چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شماره ۱۸ ـ تابستان ۱۳۹۴
ص‌ص ۶۲ – ۳۳

انتخاب استراتژی‌های بازاریابی زنجیره تأمین در شرایط انتشار عدم‌قطعیت

علی اکبر حسنی*

چکیده

در این مقاله، یک زنجیره تأمین حلقه بسته با هدف پاسخگویی به تقاضای مشتریان و ارائه خدمات پس‌ازفروش با حداکثر سود ممکن بررسی شده است. عدم‌قطعیت پارامترهای تقاضای مشتریان و ظرفیت تسهیلات از طریق تابع توزیع احتمال پیوسته در مدل اعمال شده و مسئله به روش برنامه‌ریزی تصادفی و در غالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط، فرمول‌بندی شده است؛ علاوه بر آن انتشار عدم‌قطعیت بین سطوح زنجیره تأمین در نظر گرفته شده و تأثیر آن بر سطح پاسخگویی به تقاضای مشتریان نیز ارزیابی شده است. همچنین، امکان انتخاب بهترین استراتژی بازاریابی برای زنجیره تأمین و ایجاد یک جریان قابل‌اطمینان در طی دوره برنامه‌ریزی لحاظ شده است. مدل ارائه‌شده با استفاده از یک الگوریتم ممتیک مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک و جست‌وجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر حل شده است. کارایی الگوریتم حل با مقایسه عملکرد آن با دو الگوریتم فراابتکاری دیگر ارزیابی شده است. مدل و روش حل ارائه‌شده برای یک مسئله نمونه در صنعت تولید موتور خودرو اجرا شده است؛ درنهایت مجموعه‌ای از توصیه‌های مدیریتی با توجه به تحلیل نتایج و یافته‌های تحقیق پیرامون همبستگی و تأثیرات متقابل استراتژی‌های بازاریابی مدنظر ارائه شده است. نتایج، حاکی از تأثیر چشمگیر انتشار عدم‌قطعیت بر برنامه‌ریزی در سطح زنجیره تأمین و عملکرد و اندرکنش متفاوت هر یک از استراتژی‌های بازاریابی مدنظر است.

کلیدواژه‌ها: انتخاب استراتژی بازاریابی؛ انتشار عدم قطعیت؛ الگوریتم ممتیک.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۳/۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۶/۷.

* استادیار، دانشگاه شاهرود (نویسنده مسئول).

E-mail: aa.hasani@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه تحت‌تأثیر فضای رقابتی کسب‌وکار، محصولات ارائه‌شده توسط رقبا بیش از گذشته از جنبه‌های قیمت و کیفیت به یکدیگر نزدیک شده‌اند. در چنین بازار رقابتی به‌منظور ایجاد تمایز نسبت به رقبا و ارتقای مزیت‌های رقابتی، ارائه خدمات پس‌ازفروش به مشتریان می‌تواند توسط شرکت‌ها در نظر گرفته شود [۲]. در یک بازار رقابتی با کالای تقریباً مشابه و همگن از نظر کیفیت و قیمت، مشتریان تمایل به خرید محصول از شرکت ارائه‌دهنده خدمات بهتر را دارند. این استراتژی بازاریابی برای تولیدکنندگان پیشگام در یک بازار حائزاهمیت است. برای نمونه «شرکت رولز-رویس» موتورهای جت را برای شرکت‌های هواپیمایی به همراه خدمات نگهداری و تعمیرات برای یک دوره چندساله ارائه می‌کند [۳]. در بازار محصولات رایانه‌ای به‌عنوان نمونه‌ای از محصولات با فناوری بالا، شرکت‌ها خدمات پس از فروش گسترده‌ای را به مشتریان در ازای خرید محصولات آنان، ارائه می‌نماید [۴]. مشتریان در صورت پرداخت هزینه مازاد می‌توانند این خدمات را در سطح بالاتر نظیر دوره پوشش زمانی طولانی‌تر دریافت کنند. شرکت‌های خودروسازی نیز محصولات خود را برای یک بازه زمانی و یا میزان کارکرد مشخص خدمات پس از فروش کرده و مجموعه‌ای از خدمات شامل ارائه قطعات یدکی و تعمیر را به مشتریان خود ارائه می‌دهند [۴]. در گذشته، خدمات پس‌ازفروش، یک منبع هزینه‌زا برای شرکت‌ها تلقی می‌شد؛ اما امروزه نگاه‌ها به آن تغییر کرده و به‌منزله یک منبع ایجاد مزیت رقابتی و فرصت‌های جدید کسب‌وکار شناخته می‌شود. به‌طورمعمول، اندازه بازار خدمات پس از فروش بیش از چهار تا پنج برابر بزرگ‌تر از اندازه بازار فروش محصولات نهایی است [۵]؛ همچنین سود این بازار به‌طورمعمول بیش از سه برابر سود فروش محصولات نهایی است [۵]. علاوه بر آن، ارائه خدمات پس از فروش می‌تواند به‌عنوان یکی از معدود کانال‌های ارتباطی دائم بین مشتریان و یک شرکت باشد [۱]. این جریان اطلاعاتی دربردارنده کیفیت و میزان محصولات برگشتی می‌تواند نقش مهمی در بهبود دائمی کیفیت داشته باشد. اهمیت این کانال ارتباطی به حدی است که در مطالعات انجام‌شده از آن به‌عنوان یک ابزار کارا برای افزایش احتمال موفقیت در معرفی محصولات جدید نیز یاد می‌شود. با توجه به مجموعه دلایل مطرح‌شده، تعداد شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات پس‌ازفروش پیوسته درحال افزایش است. علی‌رغم اهمیت این مقوله، همچنان مطالعات اندکی بدین مسئله پرداخته‌اند [۶]. بزرگ‌ترین مشکلات فعالیت شرکت‌ها در این حوزه عبارتنداز [۷]: ۱. مدیریت ارتباطات و در نظر گرفتن تمامی فعالیت‌ها شامل خرید، تولید، توزیع و مدیریت موجودی میان تسهیلات مربوطه در سطح زنجیره تأمین؛ ۲. فقدان نگاه سیستمی در ارائه خدمات پس‌ازفروش؛ ۳. مواجه با عدم‌قطعیت‌های فراوان در فضای برنامه‌ریزی. در این مقاله، این خلأ مبانی نظری موضوع با درنظرگرفتن تمامی فعالیت‌های مدیریت ارائه

