، جریان کلاسیک و توسعه‌یافته «موجودی با کیفیت نامطمئن و اقلام فاسدشدنی»؛ دوم، مدل‌های روزنامه‌فروش، تقاضای دوکاناله و ساختارهای قیمت‌گذاری؛ و سوم، قراردادهای هماهنگ‌کننده در زنجیره تأمین همراه با شواهد تجربی مرتبط با محصولات فسادپذیر. بر اساس این سه محور، شکاف‌های اصلی ادبیات شناسایی و جایگاه دقیق پژوهش حاضر تبیین می‌شود.

مطالعات مربوط به موجودی باکیفیت نامطمئن در مدیریت زنجیره‌ی تأمین، باکار پیشگامانه‌ی سالامه و جابر[۱] آغاز شد و پس‌ازآن، توسط پژوهشگران متعددی توسعه یافت. در مقاله خان و همکاران (۲۰۱۱) بسط جامعی از مقالات آمده است [٦]. پس‌ازآن، پژوهش‌هایی مانند جگی و میتال[۲] (۲۰۱۱) و موسوی حیدر[۳] و همکاران (۲۰۱٤) با واردکردن هم‌زمان کیفیت ناقص و فساد حین نگهداری، نشان می‌دهند که برهم‌کنش این دو منبع ریسک، اندازه سفارش و طول چرخه بهینه و درنتیجه سود و هزینه مورد انتظار را به‌طور معناداری تغییر می‌دهد [۷]، [۲]. در ادامه، مدل‌های پیشرفته‌تری جهت مدیریت اقلام فسادپذیر باکیفیت ناقص توسعه‌یافته‌اند. در همین راستا، سکار[٤] و همکاران (۲۰۲۳) یک مدل مقدار انباشته تولید EPQ پایدار را ارائه کردند که نوآوری محوری آن، به‌کارگیری سیاست تولید سه مرحله‌ای با نرخ‌های متغیر در هر چرخه است. این استراتژی باهدف کنترل دقیق سطح انباشت موجودی و درنتیجه کاهش هزینه‌های ناشی از فساد طراحی‌شده است. در این پژوهش، تقاضا به‌صورت تابعی از قیمت فروش و هزینه‌های تبلیغات مدل‌سازی شده و کمبود به‌صورت پس‌افت کامل مجاز شمرده‌شده است. همچنین، اقلام معیوب تولیدی در پایان فاز تولید، تحت یک مرحله عملیاتی دوباره‌کاری[٥] اصلاح‌شده و به موجودی قابل‌فروش افزوده می‌شوند. هدف نهایی این مدل، کمینه‌سازی هزینه کل سیستم از طریق تعیین هم‌زمان اندازه انباشته بهینه، زمان چرخه، بودجه تبلیغاتی و قیمت فروش بازار است [۸]. لیائو[٦] و همکاران (۲۰۲۰) با ترکیب سه متغیر کلیدی شامل «کیفیت ناقص»، «فساد غیر آنی» و «اعتبار تجاری»، مدلی ریاضی برای تعیین سیاست بهینه سفارش

---

۱ Salameh & Jaber
۲ Jaggi & Mittal
۳ Moussawi-Haidar
٤ Sekar
٥ Rework
٦ Liao

دهی ارائه کردند. ویژگی متمایز این پژوهش، لحاظ کردن یک بازه زمانی اولیه (زمان پایداری) است که در آن کالا دچار فساد نمی‌شود و فرایند تخریب محصول تنها پس از گذشت این زمان مشخص آغاز می‌گردد. آن‌ها از طریق تحلیل ریاضی چندحالته نشان دادند که علی‌رغم پیچیدگی‌های ناشی از شروع تأخیری فساد و محاسبات بهره (به دلیل تأخیر در پرداخت)، تابع هزینه کل همچنان رفتار محدب خود را حفظ کرده و دستیابی به یک‌زمان چرخه بهینه یکتا امکان‌پذیر است [۹].بی هاوانی[۱]و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل EOQ برای اقلام فاسدشدنی باکیفیت ناقص ارائه می‌کنند که در آن تقاضا تابعی از قابلیت اطمینان و الگوی توانی زمان است و نرخ فساد بازمان افزایش‌یافته و به بیشینه عمر مفید وابسته است؛ در مبادله، قیمت خرید به کیفیت تحویلی حساس است (وجود اقلام معیوب باعث کاهش هزینه خرید مؤثر می‌گردد) همچنین پذیرش محموله با نرخ معیوب بالاتر از ٪۱۰ مجاز نیست. سیاست تأخیر مجاز پرداخت در دو حالت مدل شده است؛ و عدم قطعیت پارامترهای هزینه‌ها با اعداد نوتروسوفیک مثلثی مدل و با PSO بهینه‌سازی و از طریق تحلیل حساسیت بررسی می‌گردد [۱۰]. تیواری[۲] و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل کنترل موجودی دو انباره (انبار ملکی با ظرفیت محدود و انبار اجاره‌ای با ظرفیت نامحدود) برای اقلام فاسدشدنی و دارای کیفیت ناقص ارائه می‌کنند که در آن نرخ‌های فساد و هزینه نگهداری در دو انبار متفاوت است و سیاست اعتبار تجاری دوسطحی (اعتبار تأمین‌کننده به خرده‌فروش و خرده‌فروش به مشتری) همراه با بهره‌ی پرداختی لحاظ می‌شود؛ اقلام معیوب پس از بازرسی کامل جدا و باقیمت تنزیلی به‌صورت یکجا فروخته می‌شوند و نشان داده می‌شود ترکیب این مؤلفه‌ها می‌تواند سود خرده‌فروش را نسبت به حالات ساده‌تر بهبود دهد [۱۱]، بااین‌وجود، در بخش عمده‌ای از این مطالعات، تقاضا در قالب قطعی مدل شده و عدم قطعیت تقاضا به‌صورت تصادفی صریح وارد مدل نمی‌شود. در امتداد ادبیات مدیریت اقلام باکیفیت ناقص، بخشی از پژوهش‌ها سازوکار «بازگشت یا ورود مجدد محصول اصلاح‌شده به سیستم» را برجسته می‌کنند. کاردانس بارون[۳] و همکاران (۲۰۲۱) در چارچوبEOQ، اقلام باکیفیت ناقص را پس از بازرسی به‌صورت یک محموله به کارگاه بیرونی برای دوباره‌کاری ارسال می‌کنند و پس از بازگشت، محموله را مجدداً بازرسی کرده و اقلام همچنان معیوب را به‌صورت یکجا باقیمت تنزیلی می‌فروشند؛ سپس دو حالت زمانی

[۱] Bhavani [۲] Tiwari [۳] Cárdenas-Barrón

ورود محموله دوباره‌کاری شده (ورود در حضور موجودی و ورود در نقطه اتمام موجودی) را تحلیل می‌کنند. همچنین تقاضا غیرخطی و تابع قیمت بوده و هدف، بیشینه‌سازی سود مورد انتظار در واحد زمان از طریق تصمیم‌های مقدار سفارش و قیمت است [۱۲]. به‌طور مشابه، لوک[۱] و همکاران (۲۰۲۲) مدل EOQ برای اقلام باکیفیت ناقص تحت تقاضای زمان متغیر مطرح می‌کنند که در آن اقلام معیوب یا به کارگاه تعمیرات ارسال می‌شوند یا با سفارش اضطراری از تأمین‌کننده‌ی محلی جایگزین می‌گردند و این دو سیاست ازنظر سود در واحد زمان مقایسه می‌شود؛ بدون آن‌که فساد زمانی موجودی به‌طور صریح مدل شود [۱۳].

در گام بعد، بخشی از ادبیات کوشیده است علاوه بر کیفیت نامطمئن، تقاضا را نیز به‌صورت غیرقطعی (فازی یا تصادفی) مدل کند و در برخی مطالعات، ابعاد پایداری را نیز وارد مسئله نماید. جعفری‌اسکندری و همکاران (۱۳۹٦) یک مدل تولید-موجودی چند محصولی با تقاضای فازی ارائه می‌کنند که در آن بخشی از تولید معیوب بوده و با یک مرحله دوباره‌کاری قابل‌فروش می‌شود؛ کمبود ترکیبی از سفارش عقب‌افتاده و فروش ازدست‌رفته است و مدل غیرخطی تحت قیود (نرخ تولید، فضای انبار و سرمایه) با رویکردهای فرا ابتکاری حل می‌شود [۱٤]. در ادامه، بارمن و مهاتا[۲](۲۰۲۲) یک مدل یکپارچه‌ی دوسطحی فروشنده-خریدار با اقلام دارای کیفیت ناقص و تقاضای تصادفی (نرمال) توسعه می‌دهند که در آن امکان کاهش هزینه سفارش دهی از طریق زمان تحویل قابل‌کنترل (وابسته به مقدار سفارش) لحاظ شده و سیاست‌های بهینه باهدف کمینه‌سازی هزینه و بهبود عملکرد کل سیستم استخراج می‌گردد [۱۵]. درنهایت، الامری[۳]و همکاران (۲۰۲٤) یک مدل موجودی پایدار برای اقلام باکیفیت ناقص ارائه می‌کنند که در آن، اثر یادگیری و تلاش تبلیغاتی تحت محیط‌های مختلف تقاضای فازی مدل شده و سیاست بهینه‌ی سفارش در چارچوب EOQ (با مقایسه محیط‌های فازی) استخراج می‌شود [۱٦]. در سال‌های اخیر، برخی پژوهش‌ها کوشیده‌اند کیفیت ناقص، فساد و عدم قطعیت تقاضا را به‌طور هم‌زمان وارد مدل کنند. برای مثال، پَل و مهاپاترا[٤] (۲۰۱۷) یک مدل تولید-موجودی یکپارچه در زنجیره‌ی سه لایه تأمین‌کننده-تولیدکننده-خرده‌فروش ارائه می‌کنند که در آن کیفیت تولید و بازرسی غیر کامل است خطاهای نوع I و II، اقلام معیوب دوباره‌کاری

---

[۱] Lok
[۲] Barman & Mahata
[۳] Alamri
[٤] Pal & Mahapatra

می‌شوند و در سطح خرده‌فروش زوال موجودی و کمبود (پس‌افت کامل) نیز لحاظ می‌گردد؛ سپس سیاست‌های بهینه با کمینه‌سازی هزینه کل یکپارچه استخراج می‌شود [۱۷]. همچنین، بودانیا و میشرا[۱] (۲۰۲۵) یک مدل تولید–موجودی برای اقلام معیوب و فاسدشدنی در افق محدود توسعه می‌دهند که در آن تقاضا تصادفی و مبتنی بر فرایند وینر است و هم‌زمان دو نرخ تولید، امکان کمبود، غربالگری، کنترل کیفیت و تأخیر مجاز پرداخت مواد اولیه در تابع هزینه کل وارد می‌شود؛ مثال‌های عددی و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد هم‌افزایی این مؤلفه‌ها تصمیم‌های بهینه تولید–موجودی و طول چرخه را به‌طور معناداری تغییر می‌دهد [۱۸]. در همین راستا، دهایبان[۲] (۲۰۲۰) یک مدل تصمیم‌گیری مارکوفی برای سیستم تولید–موجودی با اقلام معیوب و دچار زوال ارائه می‌کند که در آن تقاضا ماهیت تصادفی دارد (و نیز سناریوی وابستگی به قیمت بررسی می‌شود) و با مقایسه سیاست‌های تولید «با فروش ازدست‌رفته، بدون فروش ازدست‌رفته و ترکیبی»، سیاست بهینه تولید و قیمت‌گذاری را باهدف بیشینه‌سازی سود متوسط مورد انتظار استخراج می‌نماید [۱۹]. این خط پژوهش نشان می‌دهد ترکیب هم‌زمان «زوال، کیفیت ناقص و عدم قطعیت» غالباً مدل‌ها را از چارچوب‌های تحلیلی ساده به سمت روش‌های عددی و شبیه‌سازی–بهینه‌سازی سوق می‌دهد. در این میان، یک خط مکمل در ادبیات بر خطای بازرسی و سیاست‌های بازگشت تمرکز دارد. در سطح تک سطحی، هسیو و هسیو (۲۰۱۳) مدلی از نوع EOQ ارائه می‌کنند که در آن اقلام معیوب، خطاهای نوع اول و دوم بازرسی، کمبود مجاز و مرجوعی مشتری به‌طور هم‌زمان لحاظ می‌شود و نشان می‌دهند کاهش دقت بازرسی می‌تواند کیفیت مؤثر موجودی قابل‌فروش و نرخ بازگشت را به‌شدت تغییر دهد [۵]. به‌طور مشابه، خان و حسین(۲۰۱۹) یک مدل یکپارچه‌ی فروشنده–خریدار ارائه می‌کنند که در آن خطاهای بازرسی نوع I و II لحاظ شده و بخشی از اقلام معیوب پذیرفته‌شده به‌اشتباه پس از فروش از بازار برگشت می‌خورند؛ سپس دو گزینه‌ی مدیریتی تعمیر اقلام نامنطبق یا جایگزینی از طریق خرید محلی را مقایسه کرده و اثر این انتخاب‌ها را بر تصمیم‌های اندازه دسته و سود سیستم بررسی می‌کنند [٤].

بعدازاین جریان، با انتقال افق تصمیم‌گیری از بلندمدت به چرخه‌ی عمر کوتاه و فصلی، ادبیات موجودی به سمت مدل‌های روزنامه‌فروش حرکت می‌کند. در نسخه‌های کلاسیک

---

[۱] Budania & Mishra [۲] Dhaiban

روزنامه‌فروش، کیفیت محموله سالم فرض می‌شود و تنها منبع عدم قطعیت، تقاضاست. در یک توسعه‌ی مهم، بوهمیک و سامانتا[۱] (۲۰۱۲) با فرض «درصد اقلام معیوب تصادفی» (با حالات ویژه‌ی نمایی بریده و نرمال بریده) و «تقاضای تصادفی وابسته به قیمت»، یک مدل روزنامه‌فروش تک دوره‌ای با پس‌افت جزئی ارائه می‌کنند؛ به‌طوری‌که کمبود ناشی از عدم قطعیت تقاضا یا حضور اقلام معیوب، با نرخ پس‌افت نزولی (نمایی) مدل می‌شود و سپس مقدار سفارش **و** قیمت فروش به‌گونه‌ای تعیین می‌گردد که سود مورد انتظار بیشینه شود و نتایج باحالت موجودی کاملاً سالم مقایسه می‌شود [۲۰]. در امتداد مدل‌های چرخه‌ی عمر کوتاه ، چن و ساپرا[۲](۲۰۱۳) یک چارچوب تصمیم‌گیری پویا برای محصولات فسادپذیر با افق چند دوره‌ای ارائه می‌کنند که در آن، تقاضا با گذر زمان (کاهش تازگی و پایان عمر) افت می‌کند و سیاست‌های قیمت‌گذاری و تأمین مجدد تحت شیوه‌های مختلف خروج کالا (مانندFIFO/LIFO) مقایسه می‌شود؛ نتایج آن‌ها نشان می‌دهد انتخاب هم‌زمان سیاست قیمت‌گذاری و صدور موجودی می‌تواند به مدیریت دورریز و بهبود عملکرد سود کمک کند [۲۱]، همچنین، ژو و همکاران (۲۰۲۳) یک مدل دو دوره‌ای قیمت‌گذاری و موجودی برای کالای فسادپذیر تحت تقاضای تصادفی ارائه می‌کنند که در آن بنگاه در طول فصل دو بار تصمیم موجودی می‌گیرد: تصمیم اول در ابتدای فصل و تصمیم دوم در میانه فصل پس از مشاهده و به‌روزرسانی اطلاعات بازار؛ و در دوره دوم امکان تنظیم میان فصل از طریق سفارش مجدد یا مرجوعی وجود دارد. علاوه بر این، در دوره دوم «کالای باقی‌مانده‌ی قدیمی» در کنار «کالای تازه» به‌طور هم‌زمان عرضه می‌شود و برای دو گروه، قیمت‌های متمایز و رقابت قیمتی و جانشینی مدل می‌گردد؛ و کمبود نیز به‌صورت فروش ازدست‌رفته جزئی در نظر گرفته می‌شود [۱]. چن و همکاران(۲۰۲۱) برای کالای با «عمر دو دوره‌ای»، علاوه بر سفارش عادی ابتدای دوره، امکان تنظیم میان‌دوره‌ای موجودی را از طریق سفارش اضطراری یا مرجوعی به تأمین‌کننده وارد می‌کنند و نشان می‌دهند هر سیاست دارای آستانه‌های تصمیم شبیه منطق روزنامه‌فروش است و ترکیب دو سیاست می‌تواند موازنه‌ی ریسک کمبود و ریسک ضایعات را بهبود دهد [۲۲]. بااین‌حال، در اغلب این مدل‌های فصلی و فاسدشدنی، کیفیت اولیه موجودی بی‌نقص فرض می‌شود و فرآیند بازرسی و خطا و جریان صریح اقلام معیوب (و پیامدهای آن

[۱] Bhowmick & Samanta

[۲] Chen & Sapra

مثل مرجوعی) به‌صورت یکپارچه در چارچوب‌های روزنامه‌فروش کمتر مدل‌سازی شده است.در پس‌زمینه‌ی این مدل‌ها، ادبیات قراردادهای زنجیره‌ی تأمین بر طراحی مکانیسم‌های هماهنگ‌کننده تمرکز دارد. پژوهش‌هایی نظیر لیائو و لو[۱] (۲۰۲۲)، سانگ و هی[۲] (۲۰۱۹) نشان می‌دهند که در زنجیره‌های محصولات فسادپذیر، رعایت قید مشارکت[۳]و حداقل سود قابل‌قبول برای هر طرف نقش تعیین‌کننده‌ای در امکان‌پذیری و پایداری قرارداد دارد؛ به‌گونه‌ای که حتی اگر یک قرارداد از منظر ریاضی «هماهنگ‌کننده» باشد، در صورت بی‌توجهی به این قیود ممکن است از دید یکی از طرفین غیرقابل‌قبول بوده و اجرا نشود [۲۳]، [۲٤]. در ادبیات داخلی نیز، عموزاد و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از نظریه‌ی بازی‌ها، قراردادهای همکاری و چارچوب شبیه‌سازی–بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک)، نشان می‌دهند که تنظیم پارامترهای قراردادی می‌تواند تعارض منافع اجزای زنجیره را کاهش داده و سود کل سیستم را بهبود دهد [۲۵]. بااین‌حال، این خط پژوهش عمدتاً بر سطح قیمت‌گذاری و تقسیم سود متمرکز است و وارد جزئیات تصمیم‌های کیفی سه‌حالته در سطح خرده‌فروش – به‌ویژه در حضور کیفیت نامطمئن، بازرسی خطادار و جایگزینی درون فصل – نمی‌شوند.

در کنار مدل‌های تحلیلی، تعدادی مطالعه‌ی داده محور و کاربردی، رفتار موجودی و کیفیت را در زنجیره‌های واقعی بررسی کرده‌اند. احمدی[٤] و همکاران (۲۰۲۰) با تمرکز بر زنجیره‌ی تأمین سلامت، یک مدل کنترل موجودی تصادفی چند دوره‌ای و چند سطحی برای اقلام فسادپذیر ارائه می‌کنند که در آن تاریخ انقضا و قیمت خرید وابسته به «عمر باقی‌مانده» لحاظ شده و دو راهبرد خرید صرفاً اقلام تازه و خرید اقلام با عمر باقی‌مانده متفاوت ازنظر هزینه کل و ریسک‌های کمبود و انقضا مقایسه می‌شود؛ نتایج مطالعه‌ی موردی نشان می‌دهد واردکردن صریح «عمر باقی‌مانده» می‌تواند ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از مبادله‌ی هزینه–ریسک در تصمیم‌های سفارش دهی ایجاد کند [۲٦]. در حوزه‌ی سلامت، افریلیاندا و رحمن[٥] (۲۰۲٤) با استفاده از داده‌های یک بیمارستان در اندونزی، اقلام دارویی را با تحلیل ABCاولویت‌بندی کرده و سپس با رویکرد بازنگری دوره‌ای و سطح سفارش تا مقدار، سیاست سفارش دهی پیشنهاد می‌دهند؛ آن‌ها نتیجه می‌گیرند که این رویکرد می‌تواند کمبود و مازاد (و به‌تبع آن

---

[۱] Liao & Lu
[۲] Song & He
[۳] Individual Rationality
[٤] Ahmadi
[٥] Efrilianda & Rahman

ریسک زیان ناشی از انقضا) را کاهش داده و سفارش دهی را بر اساس تقاضا و زمان تأمین منظم‌تر کند [۲۷]. در حوزه‌ی تولید، اسلام[۱] و همکاران (۲۰۱۳) در یک مطالعه‌ی موردی صنعت پوشاک نشان می‌دهند که ثبت نظام‌مند داده‌های بازرسی، دسته‌بندی عیوب، استقرار چک‌لیست‌ها و اجرای بازرسی داخلی همراه با آموزش می‌تواند فعالیت‌های دوباره‌کاری را کاهش داده و از مسیر کاهش اتلاف، بهبود بهره‌وری و کاهش زمان عبور داخلی، عملکرد تولید را ارتقا دهد [۲۸]. جمع‌بندی این مرور نشان می‌دهد که هرچند ادبیات در حوزه‌های «کیفیت نامطمئن»، «اقلام فسادپذیر»، «مدل‌های فصلی و کوتاه‌عمر» و «سازوکارهای هماهنگ‌سازی» به‌طور جداگانه پیشرفت قابل‌توجهی داشته است، اما این جریان‌ها هنوز در قالب یک چارچوب عملیاتی یکپارچه که هم‌زمان کیفیت، بازرسی خطادار، مرجوعی، و تصمیم‌های درون‌فصل را پوشش دهد، به هم نرسیده‌اند. در بخش عمده‌ای از مدل‌های کیفیت نامطمئن–به‌ویژه جریان‌های EOQ/EPQ و توسعه‌های مبتنی بر فساد–مسئله عمدتاً در افق بلندمدت و چرخه‌ای فرموله می‌شود و تصمیم پس از بازرسی غالباً به قواعد دودویی از جنس «قبول/رد»، «جداسازی/بازگشت»، یا «فروش عادی/تخفیفی» محدود می‌ماند(برای نمونه تیواری و همکاران (۲۰۲۲) و لیائو و همکاران (۲۰۲۰)) حتی در توسعه‌هایی که به ترکیب هم‌زمان کیفیت ناقص و عدم‌قطعیت نزدیک‌تر شده‌اند (مانند الامری و همکاران (۲۰۲٤)، بودانیا و میشرا (۲۰۲۵)) نیز ساختار تصمیم در سطح عملیاتی معمولاً ساده/دودویی باقی می‌ماند و برای یک قاعده سه‌حالته‌ی آستانه‌ای در افق فصلی و کوتاه‌عمر جایگاه روشنی ایجاد نمی‌شود؛ بنابراین «سیاست سه‌حالته‌ی کیفی در محیط فصلی همچنان در ادبیات کم‌رنگ است.

از سوی دیگر، ادبیات بازرسی و بازگشت بخشی از واقعیت را پوشش می‌دهد: برای نمونه هسیو و هسیو (۲۰۱۳) هم‌زمان اقلام معیوب، خطاهای نوع I/II و مرجوعی مشتری را وارد مدل می‌کنند و نشان می‌دهند دقت بازرسی می‌تواند کیفیت مؤثر موجودی و عملکرد اقتصادی را به‌شدت جابه‌جا کند. در سطح زنجیره نیز خان و حسین(۲۰۱۹) گزینه‌های مواجهه با اقلام نامنطبق (تعمیر یا جایگزینی) را بررسی می‌کنند. با این حال، اثر هم‌زمان «بازرسی خطاپذیر، مرجوعی مشتری ، جایگزینی سقف‌دار بخشی از محموله» آن هم با قیود اجرایی واقع‌گرایانه (مانند سقف سهم قابل جایگزینی، اثربخشی جایگزینی، و احتمال به‌موقع‌رسیدن)، در یک افق

[۱] Islam

فصلی و کوتاه‌عمر به‌صورت یکپارچه کمتر مدل‌سازی شده است؛ به بیان دیگر، ادبیات یا به خط بازرسی و مرجوعی نزدیک است یا به خط جایگزینی وتعمیر، اما اتصال این دو در قالب یک سیاست عملیاتی منسجم درون‌فصل کم‌سابقه است.