خدمات پس از فروش در قالب یک شبکه زنجیره تأمین با لحاظ مجموعه‌ای از استراتژی‌های بازاریابی مرتبط تحت عدم‌قطعیت در نظر گرفته شده است.

ساختار ادامه این مقاله به شرح زیر خواهد بود: در بخش ۲، پیشینه پژوهش تشریح شده و در بخش ۳، مسئله به‌طور دقیق تشریح، مدل ریاضی مسئله ارائه و الگوریتم حل پیشنهادی معرفی شده است. در بخش ۴، داده‌ها و یافته‌های پژوهش در قالب نتایج محاسباتی حل مدل برای برنامه‌ریزی تصادفی زنجیره تأمین با مجموعه‌ای از استراتژی‌های بازاریابی برای یک نمونه موردی تحلیل شده و توصیه‌های مدیریتی ارائه شده است. در بخش ۵، ضمن نتیجه‌گیری از پژوهش انجام‌شده، زمینه‌های پژوهش‌های آتی معرفی شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

ظرفیت ارائه خدمات پس‌ازفروش می‌تواند از دو طریق تأمین شود. در حالت تأمین داخلی، شرکت خود اقدام به تأمین نیازمندی‌های خدمات پس‌ازفروش می‌کند. این ظرفیت پیش از دریافت تقاضا برای خدمات پس از فروش توسط شرکت فراهم می‌شود. در حالت دیگر، نیازمندی‌های شرکت از طریق برون‌سپاری تأمین می‌شود. در این حالت ظرفیت ارائه خدمات پس از دریافت تقاضا فراهم می‌شود و ابزاری برای مقابله با عدم‌قطعیت تقاضای دریافت خدمات محسوب می‌شود [۸]؛ درحالی‌که هزینه و ظرفیت ارائه خدمات از طریق برون‌سپاری ذاتاً با عدم‌قطعیت همراه است؛ ازاین‌رو بسیاری از شرکت‌ها ترجیح می‌دهند خود نیازمندی‌های خدمات پس‌ازفروش را بااستفاده از ظرفیت‌های داخلی تأمین کنند. دلیل این انتخاب تنها قابلیت اطمینان این رویکرد نیست؛ بلکه حفاظت از سرمایه‌های معنوی شرکت همچون اعتبار و جایگاه شرکت در میان مشتریان و بازار است. این شرکت‌ها با فراهم‌کردن ظرفیت مناسب برای ارائه خدمات پیش از دریافت تقاضا، سعی می‌کنند سود مورد انتظار خود را حداکثر کنند؛ باوجود این، مواجه با برنامه‌ریزی تولید محصول و ارائه خدمت به‌صورت همزمان یک فعالیت بسیار پیچیده است؛ درواقع این شرکت‌ها با دو زنجیره تأمین روبه‌رو هستند که عبارت‌اند از: زنجیره تأمین با جریان مستقیم برای تأمین محصولات نهایی و همچنین زنجیره تأمین خدمات پس‌ازفروش برای پاسخگویی به خدمات موردنیاز مشتریان. برنامه‌ریزی همزمان این دو زنجیره بسیار پیچیده است؛ ازاین‌رو در مبانی نظری موضوع در اغلب موارد به‌منظور ساده‌سازی، این دو زنجیره به‌صورت مستقل از استراتژی‌های بازاریابی، بررسی شده است. با توجه به یافته‌های مطالعات انجام‌شده توسط برخی از پژوهشگران، مطالعات اندکی در زمینه زنجیره تأمین مدیریت خدمات پس از فروش انجام شده است [۴، ۵]. این نیاز برنامه‌ریزان و مدیران زنجیره‌های تأمین، با درنظرگرفتن دو جریان برنامه‌ریزی تأمین محصول نهایی به‌صورت مستقیم و ارائه خدمات پس‌ازفروش