در جریان مدل‌های فصلی وچنددوره‌ای قیمت‌گذاری–موجودی، اهمیت «تنظیم تصمیم‌ها در طول افق فروش» برای مدیریت موازنه کمبود–ضایعات برجسته شده است (برای نمونه چن و ساپرا (۲۰۱۳)؛چن و همکاران (۲۰۲۱) و ژو و همکاران(۲۰۲۳)). با این حال، در بخش قابل توجهی از این مدل‌ها کیفیت اولیه محموله سالم فرض می‌شود و تخفیف مرحله دوم یا ساده‌سازی می‌گردد یا به‌صورت برون‌زا وارد می‌شود؛ در حالی‌که در عمل، بازار مرحله دوم معمولاً به کانال‌های «حساس به تازگی» و «حساس به تخفیف» تفکیک می‌شود و تخفیف باید همراه با آستانه‌های کیفیت و مقدار سفارش به‌صورت مشترک تعیین گردد. از این رو، ترکیب «تقاضای فصلی دومرحله‌ای،دوکاناله + تخفیف،قیمت‌گذاری درون‌زا + کیفیت نامطمئن و پیامدهای آن (بازرسی و مرجوعی) + تصمیم‌های درون‌فصل (به‌ویژه جایگزینی)» همچنان یک شکاف معنادار در ادبیات ایجاد می‌کند.

از منظر روش‌شناختی و انگیزشی نیز، با ترکیب هم‌زمان فساد، کیفیت ناقص و عدم‌قطعیت تقاضا، توابع هدف اغلب قطعه‌ای و ناهموار می‌شوند و بسیاری از مدل‌ها به سمت حل‌های عددی، فراابتکاری یا چارچوب‌های تصادفی حرکت می‌کنند (برای نمونه بودانیا و میشرا (۲۰۲۵) با تقاضای مبتنی بر فرایند وینر؛ دهاییان (۲۰۲۰) با صورت‌بندی مارکوفی). با این وجود، استفاده‌ی منسجم از زنجیره «شبیه‌سازی مونت‌کارلو + بهینه‌سازی بیزی» برای استخراج سیاست‌های بهینه در یک ساختار سه‌حالته و تحت قیود اجرایی/قراردادی، در ادبیات کمتر گزارش شده است. از منظر انگیزشی نیز، ادبیات قراردادها تأکید دارد که حتی سازوکارهای هماهنگ‌کننده اگر قید مشارکت را رعایت نکنند، لزوماً اجراپذیر نخواهند بود (برای نمونه سانگ و هی(۲۰۱۹) و لیائو و لو (۲۰۲۲)؛ بنابراین تلفیق «سیاست عملیاتی سه‌حالته» با «حل شبیه‌سازی-یادگیری‌محور» و «اعمال صریح قیود مشارکت» همچنان یک خلأ قابل دفاع محسوب می‌شود.بر این اساس، پژوهش حاضر یک مدل روزنامه‌فروش سه‌حالته برای کالای فصلی با کیفیت نامطمئن و بازرسی خطاپذیر ارائه می‌کند که در آن خرده‌فروش بر پایه‌ی دو آستانه‌ی کیفیت، بین سه اقدام «نگه‌داشتن، جایگزینی درون‌فصل، بازگشت به تأمین‌کننده»

تصمیم می‌گیرد. این سیاست تحت تقاضای تصادفیِ دومرحله‌ای و دوکاناله و با لحاظ کردن مرجوعی مشتری و قید مشارکت تأمین‌کننده، با رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو–بهینه‌سازی بیزی حل می‌شود و چارچوبی یکپارچه برای مدیریت ریسک کیفیت و عمر در محیط کوتاه‌عمر فراهم می‌آورد. (کد مکان تصمیم جدول یک: R =خرده‌فروش ،M = تولید کننده، SC= کل زنجیره/یکپارچه، VB= دو سطحی)

جدول ۱- مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات منتخب پیشین

مرجع (سال)	چارچوب مدل / مکان تصمیم با کد	فساد‌پذیری	تقاضا تصادفی	کیفیت ناقص	خطای بازرسی	ریسک پس از فروش/مرجوعی	اهرم درون‌فصل	ساختار تصمیم کیفیت	روش حل
بوهمیک و سامانتا (۲۰۱۲)	روزنامه فروش(R)	✗	✓	✓	✗	بازگشت معیوب به فروشنده	✗	بهینه‌سازی Q و قیمت	تحلیلی
هسیو و هسیو (۲۰۱۳)	EOQ (R)	✗	✗	✓	✓	مرجوعی مشتری + جریمه	✗	دودویی (قبول/رد)	تحلیلی
چن و ساپرا (۲۰۱۳)	مرور دوره ای(R)	✓	✓	✗	✗	✗	✗	قیمت‌گذاری و تأمین مجدد	تحلیلی/DP
پَل و مهاپاترا (۲۰۱۷)	تولید- موجودی (SC)	✓	✓	✓	✓	✗	✗	غربالگری/ دوباره‌کاری	عددی
خان و حسین (۲۰۱۹)	فروشنده- خریدار (VB)	✗	✗	✓	✓	بازگشت بازار (خطای نوع II)	✓ جایگزینی/ خرید محلی	تعمیر در برابر جایگزینی	تحلیلی + مقایسه سیاستی
لیائو وهمکاران (۲۰۲۰)	EOQ (R)	✓	✗	✓	✗	✗	✗	چرخه/سفارش (جداسازی)	تحلیلی
چن همکاران (۲۰۲۰)	فصلی/دو دوره‌ای(R)	✓	✓	✗	✗	✗	✓سفارش اضطراری/ مرجوعی	سیاست آستانه‌ای	تحلیلی

مرجع (سال)	چارچوب مدل / مکان تصمیم با کد	فسادپذیری	تقاضا تصادفی	کیفیت ناقص	خطای بازرسی	ریسک پس از فروش/مرجوعی	اهرم درون‌فصل	ساختار تصمیم کیفیت	روش حل
بی هاوانی و همکاران (۲۰۲۰)	EOQ (R)	✓	✗	✓	✗	✗	✗	قید پذیرش/کنترل کیفیت	PSO (نوتروسوفیک)
دهایبان (۲۰۲۰)	تولید- موجودی مارکوفی (M)	✓	✓	✓	✗	✗	✗	کنترل پویا (سیاست‌های تولید/قیمت)	عددی/MDP
تیواری و همکاران (۲۰۲۲)	EOQ (R)	✓	✗	✓	✗	✗	✗	دودویی (جداسازی/فروش تنزیلی)	تحلیلی + عددی
بارمن و مهاتا (۲۰۲۲)	تولید– موجودی دوسطحی (VB)	✗	✓	✓	✗	✗	✗	تصمیمات زنجیره‌ای (سفارش/ lead time)	تحلیلی + مقایسه
ژو و همکاران (۲۰۲۳)	قیمت گذاری فصلی(R)	✓	✓	✗	✗	✗	✓تنظیم دوره دوم	قیمت/سفارش دومرحله‌ای	تحلیلی/DP
سکار و همکاران (۲۰۲۳)	EPQپایدار (SC)	✓	✗	✓	✗	✗	✗	تولید سه‌نرخی + دوباره‌کاری	عددی/بهینه‌سازی
الامروی وهمکاران (۲۰۲٤)	EOQپایدار (R)	✓	✓	✓	✗	✗	✗	EOQبا یادگیری/تبلیغ	فراابتکاری
بودانی و میشرا (۲۰۲۵)	تولید- موجودی (M)	✓	✓	✓	✗	✗	✗	طول چرخه/نرخ تولید	عددی
پژوهش حاضر	روزنامه فروش فصلی دومرحله‌ای (R)	✓	✓	✓	✓	✓ مرجوعی مشتری	✓ جایگزینی سقف‌دار	سه‌حالته آستانه‌ای	شبیه‌سازی مونت‌کارلو + BO

۳- مدل و روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- رویکرد روش‌شناختی پژوهش

پژوهش حاضر یک مدل‌سازی کمی برای مدیریت موجودی فصلی با کیفیت نامطمئن است و از نظر فلسفی در پارادایم پسااثبات‌گرایانه قرار دارد. از نظر رویکرد نظری، تحقیق قیاسی است: ابتدا چارچوب آستانه‌ای سه‌حالته بر اساس دو آستانه کیفیت (α_1 و α_2) تعریف می‌شود، سپس پیامدهای آن با تحلیل‌های عددی بررسی می‌گردد. استراتژی اصلی تحقیق بر مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی–بهینه‌سازی استوار است. از نظر ماهیت، کمی و تک‌روشی بوده و از لحاظ افق زمانی، یک مطالعه مقطعی متمرکز بر یک فصل فروش محسوب می‌شود. این طراحی پژوهشی، یک مدل ریاضی منسجم را با یک روش حل قدرتمند برای مسائل پیچیده تحت عدم قطعیت ترکیب می‌کند.

۳-۲- مدل ریاضی

۳-۲-۱- تعریف مسئله و مفروضات

یک خرده‌فروش با کالای فصلی فسادپذیر روبه‌رو است که تنها در طول یک‌فصل فروش (دو نیم‌فصل متوالی) قابلیت عرضه دارد. به دلیل طول عمر کوتاه محصول، خرده‌فروش تنها یک‌بار در ابتدای فصل مقدار سفارش Qرا تعیین می‌کند و امکان سفارش مجدد ندارد .کیفیت محموله با نرخ معیوب واقعی r در بازه $[۰،۱]$ توصیف می‌شود که یک متغیر تصادفی با تابع چگالی $f(r)$ است. تقاضای مشتریان در نیم‌فصل اول و دوم با متغیرهای تصادفی $D_۱$ و $D_۲$ مدل می‌شود. پس از ورود محموله، خرده‌فروش یک بازرسی اولیه انجام می‌دهد. این بازرسی با حساسیت S_e (احتمال تشخیص درست کالای معیوب) و ویژگی S_p(احتمال تشخیص درست کالای سالم) مشخص می‌شود؛ بنابراین، هر دو نوع خطای نوع اول (رد سالم) و نوع دوم (پذیرش معیوب) ممکن است رخ دهد. نتیجه‌ی بازرسی، یک نرخ معیوب مشاهده‌شده $\tilde{r}$ است که لزوماً با نرخ معیوب واقعی r برابر نیست.

بر اساس $\tilde{r}$، خرده‌فروش یکی از سه استراتژی زیر را انتخاب می‌کند:

- نگه‌داشتن (اگر $\tilde{r} \leq \alpha_۱$)
- جایگزینی مشروط (اگر $\alpha_۱ < \tilde{r} < \alpha_۲$)
- بازگشت کامل (اگر $\tilde{r} > \alpha_۲$)

آستانه‌های α_1 و α_2 همراه با مقدار سفارش Q و نرخ تخفیف روی کالای قدیمی در نیم‌فصل دوم، بردار تصمیم مدل را تشکیل می‌دهند. در نیم‌فصل دوم، بازار از دو گروه مشتری تشکیل‌شده است: مشتریان حساس به‌تازگی که تمایل به خرید کالای کاملاً تازه دارند (کانال «صرفاً تازه») و مشتریان حساس به قیمت که تخفیف برای آن‌ها جذابیت اصلی است (کانال «صرفاً تخفیف»). کالای باقی‌مانده از نیم‌فصل اول با تخفیف δ به کانال تخفیف عرضه می‌شود و در استراتژی جایگزینی، کالای تازه‌ی جایگزین برای کانال تازه فراهم می‌شود.

۳-۲-۲- نمادگذاری، متغیرهای تصمیم و پارامترها

- متغیرهای تصمیم $\theta = (Q, \alpha_1, \alpha_2, \delta)$:

Q مقدار سفارش ابتدای فصل (واحد)

α_1, α_2 آستانه‌های نرخ معیوب برای تفکیک بین سه استراتژی ($0<\alpha_1<\alpha_2<1$)

δ میزان نرخ تخفیف پولی در فاز دوم ($[0,1] \subset [0,\delta_{cap}]$)

- متغیرهای تصادفی:

r نرخ واقعی معیوب با توزیع $f(r)$

D_1, D_2 تقاضای تصادفی در مرحله ۱ و مرحله ۲ با تابع چگالی (f_{D_2}, f_{D_1})

- پارامترهای کیفیت، بازرسی و مرجوعی:

S_e, S_p حساسیت و ویژگی فرآیند بازرسی (خطای نوع اول و دوم)

ρ_1, ρ_2 شدت مرجوعی مشتری در مراحل ۱ و ۲(احتمال مرجوعی کالای معیوب)

- ساختار دوکاناله در نیم‌فصل دوم:

s_F, s_B سهم کانال‌های تازه/قدیمی در فاز ۲($s_F + s_B = 1$)

γ, κ حساسیت تقاضا به تخفیف (در کانال‌های تازه و تخفیف)

$\sigma(\delta)$ نرخ جانشینی مشتریان کانال تازه به کانال تخفیف در صورت برآورده نشدن تقاضای تازه

- پارامترهای جایگزینی:

η اثربخشی فنی جایگزینی (حداکثر کسری از rQ که قابل‌جایگزینی است)

cap_{share} سقف قراردادی درصد جایگزینی نسبت به $cap_{share} \in [0,1]$

τ احتمال به‌موقع رسیدن (سهم پنجره‌ی فروش مؤثر برای تازه‌های جایگزین)

- قیمت‌ها و هزینه‌های خرده‌فروش:

P قیمت فروش کالای تازه (مرحله ۱ و کالا تازه مرحله ۲)

C_r هزینه خرید هر واحد از تأمین‌کننده

C_u جریمه کمبود هر واحد

v_s درآمد اسقاط ضایعات نهایی

C_d هزینه معدوم‌سازی /دفع (خرده‌فروش)

C_{return} هزینه پردازش مرجوعی مشتری (هر واحد)

K_{back}, C_{back} هزینه ثابت و واحدی بازگشت به تأمین‌کننده

- هزینه‌ها و پارامترهای تأمین‌کننده

C_f, C_t هزینه تولید/تأمین هر واحد (اولیه و جایگزین)

C_{ship} هزینه ارسال واحدِ جایگزین

h ارزش اسقاط هر واحد بازگشتی (درآمد تأمین‌کننده)

C_{dis} هزینه دفع/معدوم‌سازی هر واحد بازگشتی (تأمین‌کننده)

rep_{fee} کارمزد جایگزینی پرداختی به تأمین‌کننده

P_{rec} قیمت فروش مجدد واحد سالم توسط تأمین‌کننده

- پارامترهای قرارداد بازگشت:

$\phi(rc)$ نرخ بازپرداخت واحدی از سوی تأمین‌کننده به خرده‌فروش، تابعی از نرخ معیوب تأییدشده rc

δ_{RL} سهم خرده‌فروش از هزینه لجستیک معکوس

f کارمزد ثابت برای اقلام سالم برگشتی

ψ جزء ثابت جریمه‌ی سرانه به ازای هر واحد سفارش

Ψ_e ضریب جریمه تناسبی برحسب مازاد نرخ معیوب

λ ضریب جریمه بابت فروش‌های ازدست‌رفته و افت سطح خدمت

π^S_{min} حداقل سود قابل‌قبول برای تأمین‌کننده

۳-۲-۳- بازرسی خطادار و کیفیت مؤثر موجودی

بر محموله‌ی Q واحدی، بازرسی اولیه با حساسیت Se و ویژگی Sp انجام می‌شود و اقلام در چهار گروه قرار می‌گیرند:

مثبت واقعی :معیوب و درست شناسایی	$TP = Se \cdot rQ$
منفی کاذب: معیوب که به‌اشتباه سالم تشخیص داده‌شده‌اند	$FN = (1 - Se) \cdot rQ$
منفی واقعی: سالم و درست سالم تشخیص داده‌شده.	$TN = Sp \cdot (1 - r)Q$
مثبت کاذب: سالم ولی به‌اشتباه معیوب تشخیص داده‌شده.	$FP = (1 - Sp) \cdot (1 - r)Q$

موجودی اولیه قابل‌عرضه	$I_{-0} = TN + FN$ $= Sp(1 - r)Q + (1$ $- Se)rQ$
اقلام اسقاطی فوری	$Scrap. = TP + FP$

ازآنجایی‌که اقلام منفی کاذب FN وارد انبار فروش می‌شـــوند، موجودی قابل‌عرضـــه کاملاً سالم نیست .نرخ معیوب مؤثر موجودی قابل‌فروش:

$$P_{eff} = \frac{FN}{I.} = \frac{(1 - S_e)r}{S_p(1-r)+(1-S_e)r}$$

این نرخ، همراه با احتمال مرجوعی ρ_i، تعیین می‌کند که برای هر فروش خالص، به‌طور متوسط چند واحد موجودی «مصرف» می‌شود. ضریب مصرف موجودی در مرحله‌ی i:

$$m_i = \frac{1}{1 - \rho_i . P_{eff}}$$

۳-۲-۴- مدل‌سازی استراتژی‌های سه‌حالته خرده‌فروش

پس از بازرسی و مشاهده‌ی $\tilde{r}$، خرده‌فروش یکی از سه استراتژی زیر را انتخاب می‌کند. در این بخش، برای هر استراتژی ابتدا شهود رفتاری و سپس فرمول‌های اصلی و سود سناریویی ارائه می‌شود.

استراتژی ۱: نگه‌داشتن (اگر $\tilde{r} \leq \alpha_1$)

در این حالت خرده‌فروش کل محموله را می‌پذیرد و فروش در دونیم فصل انجام می‌شود.

مرحله‌ی اول – فروش از موجودی اولیه

ظرفیت خالص فروش (با احتساب مرجوعی)	$Cap_1 = \frac{I.}{m_1}$
فروش خالص	$s_1 = \min(D_1, Cap_1)$
مرجوعی مورد انتظار	$R_1=(m_1-1)\,S_1=(\rho_1.Peff)/(1-\rho_1.Peff)S_1$
کمبود	$Short_1^+ = [D_1 - Cap_1]$
موجودی فیزیکی باقی‌مانده	$x_1^+ = [I. - m_1.S_1]$

مرحله‌ی دوم – دو کانال و تأثیر تخفیف

در نیم‌فصل دوم، تقاضای پایه‌ی D_2 بین دو گروه مشتری تقسیم می‌شود:

- مشتریان حساس به‌تازگی (کانال «صرفاً تازه») که ترجیح می‌دهند محصول کاملاً تازه بخرند؛
- مشتریان حساس به قیمت (کانال «صرفاً تخفیف») که تخفیف برای آن‌ها جذابیت اصلی است.

با اعمال تخفیف δ روی کالای قدیمی، بخشی از مشتریان تازه محور به سمت کالای تخفیف خورده جذب می‌شوند و در مقابل، جذابیت کانال تخفیف افزایش می‌یابد. این رفتار با دو پارامتر γ و κ مدل می‌شود:

تقاضای کانال صرفاً-تازه	$D_2^F(\delta)^1 = (s_F . D_2 . (1 - \gamma\,\delta))^+$
تقاضای کانال صرفاً-تخفیف	$D_2^B(\delta) = s_B . D_2 . (1 + \kappa\delta)$

- هر چه δ بزرگ‌تر باشد، عبارت $(1-\gamma\delta)$ کوچک‌تر شده و نشان می‌دهد بخشی از تقاضای «صرفاً تازه» به سمت کالای تخفیفی حرکت می‌کند؛
- در مقابل، $(1+\kappa\delta)$ افزایش‌یافته و نشان‌دهنده‌ی رشد تقاضای کانال تخفیف است.

در استراتژی نگه‌داشتن، موجودی تازه‌ای وارد نمی‌شود و فقط موجودی قدیمی X_1 برای کانال تخفیف به کار می‌رود:

ظرفیت خالص فروش (با احتساب مرجوعی)	$Cap_2 = x_1 \,/\, m_2$
فروش خالص	$S_2^{old} = \min\{D_2^B(\delta), Cap_2\}$
مرجوعی مورد انتظار	$R_2 = (m_2 - 1).S_2$
کمبودها	$Short_2^{B+} = [D_2^B(\delta) - Cap_2]$ $Short_2^F = D_2^F(\delta)$
ضایعات (موجودی فیزیکی باقی‌مانده)	$waste = w^+ = [x_1 - m_1.S_1]$

سود نهایی در حالت نگه‌داشتن:

$$\pi_{keep}^R\,(Q, r; D_1, D_2, \delta) = P\,S_1 + P(1-\delta)S_2^B - C_r Q - C_u \cdot (Short_1 + Short_2^B + Short_2^F) - C_{return}\,(R_1 + R_2) - C_d\,(Scrap. + R_1 + R_2) + v_s\,(Waste)$$

ب) استراتژی ۲ جایگزینی (اگر $\alpha_1 < \tilde{r} < \alpha_2$)

در این حالت، خرده‌فروش اقلام سالم اولیه را نگه می‌دارد و بخشی از اقلام معیوب را با کالای تازه جایگزین می‌کند. هدف، افزایش دسترسی به کالای باکیفیت (تازه) در نیم‌فصل دوم است، درحالی‌که محدودیت‌های عملیاتی و انگیزشی نیز رعایت شود.

مقدار جایگزینی اولیه به شکل زیر تعریف می‌شود:

---

[1] $(x)^+ = \max(x, 0)$

$$J = \min\{\eta.\tilde{r}.Q, cap_{share}.Q\}$$

$\eta.\tilde{r}.Q$ (سقف فنی/کیفیت جایگزینی): حداکثر تعداد کالایی است که با توجه به نرخ واقعی معیوب مشاهده‌شده و اثربخشی فرآیند، می‌توان جایگزین کرد.

cap_{share}: سقف قراردادی جایگزینی به‌صورت درصدی از سفارش اولیه (برای جلوگیری از سوءاستفاده در گزارش نرخ معیوب).

از این مقدار، تنها بخشی که به‌موقع به نیم‌فصل دوم برسد، وارد موجودی تازه می‌شود:

$$J_{on} = \tau.J, \quad \tau \in [0,1]$$

مرحله‌ی اول فروش مانند استراتژی نگه‌داشتن است و مقادیر X_1, R_1,$Short_1$,S_1 همان‌گونه محاسبه می‌شوند.

مرحله‌ی دوم – دو نوع موجودی و جانشینی مشتریان

در نیم‌فصل دوم:

- موجودی تازه J_{on} :برای کانال تازه؛
- موجودی قدیمی X_1 :برای کانال تخفیف.

تقاضای اولیه‌ی کانال‌ها همان $D_2^F(\delta)$ و $D_2^B(\delta)$ است که قبلاً تعریف شد. ابتدا تقاضای تازه از موجودی تازه تأمین می‌شود:

$$S_2^{new} = \min\{D_2^F(\delta), J_{on}\}$$

اگر تقاضای تازه به‌طور کامل پاسخ داده نشود، کمبود اولیه‌ی کانال تازه:

$$u_F = [D_2^F(\delta) - S_2^{new}]^+$$

فرض می‌شود بخشی از این مشتریان (با نرخ جانشینی $\sigma(\delta)$ حاضرند در صورت اعمال تخفیف جذاب، کالای قدیمی را در کانال تخفیف خریداری کنند. این رفتار با تقاضای مؤثر کانال تخفیف مدل می‌شود:

$$D_2^{B,eff}(\delta) = D_2^B(\delta) + \sigma(\delta)u_F$$

- $\sigma(\delta)$تابعی افزایشی از δ است؛ یعنی هرچه تخفیف بیش‌تر باشد، احتمال مهاجرت مشتریان تازه محور به کانال تخفیف بیشتر است؛
- در عوض، به دلیل حساسیت بالای مشتریان تخفیف‌دار به قیمت، جانشینی معکوس (از کانال تخفیف به تازه) ناچیز فرض می‌شود.

فروش کالای قدیمی: $S_{۲}^{old} = \min\left\{D_{۲}^{B,eff}(\delta), {}^{x_{۱}}/_{m_{۲}}\right\}$

کمبودهای نهایی نیم‌فصل دوم:

$$Short_{۲} = Short_F + Short_B$$

$$Short_F = \left(۱ - \sigma(\delta)\right)u_F$$

$$Short_B = \left[D_{۲}^{B,eff}(\delta) - S_{۲}^{old}\right]^{+}$$

ضایعات:

$$\text{Waste}=[J_{on} - S_{۲}^{new}]^{+}$$

$$Scrap_{۱} = [X_{۱}/m_{۲} - S_{۲}^{old}]^{+}$$

سود نهایی در حالت جایگزینی:

$$\pi_{replace} = P.S_{۱} + P.S_{۲}^{new} + (P(۱-\delta).S_{۲}^{old}) - C_r\text{Q} - C_u(Short_{۱} + Short_{۲}) - C_d(R_{۱} + R_{۲} + Scrap_{.} + Scrap_{۱}) - C_{return}(R_{۱} + R_{۲}) - v_s Waste - rep_{fee}.J_{on}$$

ج) استراتژی بازگشت ($\tilde{r}>\alpha_{۲}$)

در این حالت، خرده‌فروش کل محموله را به تأمین‌کننده بازمی‌گرداند و عملاً هیچ فروشی انجام نمی‌دهد:

$$Short_{۱} = D_{۱}$$

$$Short_{۲} = D_{۲}$$

قرارداد بازگشت به‌صورت زیر مدل می‌شود:

- بازپرداخت متغیر برحسب نرخ معیوب تأییدشده r_c:

$$\emptyset(r_c) = \emptyset_{min} + (۱ - \emptyset_{min}).\frac{r_c - \alpha_{۲}}{۱ - \alpha_{۲}} \qquad (r_c \geq \alpha_{۲})$$

- تسهیم هزینه‌ی لجستیک معکوس با δ_{RL}،
- جریمه‌ی تأمین‌کننده برای کیفیت نامطلوب و فروش‌های ازدست‌رفته:

$$\pi_{Pen} = \psi Q + \Psi_e Q(\tilde{r} - \alpha_{۲})^{+} + \lambda(D_{۱} + D_{۲})$$

سود نهایی در حالت بازگشت:

$$\pi_{return}^{R}(\text{Q,r};D_{۱},D_{۲}) = -C_r\text{Q} + C_r\text{Q}(\emptyset(r_c)) - \delta_{RL}(C_{back}\text{Q} + K_{back}) - C_u(\text{D}_{۱} + D_{۲}) - \pi_{fp} + \pi_{pen}$$

۳-۲-۵- سود تأمین‌کننده و قید مشارکت(IR)

سود سناریویی تأمین‌کننده نیز در سه ناحیه کیفیت تعریف می‌شود:

ناحیه نگه‌داشتن ($\tilde{r} \leq \alpha_{۱}$)

$$(Q,r) = C_r Q - C_f Q \pi_{keep}^{s}$$

ناحیه جایگزینی(اگر $\alpha_1 < \tilde{r} < \alpha_2$)

$\pi^{S}_{replace}(Q,r)= C_r\ Q + rep_{fee}\cdot J_{on} - (C_f Q + C_t J) - C_{ship}\cdot J - C_{back}(\tilde{r}Q) + h(\tilde{r}Q) - C_{dis}(\tilde{r}Q)$

ناحیه بازگشت($\tilde{r}>\alpha_2$)

$\pi^{S}_{return}(Q,r)=C_r Q.(1-\emptyset(r_c)) - C_f Q - (1-\delta_{RL})(C_{back}Q + K_{back}) - C_{dis} rQ + hQ + P_{rec}(1-r)Q - \pi_{pen}$

قید مشارکت تأمین‌کننده (IR):

$$E[\pi^{sup}_{replace}(\Theta)] \geq \max\{E[\pi^{sup}_{return}(\Theta), \pi^{sup}_{min}\}$$

که Θ بردار پارامترهای قراردادی را نشان می‌دهد.

۳-۲-۶- تابع هدف و قیود ساختاری مدل

به سبب خطادار بودن بازرسی، بین نرخ معیوب واقعی r و نرخ معیوب مشاهده‌شده $\tilde{r}$ یک نگاشت صعودی و وارون‌پذیر (g)برقرار است. برای آستانه‌های مشاهده‌شده α_1وα_2، نرخ‌های معیوب واقعی متناظر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_i = g^{-1}(\alpha_i) = \frac{\alpha_i - (1-s_p)}{s_e + s_p - 1} \quad , \quad i \in \{1,2\}$$

بدین ترتیب دامنه‌ی کیفیت واقعی به سه ناحیه‌ی $[0, r_1]$ ، $[r_1, r_2]$ و $[r_2, 1]$تقسیم می‌شود که به ترتیب با استراتژی‌های نگه‌داشتن، جایگزینی و بازگشت متناظرند.

الف-تابع هدف

هدف خرده‌فروش، بیشینه‌سازی سود انتظاری پیش از فصل است:

$$\max_{Q,\alpha_1,\alpha_2} E[\pi] = \int_0^{r_1} E[\pi_{keep}(Q,r,\delta)] f_R(r) dr + \int_{r_1}^{r_2} E[\pi_{replace}(Q,r,\delta)] f_R(r) dr + \int_{r_2}^{1} E[\pi_{return}(Q,r,\delta)] f_R(r) dr$$

ب-قیود مدل

۱- قید بی‌تفاوتی آستانه‌ها (شرط مرزی بین استراتژی‌ها):

$$\pi_{rep}(Q,r_1) = \pi_{keep}(Q,r_1,\delta)$$
$$\pi_{ret}(Q,r_2) = \pi_{rep}(Q,r_2,\delta)$$

۲- قید مشارکت تأمین‌کننده (IR)(قید مفهومی):

$$E[\pi^{sup}_{replace}(\Theta)] \geq \max\{E[\pi^{sup}_{return}(\Theta), \pi^{sup}_{min}\}$$

۳- دامنه‌ی متغیرها و پارامترهای عملیاتی:

$$0 \leq \eta \leq 1 \qquad 0 < \alpha_1 < \alpha_2 < 1 \qquad Q \geq 0$$
$$0 \leq \tau \leq 1 \qquad 0 \leq \delta \leq \delta_{cap} \qquad 0 \leq cap_{share} \leq 1$$

به دلیل حضور عملگرهای min و max و هم‌زمانی چندین منبع عدم قطعیت، تابع سود انتظاری به‌صورت بسته ساده قابل مشتق‌گیری نیست؛ همانند برخی مطالعات شبیه‌سازی–بهینه‌سازی (عظیمی و همکاران (۱۳۹۳) و بالانی و همکاران (۱٤۰۲) [۲۹]، [۳۰]). بنابراین، در ادامه از یک روش شبیه‌سازی–بهینه‌سازی برای تقریب زدن سود انتظاری و یافتن سیاست بهینه استفاده می‌شود.

۳-۳- روش‌شناسی حل: چارچوب بهینه‌سازی_شبیه‌سازی

در این بخش، الگوریتم حل مدل به‌صورت گام‌به‌گام ارائه می‌شود. ایده‌ی اصلی آن است که برای هر سیاست θ، سود انتظاری با شبیه‌سازی مونت‌کارلو برآورد شده و سپس به کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی بیزی، فضای تصمیم جست‌وجو می‌شود.

۱-۳-۳- گام اول – تنظیم ورودی‌ها و دامنه تصمیم

در گام نخست، ورودی‌های مدل تنظیمات کلی الگوریتم تعیین می‌شود:

۱-مشخص کردن توزیع نرخ معیوب و توزیع‌های تقاضا$(f_{D_1}, f_{D_2}, f_{(r)})$

۲- مقداردهی پارامترهای هزینه‌ای، کیفی و قراردادی $(C_r, C_d, C_u, \dots, S_e, S_p)$

۳- تعیین دامنه‌ی جست‌وجو برای$(Q, \alpha_1, \alpha_2, \delta)$ بر اساس ملاحظات عملی.

٤- انتخاب اندازه نمونه‌ی شبیه‌سازی N و حداکثر تعداد ارزیابی‌های مجاز در بهینه‌سازی بیزی.

۳-۳-۲-گام دوم – شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای یک سیاست مشخص

برای هر بردار تصمیم $\theta = (Q, \alpha_1, \alpha_2, \delta)$ سود انتظاری خرده‌فروش با شبیه‌سازی مونت‌کارلو برآورد می‌شود:

۱- برای هر سناریو n=۱,…,N یک سه‌تایی $(D_1^{(n)}, D_2^{(n)}, r^{(n)})$ از توزیع‌های $f_{D_1}, f_{D_2}, f_{(r)}$ نمونه‌گیری می‌شود.

۲- با استفاده از مشخصات بازرسی (S_e, S_p) نرخ معیوب مشاهده‌شده $r^{(n)}$ محاسبه‌شده و با توجه به آستانه‌های α_1, α_2، استراتژی‌های متناظر(نگه‌داشتن، جایگزینی یا بازگشت) انتخاب می‌شود.

۳- مطابق فرمول‌های بخش ۳-۲، سود سناریویی $\pi^{R,(n)}(\theta)$ برای خرده‌فروش محاسبه می‌شود.

٤- برای کاهش نویز شبیه‌سازی و افزایش دقت مقایسه‌ی سیاست‌ها، از فن کاهش واریانس اعداد تصادفی مشترک (CRN) استفاده شد و برای تعادل دقت و زمان، در فرایند جست‌وجو هر سیاست با N_{MC}=۱۲۰۰ سناریو ارزیابی شد.

٥- سود انتظاری خرده‌فروش برای سیاست θ با میانگین‌گیری روی سناریوها برآورد می‌گردد:

$$E[\widehat{\pi^R(\theta)}] = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{n=1}^{N_{MC}} \pi^{R,(n)}(\theta)$$

۳-۳-۳-گام سوم: بهینه‌سازی بیزی روی فضای تصمیم

ازآنجاکه ارزیابی هر نقطه توسط مونت‌کارلو زمان‌بر است، جستجوی کورکورانه یا استفاده از الگوریتم‌های نیازمند جمعیت زیاد (مانند الگوریتم ژنتیک) غیرمنطقی است. لذا از بهینه‌سازی بیزی برای جست‌وجوی کارآمد در فضای $\theta = (Q, \alpha_1, \alpha_2, \delta)$، استفاده می‌شود:

۱- در تکرارهای اولیه، چند نقطه‌ی اولیه در دامنه‌ی تصمیم به‌صورت طراحی آزمایش یا نمونه‌گیری تصادفی انتخاب و مقدار $\hat{E}[\pi^R(\theta)]$ در آن‌ها برآورد می‌شود.

۲- بر اساس داده‌های موجود، یک مدل جانشین (به‌عنوان‌مثال فرایند گاوسی) برای نگاشت $\theta \mapsto \hat{E}[\pi^R(\theta)]$ برازش داده می‌شود.

۳- یک تابع اکتساب(مانند بهبود مورد انتظار)،بیشینه می‌شود تا نقطه‌ی بعدی θ^{new} برای ارزیابی انتخاب شود.

٤- در θ^{new}، گام دوم اجراشده و مقدار جدید $\hat{E}[\pi^R(\theta^{new})]$ به مجموعه‌ی مشاهدات اضافه می‌گردد.

٥- این چرخه تا زمانی ادامه می‌یابد که معیار توقف (عدم بهبود معنادار در چند تکرار متوالی یا رسیدن به حداکثر تعداد ارزیابی‌ها) برقرار شود.

۴-۳-۳- گام چهارم – پروتکل اجرا، اعمال قیود و اعتبارسنجی

دو موتور شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در یک پروتکل منسجم اجراشده‌اند:

۱. اعمال قید مشارکت تأمین‌کننده (IR) :این قید مستقیماً در حلقه‌ی بهینه‌سازی اعمال شد؛ هر سیاستی که سود تأمین‌کننده را برآورده نمی‌کرد، با اختصاص یک جریمه‌ی بزرگ (امتیاز منفی) توسط الگوریتم BO رد می‌شد.

۲. بودجه‌ی محاسباتی :فرآیند با طراحی اولیه‌ی ۵۰ نقطه‌ای آغاز شد و با ۱۰۰ تکرار تکاملی ادامه یافت (ارزیابی درمجموع ۱۵۰).

۳. اعتبارسنجی نهایی :پس از همگرایی الگوریتم به سیاست θ^*، این سیاست یک‌بار دیگر با دقت بالا و N_{MC}=۲۰۰۰۰ سناریوی مستقل ارزیابی شد و فاصله اطمینان ۹۵٪ سود با روش بوت‌استرپ محاسبه گردید.

٤. پیاده‌سازی عددی با زبان Python ۳.x انجام‌شده است.

۴- نتایج عددی و تحلیل‌ها

پس از فرمول‌بندی ریاضی مدل و تشریح چارچوب شبیه‌سازی–بهینه‌سازی، در این بخش نتایج عددی ارائه می‌شود. ابتدا یک مثال عددی کالیبره شده برای یک محصول لبنی فصلی معرفی می‌گردد تا رفتار مدل و متغیرهای تصمیم در یک سناریوی واقع‌بینانه بررسی شود. سپس، برای ارزیابی کارایی روش حل پیشنهادی، عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی بیزی (BO) با چند الگوریتم فرا ابتکاری متعارف مقایسه می‌شود.

۴-۱- مثال عددی

در این بخش، به‌منظور توضیح کاربرد مدل و انجام تحلیل حساسیت و سناریوها، یک مثال عددی فرضی برای یک محصول لبنی فصلی (ماست طعم دار) بررسی‌شده است. همانند رویه‌ی متعارف در مدل‌های موجودی تصادفی، تقاضای دو فاز به‌صورت نرمال فرض شده است [۱]، [۲۱] و نرخ‌های کران‌دار در بازه‌ی [۰,۱] مانند نرخ معیوب، نرخ مرجوعی و دقت بازرسی، با توزیع بتا[۱] مدل شده‌اند که انتخابی استاندارد و انعطاف‌پذیر برای نسبت‌های تصادفی است [۱۰]. سایر پارامترها نیز به‌گونه‌ای تعیین‌شده‌اند که یک سناریوی عددی کالیبره شده برای یک محصول لبنی فصلی را بازنمایی کنند؛ به این معنا که هدف اصلی مثال، نمایش رفتار مدل و استخراج بینش‌های مدیریتی است، نه برازش دقیق به یک بنگاه خاص. بنابراین، در کاربردهای عملی، برای هر کالای مشخص لازم است پارامترهای تقاضا و فسادپذیری بر اساس داده‌های تجربی همان صنعت تنظیم و کالیبره شوند.

جدول ۲- جدول مثال عددی

نماد	مقدار	نماد	مقدار	نماد	مقدار	نماد	مقدار	نماد	مقدار	نماد	مقدار

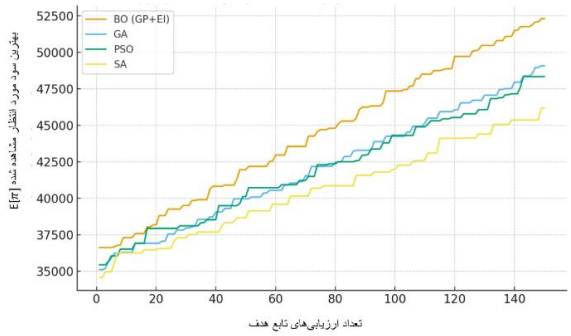
[۱] Beta

توزیع D_1	$N(400,30^2)$	C_{return}	۳	P	۱۲۰	C_f	۲۸	C_r	٤٠
توزیع r	Beta(۱/۵و۸/۵)	ϕ_{min}	۰/۵	C_d	۵	ψ	۲	v_S	۲۵
توزیع S_e	Beta(۹۷و۳)	C_{back}	۱	C_{dis}	٦	Ψ_e	۵	s_F	۰/٦
توزیع S_p	Beta(۹۸و۲)	K_{back}	۱۰۰	h	۱۰	δ_{RL}	۰/۵	η	۰/۹۵
توزیع D_2	$N(300,15^2)$	C_{ship}	۱/۵	C_t	۳۲	λ	۰/۸	C_u	۵۰
توزیع ρ_1	Beta(۸و۹۲)	cap_{share}	۰/۸	τ	۰/۸۵	P_{rec}	۱۵	s_B	۰/٤
توزیع ρ_2	Beta(٦و۹۲)	κ, γ	۰/٦ و ۰/۹						

برای حل این مثال عددی و یافتن سیاست بهینه $(Q^*, \alpha_1^*, \alpha_2^*, \delta^*)$ از چارچوب شبیه‌سازی–بهینه‌سازی مبتنی بر مونت‌کارلو و بهینه‌سازی بیزی استفاده می‌شود که در بخش ۳–۳ به‌تفصیل تشریح شده است.

۴–۲– مقایسه‌ی روش حل پیشنهادی با الگوریتم‌های فرا ابتکاری

به دلیل پرهزینه بودن هر ارزیابی تابع سود در محیط شبیه‌سازی (همان‌گونه که در بخش ۳–۳ توضیح داده شد)، بررسی کارایی محاسباتی روش حل یک ضرورت روش‌شناختی است. ازاین‌رو، در این مثال عددی، عملکرد روش پیشنهادی بهینه‌سازی بیزی (BO) با سه الگوریتم فرا ابتکاری استاندارد، یعنی الگوریتم ژنتیک(Ga)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و شبیه‌سازی تبرید (SA) مقایسه شده است.



شکل ۱– نمودار همگرایی BO در مقایسه با SA/GA/PSO

نمودار ۱، همگرایی BO را در مقایسه با PSO، GA و SA (به‌صورت بهترین سود مشاهده‌شده برحسب تعداد ارزیابی تابع هدف) نشان می‌دهد. نتایج به‌وضوح دو برتری کلیدی BO را نشان می‌دهد:

کیفیت برتر راه‌حل: در پایان بودجه محاسباتی تخصیص‌یافته، الگوریتم BO به‌طور قابل‌توجهی به راه‌حل بهتری (سود نهایی حدود ۵۲,۵۰۰) دست‌یافته است. این در حالی است که بهترین الگوریتم رقیب (GA) در سودی حدود ٤۹,۰۰۰ متوقف‌شده است.

کارایی و سرعت همگرایی :روش BO نه‌تنها به جواب نهایی بهتری می‌رسد، بلکه بسیار سریع‌تر به راه‌حل‌های باکیفیت همگرا می‌شود و منحنی آن تقریباً در تمام طول فرآیند بالاتر از سایر الگوریتم‌ها قرار دارد.

این مقایسه تأیید می‌کند که انتخاب رویکرد BO برای این مسئله، به دلیل پیچیدگی مدل و پرهزینه بودن ارزیابی تابع سود، از منظر کارایی محاسباتی و کیفیت راه‌حل انتخاب مناسبی است.

۴-۳- یافته‌های پژوهش

نتایج مقایسه سیاست پایه (با جایگزینی) و سناریوی ضد واقع (بدون جایگزینی) در جدول ۳ نشان می‌دهد که فعال‌سازی مکانیسم جایگزینی، هم سیاست بهینه و هم نتایج عملکردی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌دهد:

۱- بهبود سه‌گانه: استراتژی جایگزینی منجر به بهبود هم‌زمان سه شاخص کلیدی می‌شود: سود انتظاری ٪۱٤/۳ افزایش می‌یابد، کمبود انتظاری ٪۲۷/۹ کاهش(بهبود سطح خدمت)، و ضایعات انتظاری ٪۲۰/۷ کاهش می‌یابد (افزایش کارایی استفاده از موجودی).

۲- تغییر سیاست تصمیم: به علت ریسک پوشانی[۱] ناشی از جایگزینی ، خرده‌فروش می‌تواند سیاست تهاجمی‌تری اتخاذ کند: مقدار سفارش Q^* از ۷۰۰ به ۷۲۰ واحد افزایش می‌یابد و آستانه پذیرش خرابی α_1^* نیز از ۰/۱٤ به ۰/۱۷ افزایش می‌یابد.

[۱] Risk Hedging

۳- تغییر رفتار استراتژیک: در سیاست بهینه، احتمال بازگشت کامل (انحلال قرارداد) تقریباً به صفر می‌رسد(۰/۰۰۱)، درحالی‌که احتمال استفاده از جایگزینی بسیار بالا است(۰/۷۵۹). این نشان‌دهنده ترجیح قوی مدل برای انعطاف‌پذیری است.

٤- بهینه‌سازی تخفیف: نرخ تخفیف بهینه در سناریوی پایه کمتر است (۰/۱۸ در مقابل ۰/۲۰) .زیرا فروش کالاهای تازه‌ی جایگزین‌شده، نیاز به تخفیف‌های عمیق برای تسویه موجودی قدیمی را کاهش می‌دهد.

جدول ۳- نتایج سناریو پایه با و بدون استراتژی جایگزینی

شاخص	سیاست	پایه	ضد واقع
تصمیمات بهینه	مقدار سفارش بهینه Q^*	۷۲۰	۷۰۰
	آستانه پذیرش پایین α_1^*	۰/۱۷	۰/۱٤
	آستانه بازگشت α_2^*	۰/۷٤	–
	تخفیف نیم‌فصل دوم δ^*	۰/۱۸	۰/۲
نتایج عملکردی	سود $E_{[\pi]}$	٤٥٦۰۹	۳۹۹۰۰
	فاصله اطمینان ٪۹۵ سود	[٤٤۷۰۰،٤٦٤٥۰]	[۳۸۹۰۰،٤۰۸٥۰]
	احتمال نگه‌داشتن $\rho_r[keep]$	۰/۲٤	۰/٤٤
	احتمال جایگزینی $\rho_r[repl]$	۰/۷٥۹	–
	احتمال بازگشت $\rho_r[return]$	۰/۰۰۱	۰/٥٦
	میانگین فروش $E[sales]$	٦۲۸	٥۹۰
	میانگین کمبود $E[shortage]$	۱۰۱	۱٤۰
	میانگین ضایعات $E[waste]$	۷۳	۹۲
	فروش تازه فاز ۲ (از جایگزینی) $E[S_2^{new}]$	۲۱۰	–
	فروش قدیمی تخفیفی در فاز ۲ $E[S_2^{old}]$	۱۸۰	–

۴-۴- اعتبارسنجی مدل

در این بخش، اعتبار نتایج مدل از سه جنبه‌ی مکمل بررسی می‌شود:

اعتبارسنجی آماری خروجی شبیه‌سازی: برای اطمینان از این‌که بهبودهای مشاهده‌شده ناشی از نویز شبیه‌سازی نیستند، اختلاف سود، کمبود و ضایعات بین سیاست‌های «با جایگزینی» و «بدون جایگزینی» در سناریوی پایه با استفاده از شبیه‌سازی با تعداد نمونه‌ی بالا، محاسبه‌ی فاصله‌های اطمینان ٪۹۵و آزمون t جفتی بررسی‌شده است (پیوست

الف).مقادیر بسیار کوچک ($p<0.001$) و اندازه اثر بزرگ (Cohen's d=۰/۸۵) نشان می‌دهد که تفاوت‌های مشاهده‌شده در شاخص‌های عملکردی ازنظر آماری کاملاً معنادارند و صرفاً حاصل نوسانات تصادفی نیستند.

اعتبارسنجی قراردادی (قید مشارکت تأمین‌کننده-IR): برای ارزیابی پایداری قرارداد، قید مشارکت تأمین‌کننده (IR) موردبررسی قرارگرفته است. جدول ۳ سود انتظاری تأمین‌کننده را در دو سناریوی «جایگزینی» و «بازگشت کامل» نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که سود تأمین‌کننده در سناریوی جایگزینی حدود ٪۶/۲ بالاتر از سناریوی بازگشت کامل است؛ بنابراین سیاست بهینه‌ی θ^* نه‌تنها برای خرده‌فروش سودآور است، بلکه از منظر تأمین‌کننده نیز جذاب و انگیزه‌بخش بوده و قرارداد حاصل، از دید هر دو طرف پایدار تلقی می‌شود .

جدول ۴-سود تأمین‌کننده (جایگزینی در برابر بازگشت در سناریو پایه)

شاخص	جایگزینی	بازگشت
$E[\pi^s]$	۱۳۲۲۰	۱۲۴۵۰
تفاوت جایگزینی با بازگشت	+٪۶/۲	–

اعتبارسنجی ساختاری و منطقی: قوی‌ترین آزمون ساختاری، بررسی رفتار مدل در حالت‌های حدی نرخ معیوب ورودی r است. جدول ۵ نتایج دو حالت افراطی را نشان می‌دهد:

حالت $r=0$ (کیفیت کامل) : مدل به‌درستی تصمیم «نگه‌داشتن» را با احتمال ۱ انتخاب می‌کند و به یک مدل فروش دومرحله‌ای استاندارد بدون عیب فرومی‌ریزد.

حالت $r=1$ (همه معیوب): مدل به‌درستی تصمیم «بازگشت کامل» را با احتمال ۱ برمی‌گزیند و فروش صفر همراه با کمبود کامل رخ می‌دهد.

جدول ۵- اعتبارسنجی حدی مدل بر اساس نرخ معیوب ورودی(r)

حالت حدی	r	مسیر تصمیم	ρ_{keep}	ρ_{rep}	ρ_{ret}	E[Sale]	E[Shortage]	E[waste]
کیفیت کامل	۰	Keep	۱	۰	۰	۵۹۹/۴۴	۱۰۰/۵۶	۱۰۶/۱۶
همه معیوب	۱	Return	۰	۰	۱	۰	۷۰۰	۰

ترکیب اعتبارسنجی آماری، قراردادی و ساختاری نشان می‌دهد که نتایج مدل هم ازنظر آماری پایدارند، هم با منطق اقتصادی و رفتاری سازگارند و هم از منظر پایداری قرارداد برای هر دو طرف زنجیره تأمین قابل‌اتکا هستند؛ بنابراین می‌توان از آن‌ها به‌عنوان مبنایی معتبر برای توصیه‌های مدیریتی استفاده کرد.

۴-۵- تحلیل حساسیت (بینش‌های مدیریتی)

به‌منظور ارزیابی پایداری مدل و شناسایی تأثیرگذارترین پارامترها، یک تحلیل حساسیت جامع (تغییر $\mp ۱۰٪$ پارامترها) انجام شد.(جدول در پیوست ب) پنج بینش مدیریتی کلیدی حاصل از این تحلیل عبارت‌اند از:

- حساسیت شدید به پارامترهای اقتصادی: سود انتظاری بیشترین حساسیت را به قیمت فروش و هزینه خرید دارد. تغییر ده‌درصدی در قیمت باعث نوسان تا ۱۰/۲٪ در سود می‌شود، که نشان‌دهنده وابستگی شدید سودآوری به مدیریت حاشیه‌ی سود واحد است.
- حساسیت به تقاضا :مدل به تغییرات در میانگین تقاضای مرحله اول بسیار حساس است (افزایش ۱۰٪ تقاضا، سود را ۷/٤٪ افزایش می‌دهد).
- توازن هزینه‌ها در سیاست‌گذاری :رفتار مدل منطق توازن را نشان می‌دهد. افزایش هزینه کمبود (C_u)منجر به سیاست تهاجمی‌تر (افزایش Q^*) می‌شود. در مقابل، افزایش هزینه دفع (C_d) منجر به سیاست محتاطانه‌تر(تخفیف بیشتر δ^* و کاهش Q^*) می‌گردد.
- نقش پارامترهای لجستیکی :بهبود پارامترهای مرتبط با جایگزینی(τ,η و cap_{share}) همگی تأثیرات مثبت و قابل‌توجهی بر سود دارند (تا ٦/٥٪+)، که ارزش بالای سرمایه‌گذاری در بهبود زیرساخت لجستیکی جایگزینی را نشان می‌دهد.
- حساسیت به عدم قطعیت (واریانس) :کاهش واریانس تقاضا (کاهش عدم قطعیت) تأثیر مثبت قابل‌توجهی بر سود دارد (٣/٦٪+). این نشان می‌دهد که ثبات و پایداری تقاضا برای سیستم ارزش بالایی دارد.

۴-۶- تحلیل استحکام و سناریوهای بحرانی

برای ارزیابی استحکام مدل و ارزش استراتژیک مکانیسم جایگزینی، شش سناریوی چندوجهی (S_1 تا S_6) شامل شوک ارزی، اختلال لجستیکی/تحریم، سقف قیمتی، رکود تقاضا و سخت‌گیری‌های زیست‌محیطی طراحی و شبیه‌سازی شده است. شدت شوک‌ها به صورت تغییرات نسبی ۱۰ تا ۳۰ درصدی اعمال شده است. دو شاخص «مزیت نسبی سود با جایگزینی» (Δ_S) و «نسبت سود سناریو به حالت پایه» (R_S) تعریف شدند. نتایج نشان می‌دهد در همه سناریوها Δ_S مثبت و بین ١٦٪ تا بیش از ٢٤٪ است؛ یعنی سیاست «با جایگزینی» همواره سود بیشتری نسبت به سیاست مرجع «بدون جایگزینی» دارد. همچنین R_S نشان می‌دهد

سود سیاست پیشنهادی در شرایط بحرانی کاهش می‌یابد اما در محدوده قابل قبول باقی می‌ماند. یافته‌های خاص: (۱) در شوک هزینه و لجستیک (S_1، S_2)، مزیت جایگزینی افزایش می‌یابد. (۲) در سقف قیمتی و سخت‌گیری پسماند (S_3، S_5)، کاهش ضایعات حاشیه سود را حفظ می‌کند. (۳) در رکود تقاضا (S_4)، مزیت نسبی بیشتری ایجاد می‌شود. (٤) در سناریوی ترکیبی بدبینانه (S_6) سود سیاست پیشنهادی تقریباً هم‌سطح سود مدل سنتی در حالت پایه می‌ماند. در مجموع، سیاست سه‌حالته پیشنهادی با مکانیسم جایگزینی، هم در حالت پایه و هم تحت شوک‌های چندگانه، پایدارتر و تاب‌آورتر از سیاست مرجع است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی سیاست سفارش‌دهی محصولات فصلی تحت ریسک کیفیت و تاریخ انقضا، از چارچوب‌های سنتی دودویی فراتر رفته و یک سیاست سه‌حالته (نگه‌داشتن، جایگزینی، بازگشت) ارائه کرده است. نوآوری اصلی، معرفی مکانیسم «جایگزینی» در محیطی با تقاضای تصادفی است که پنج واقعیت کلیدی بازار (عیوب ورودی، خطای بازرسی، مرجوعی مشتری، فروش دوکاناله و تخفیف) را هم‌زمان مدل می‌کند. به دلیل غیرخطی و غیرمشتق‌پذیر بودن تابع سود، از رویکرد ترکیبی **شبیه‌سازی مونت‌کارلو–بهینه‌سازی بیزی استفاده شد که در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری رایج (GA, PSO, SA)، عملکرد بهتری از نظر کیفیت جواب و کارایی محاسباتی داشت. از منظر اقتصادی، فعال‌سازی مکانیسم جایگزینی نسبت به سیاست مرجع منجر به بهبود همزمان شاخص‌ها می‌شود: سود خرده‌فروش حدود ۱٤.۳٪ و سود تأمین‌کننده حدود ٦.۲٪ افزایش می‌یابد، در حالی که کمبود و ضایعات به طور معناداری کاهش می‌یابند. این نتایج نشان‌دهنده شکل‌گیری وضعیت برد–برد پایدار است و تأیید می‌کند که جایگزینی سقف‌دار به جای انتقال ریسک بین طرفین، ریسک را در سطح زنجیره تعدیل و بازتوزیع می‌کند.

تحلیل سناریوهای بحرانی (شوک‌های هزینه‌ای، اختلالات لجستیکی، سقف قیمتی، رکود تقاضا و سناریوی ترکیبی بدبینانه) نشان داد سیاست پیشنهادی در تمام حالات، مزیت سودآوری خود را نسبت به سیاست بدون جایگزینی حفظ می‌کند و در بدبینانه‌ترین سناریو نیز سودی نزدیک به سطح پایه‌ی مدل سنتی ایجاد می‌کند؛ بنابراین، مکانیسم جایگزینی در شرایط عدم قطعیت بالا فراتر از یک ابزار صرفاً عملیاتی، به‌عنوان اهرمی مؤثر برای پوشش ریسک ظاهر

می‌شود. در سطح تک‌پارامترها نیز، نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که هرچند «هزینه‌ی خرید» و «قیمت فروش» بیشترین تأثیر را بر حاشیه سود و مقدار سفارش دارند، متغیرهای عملیاتی نظیر «کارایی جایگزینی» و «دقت بازرسی» مستقیماً سطح کمبود و ضایعات را کنترل می‌کنند. این الگوی اثرگذاری با ساختار نظری مدل سه‌حالته و آستانه‌های تصمیم‌گیری (α_1وα_2) سازگار است و تأیید می‌کند که مکانیسم‌های طراحی‌شده در سطح عددی، رفتاری منطقی و قابل‌انتظار دارند. از منظر مقایسه با ادبیات، جهت اثرات به‌دست‌آمده در این پژوهش با مطالعات حوزه کیفیت ناقص و بازرسی خطادار هم‌خوان است؛ برای نمونه، هسیو و هسیو(۲۰۱۳) بر اثر تعیین‌کننده دقت بازرسی و مرجوعی بر سیاست‌های سفارش و عملکرد اقتصادی تأکید دارند و خان و حسین(۲۰۱۹) نشان می‌دهند افزودن گزینه‌های مواجهه با اقلام نامنطبق (تعمیریا جایگزینی) ساختار تصمیم بهینه را تغییر می‌دهد. همچنین در ادبیات محصولات کوتاه‌عمر، چن و ساپرا (۲۰۱۳) و نیز چن وهمکاران (۲۰۲۰) و ژو وهمکاران (۲۰۲۳) نقش تصمیم‌های چنددوره‌ای و تنظیم میان‌فصل را در بهبود موازنه کمبود-ضایعات برجسته می‌کنند. یافته‌های پژوهش حاضر با این منطق هم‌راستا است، با این تمایز که در مدل حاضر، «تنظیم میان‌فصل» در پیوند با بازرسی خطادار، مرجوعی و جایگزینی سقف‌دار و در قالب یک سیاست سه‌حالته، به‌صورت یکپارچه صورت‌بندی شده است. در نهایت، هم‌راستا با ادبیات تولید-موجودی و مدل‌های با تقاضای تصادفی پیچیده (مانند بودانیا و میشرا(۲۰۲۵)؛ لیائو و همکاران(۲۰۲۰)؛تیواری و همکاران(۲۰۲۲)؛ پال و ماهاپترا(۲۰۱۷) و سکار و همکاران(۲۰۲۳))، نتایج نشان می‌دهند که وجود مکانیسم‌های اصلاحی عملکرد سیستم را بهبود می‌دهد؛ اما تفاوت تعیین‌کننده پژوهش حاضر در محل مداخله است: اصلاح و تصمیم‌گیری در مدل حاضر، در سطح خرده‌فروش و دقیقاً در طول فصل (بر اساس آستانه‌های کیفیت) رخ می‌دهد، نه صرفاً در سطح نرخ تولید یا چرخه‌های تأمین بلندمدت. بر اساس این یافته‌ها، توصیه‌های اجرایی زیر برای مدیران خرید و زنجیره تأمین قابل‌ارائه است:

- **گذار به قراردادهای هوشمند** :مدیران باید از قراردادهای سنتی مبتنی بر «بازگشت کامل» فاصله گرفته و به سمت قراردادهای حاوی مکانیسم جایگزینی سقف دار حرکت کنند. در این قراردادها لازم است سقف جایگزینی، مهلت زمانی تحویل و سازوکار بازپرداخت متغیر

بر اساس کیفیت تأییدشده، به‌صراحت تعریف شود تا از رفتارهای فرصت‌طلبانه جلوگیری گردد.

- **سرمایه‌گذاری بر کیفیت و لجستیک :**به‌جای تمرکز صرف بر کاهش هزینه‌ی خرید اولیه، بخشی از بودجه باید به ارتقای فناوری‌های بازرسی (افزایش S_e وS_P)،چابکی لجستیک جایگزینی اختصاص یابد؛ این کار در بلندمدت نیاز به تخفیف‌های ناخواسته و حراج‌های سنگین برای موجودی نزدیک به انقضا را کاهش می‌دهد.
- **سیاست‌گذاری یکپارچه :**تصمیمات نباید به‌صورت جداگانه اتخاذ شوند؛ نرخ تخفیف، مقدار سفارش و آستانه‌های پذیرش کیفیت باید به‌صورت هم‌زمان تنظیم شوند تا ضمن مدیریت ریسک مازاد موجودی، حاشیه سود نیز حفظ گردد.
- **انعطاف در بحران :**در مواجهه با شوک‌های کلان اقتصادی یا اختلالات زنجیره تأمین، توصیه می‌شود سخت‌گیری سیاست‌ها (به‌عنوان‌مثال آستانه‌های کیفیت) به‌صورت کنترل‌شده تعدیل‌شده و با هر تغییر معنادار در ساختار هزینه‌ها، مدل محاسباتی مجدداً اجرا شود تا سیاست‌ها با شرایط جدید بازار منطبق بمانند.

پژوهش حاضر دارای چند محدودیت است که جهت‌گیری پژوهش‌های آتی را مشخص می‌کند. نخست، تاریخ انقضا به‌صورت دو فاز گسسته (تازه و نزدیک به انقضا) مدل شده است؛ توسعه به سمت نرخ زوال پیوسته و متغیر در زمان برای کالاهای بسیار فسادپذیر پیشنهاد می‌شود. دوم، از توزیع‌های نسبتاً ساده (نرمال و بتا) استفاده شده است؛ به کارگیری توزیع‌های پیچیده‌تر مانند دنباله سنگین یا توزیع‌های مبتنی بر داده‌های واقعی، دقت مدل را افزایش می‌دهد. سوم، مدل در چارچوب زنجیره تأمین دوسطحی (یک خرده‌فروش–یک تأمین‌کننده) بدون رقابت فرموله شده است؛ ترکیب با نظریه بازی‌ها و لحاظ واکنش رقبا مسیر مهمی برای آینده است. چهارم، تمرکز بر متغیرهای موجودی، کیفیت و تخفیف بوده است؛ ادغام متغیرهای بازاریابی و چیدمان قفسه می‌تواند دیدگاه جامع‌تری ارائه دهد. پنجم، سناریوهای بحرانی (از جمله شوک ارزی) بر مبنای محصول لبنی فصلی و ساختار هزینه‌ای ارزبنیان کالیبره شده‌اند؛ تعمیم کمی نتایج به سایر صنایع نیازمند تنظیم پارامترها و مطالعات موردی تکمیلی است که به‌عنوان فرصتی برای کارهای آتی برجسته شده است.

به طور خلاصه، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که برای خرده‌فروشان کالاهای فصلی فسادپذیر، استفاده از قاعده سه‌حالته با مکانیسم جایگزینی سقف‌دار به جای سیاست‌های سنتی دودویی (پذیرش یا بازگشت کامل) می‌تواند هم‌زمان سود مورد انتظار را افزایش، کمبود و ضایعات را کاهش و خطر انحلال قرارداد را کم کند. برای تأمین‌کننده نیز این سازوکار، به جای تحمیل زیان‌های سنگین بازخرید کامل، زمینه مشارکت پایدار و تقسیم منصفانه منافع را فراهم می‌آورد. بنابراین اجرای سیاست‌های پیشنهادی، هم از نظر تحلیلی و هم از منظر تصمیم‌گیری عملی مدیران زنجیره تأمین، دارای منفعت مستقیم و قابل‌سنجش است.

۶- منابع

[۱] Zhou H, Chen K, Wang S. Two-period pricing and inventory decisions of perishable products with partial lost sales. Eur J Oper Res. ۲۰۲۳;۳۱۰(۲):۶۱۱–۲۶. Https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.ejor.۲۰۲۳,۰۳,۰۱۰

[۲] Moussawi-Haidar, L., Salameh, M., & Nasr, W. (۲۰۱٤). Effect of deterioration on the instantaneous replenishment model with imperfect quality items. Applied Mathematical Modelling, ۳۸(۲٤), ٥۹٥٦-٥۹٦٦. Https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.apm.۲۰۱٤,۰٥,۰۰۳

[۳] Gautam P, Maheshwari S, Kausar A, Jaggi CK. Inventory models for imperfect quality items: a two-decade review. Adv Interdiscip Res Eng Bus Manag. ۲۰۲۱;۱۸٥–۲۱٥. Https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۹۸۱-۱٦-۰۰۳۷-۱_۱٦

[٤] Khan, M., Ahmad, A. R., & Hussain, M. (۲۰۱۹). Integrated decision models for a vendor–buyer supply chain with inspection errors and purchase and repair options. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ۱۰٤(۹), ۳۲۲۱-۳۲۲۸ Https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۱۷۰-۰۱۷-۱۱۳۷-۹

[٥] Hsu JT, Hsu LF. An EOQ model with imperfect quality items, inspection errors, shortage backordering, and sales returns. Int J Prod Econ. ۲۰۱۳;۱٤۳(۱) Https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.ijpe.۲۰۱۲,۱۲,۰۲٥

[٦] Khan M, Jaber MY, Guiffrida AL, Zolfaghari S. A review of the extensions of a modified EOQ model for imperfect quality items. Int J Prod Econ. ۲۰۱۱;۱۳۲(۱):۱–۱۲. Https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.ijpe.۲۰۱۱,۰۳,۰۰۹

[۷] Jaggi CK, Mittal M. Economic order quantity model for deteriorating items with imperfect quality. Investig Operacional. ۲۰۱۱;۳۲(۲):۱۰۷–۱۳. Https://doi.org/۱۰,٥۲٦۷/j.ijiec.۲۰۱۰,۰۷,۰۰۳

[۸] Sekar T, Uthayakumar R, Mythuradevi P. Three levels of sustainable production inventory model for defective and deteriorating items with rework under marketplace selling price. International Journal of Applied Operational Research.۲۰–۱:(۲)۱۱;۲۰۲۳ . Https://doi.org/۱۰,۷۱۸۸٥/ijorlu-۲۰۲۳-۱-٦۱۷

[۹] Liao JJ, Huang KN, Chung KJ, Lin SD, Chuang ST, Srivastava HM. Optimal ordering policy in an economic order quantity (EOQ) model for non-instantaneous deteriorating items with defective quality and permissible delay in payments. Rev la Real Acad Ciencias

Exactas, Físicas y Nat Ser A Matemáticas. ۲۰۲۰;۱۱۴:۱–۲۶. Https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۳۳۹۸-۰۱۹-۰۰۷۷۷-۳

[۱۰] Bhavani, G. D., Georgise, F. B., Mahapatra, G. S., & Maneckshaw, B. (۲۰۲۲). Neutrosophic cost pattern of inventory system with novel demand incorporating deterioration and discount on defective items using particle swarm algorithm. Computational Intelligence and Neuroscience, ۲۰۲۲(۱), ۷۶۸۳۴۱۷. Https://doi.org/۱۰,۱۱۵۵/۲۰۲۲/۷۶۸۳۴۱

[۱۱] Tiwari, S., Cárdenas-Barrón, L. E., Malik, A. I., & Jaggi, C. K. (۲۰۲۲). Retailer's credit and inventory decisions for imperfect quality and deteriorating items under two-level trade credit. Computers & Operations Research, ۱۳۸, ۱۰۵۶۱۷. Https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.cor.۲۰۲۱,۱۰۵۶۱۷

[۱۲] Cárdenas-Barrón, L. E., Plaza-Makowsky, M. J. L., Sevilla-Roca, M. A., Núñez-Baumert, J. M., & Mandal, B. (۲۰۲۱). An inventory model for imperfect quality products with rework, distinct holding costs, and nonlinear demand dependent on price. Mathematics, ۹(۱۲), ۱۳۶۲. Https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/math۹۱۲۱۳۶۲

[۱۳] Lok YW, Supadi SS, Wong K Bin. EOQ models for imperfect items under time varying demand rate. Processes. ۲۰۲۲;۱۰(۶):۱۲۲۰. Https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/pr۱۰۰۶۱۲۲۰

[۱۴] Jafari Eskandari, M., Ebrahimi, R., & Molaei, E. (۲۰۱۷). A fuzzy multi-product production–inventory model with shortage, rework, and limited production rate, storage space and capital, solved by metaheuristic algorithms. Journal of modern research in decision making, ۲(۴), ۸۱–۱۰۴. (In Persian)

[۱۵] Barman, D., & Mahata, G. C. (۲۰۲۲). Two-echelon production inventory model with imperfect quality items with ordering cost reduction depending on controllable lead time. International Journal of System Assurance Engineering and Management, ۱۳(۵), ۲۶۵۶-۲۶۷۱. Https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۳۱۹۸-۰۲۲-۰۱۷۲۲-۱

[۱۶] Alamri OA, Lamba NK, Jayaswal MK, Mittal M. A sustainable inventory model with advertisement effort for imperfect quality items under learning in fuzzy monsoon demand. Mathematics. ۲۰۲۴;۱۲(۱۵):۲۴۳۲. Https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/math۱۲۱۵۲۴۳۲

[۱۷] Pal, S., & Mahapatra, G. S. (۲۰۱۷). A manufacturing-oriented supply chain model for imperfect quality with inspection errors, stochastic demand under rework and shortages. Computers & Industrial Engineering, ۱۰۶, ۲۹۹-۳۱۴. Https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.cie.۲۰۱۷,۰۲,۰۰۳

[۱۸] Budania M, Mishra NK. Inventory Model for Defective and Deteriorating Items With Two Production Rates, Stochastic Demand, and Payment Delay Within A Finite Horizon. Malaysian J Math Sci. ۲۰۲۵;۱۹(۱). Https://doi.org ۱۰,۴۷۸۳۶/mjms.۱۹,۱,۰۸

[۱۹] Dhaiban, A. K. (۲۰۲۰). An optimal production policy of stochastic inventory system with and without lost sales. Int. J. Inform. Manag. Sci, ۳۱, ۳۵۳-۳۷۴.Https://doi.org ۱۰,۶۱۸۶/IJIMS.۲۰۲۰۱۲

[۲۰] Bhowmick J, Samanta GP. Optimal inventory policies for imperfect inventory with price dependent stochastic demand and partially backlogged shortages. YUJOR. ۲۰۱۲;۲۲(۲):۱۹۹–۲۲۳. Https://doi.org ۱۰,۲۲۹۸/YJOR۱۰۱۰۱۱۰۰۷B

[۲۱] Chen L, Sapra A. Joint inventory and pricing decisions for perishable products with two-period lifetime. Nav Res Logist. ۲۰۱۳;۶۰(۵):۳۴۳–۶۶. Https://doi.org ۱۰,۱۰۰۲/nav.۲۱۵۳۸

[۲۲] Chen, K., Xiao, T., Wang, S., & Lei, D. (۲۰۲۱). Inventory strategies for perishable

products with two-period shelf-life and lost sales. International Journal of Production Research, ٥٩(١٧), ٥٣٠١-٥٣٢٠. Https://doi.org ١٠,١٠٨٠/٠٠٢٠٧٥٤٣,٢٠٢٠,١٧٧٧٤٨٠

[٢٣] Liao, C., & Lu, Q. (٢٠٢٢). Coordinating a Three-Level Fresh Agricultural Product Supply Chain considering Option Contract under Spot Price Uncertainty. Discrete Dynamics in Nature and Society, ٢٠٢٢(١), ٢٩٩١٢٤١. Https://doi.org ١٠,١١٥٥/٢٠٢٢/٢٩٩١٢٤١

[٢٤] Song Z, He S. Contract coordination of new fresh produce three-layer supply chain. Ind Manag Data Syst. ٢٠١٩; Https://doi.org ١٠,١١٠٨/IMDS-١٢-٢٠١٧-٠٥٥٩

[٢٥] Amouzad Mahdiraji, H., Modarres Yazdi, M., Mohaghar, A., & Jafarnejad, A. (٢٠١٤). Designing a cooperative model for three-echelon unlimited supply chains: A cooperative game theory approach. Management Research in Iran, ١٨(١), ١٧١–١٩١. (In Persian)

[٢٦] Ahmadi E, Masel DT, Hostetler S, Maihami R, Ghalehkhondabi I. A centralized stochastic inventory control model for perishable products considering age-dependent purchase price and lead time. Top. ٢٠٢٠;٢٨(١):٢٣١–٦٩. Https://doi.org ١٠,١٠٠٧/s١١٧٥٠-٠١٩-٠٠٥٣٣-١

[٢٧] Efrilianda DA, Rahman MKA. A Periodic Review Inventory Control of Medicine at Hospital. J Adv Inf Syst Technol. ٢٠٢٤;٦(١):١٩–٢٧. Https://doi.org ١٠,١٥٢٩٤/jaist.v٦i١,٥٩٥٤

[٢٨] Islam MM, Khan AM, Khan MMR. Minimization of reworks in quality and productivity improvement in the apparel industry. Int J Eng. ٢٠١٣;١(٤):٢٣٠٥–٨٢٦٩.

[٢٩] Azimi, P., & Sajjadi, S. K. (٢٠١٤). Optimizing the number of bank branch equipments using simulation and simulated annealing. Management Research in Iran, ١٨(٤), ٦٥–٨٦. (In Persian)

[٣٠] Mohammadi Balani, A., Dehghan Niri, M., & Taghizadeh Yazdi, M. R. (٢٠٢٣). Modeling the supply strategy of gas turbine spare parts using a simulation-based optimization approach. Journal of modern research in decision making, ٨(٢), ٤٧–٧٠(In Persian)