به‌صورت همزمان، برطرف شده است. در مطالعات انجام‌شده در حوزه خدمات پس از فروش، مقوله‌های در نظر گرفته‌شده در فرآیند برنامه‌ریزی زنجیره تأمین عبارت‌اند از [۹]: ۱. فعالیت‌های نگهداری و تعویض قطعات برای جلوگیری از بروز خرابی [۱۰-۱۳]؛ ۲. تعمیر سیستم هنگام خرابی [۱۴]؛ ۳. مدیریت قطعات یدکی برای پاسخگویی به خدمات پس از فروش [۱۵]؛ ۴. انتخاب خدمات پس‌ازفروش مناسب [۱۶-۲۰]؛ ۵. مدیریت ارتباطات مشتریان با تأثیر چشمگیری بر سودآوری زنجیره ارائه خدمات پس از فروش [۲۱]؛ ۶. پیش‌بینی تقاضای خدمات پس از فروش [۲۲]؛ ۷. رقابت بین محصولات نو و باز تولیدشده [۲۳]؛ ۸. رقابت بین خدمات پس‌از-فروش ارائه‌شده به مشتریان [۲۴]؛ ۹. پیکربندی شبکه خدمات پس‌ازفروش با توجه به مجموعه فعالیت‌های موردنیاز [۲۵-۲۷].

ازجمله مهم‌ترین تصمیم‌های اتخاذشده عبارت است از: انتخاب استراتژی مناسب شامل انتخاب استراتژی‌های تولید و خدمات پس‌ازفروش [۵]. بررسی مبانی نظری موضوع حاکی از عدم وجود یک مطالعه با نگرشی جامع و فرایند محور به برنامه‌ریزی برای فعالیت‌های خدمات پس از فروش و در نظر گرفتن اندرکنش آن با زنجیره تأمین محصولات نهایی است. ازاین‌رو در این مطالعه بدین مسئله پرداخته شده است و علاوه بر آن ماهیت غیرقطعی فضای برنامه‌ریزی در مدیریت جریان پویای زنجیره تأمین خدمات پس از فروش نیز لحاظ شده است. به‌طورمعمول در مطالعات انجام‌شده پیرامون مدیریت خدمات پس از فروش، بر ماهیت غیرقطعی برخی از پارامترهای تصمیم‌گیری تأکید شده است که عبارت‌اند از: ۱. زمان وقوع خرابی در محصولات که تقاضای دریافت خدمات پس از فروش را ایجاد می‌نماید [۱۰, ۱۲, ۱۳, ۱۷, ۱۸, ۲۲, ۲۸-۳۳]؛ ۲. مدت‌زمان تعمیر محصولات و سیستم [۱۴, ۲۹-۳۱] و هزینه تعمیر [۲۰].

عمده مطالعات انجام‌شده در مبانی نظری موضوع، از نگاهی جامع از منظر استراتژی‌های بازاریابی به مسئله مدیریت زنجیره تأمین خدمات برگشتی محروم بوده و عمده تمرکز بر بخش‌های پایین‌دستی زنجیره نظیر تقاضای دریافت تعمیر، فرآیند تعمیر و عدم‌قطعیت‌های مربوط به آن است؛ درحالی‌که تسهیلات بالادستی تولیدکننده حاضر در شبکه زنجیره تأمین با نقش پشتیبانی در تأمین قطعات یدکی نادیده گرفته شده است. در این مقاله، عملکرد تسهیلات تولیدکننده در لایه بالادستی زنجیره خدمات پس‌ازفروش و عدم‌قطعیت‌های آنها در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از: ۱. عدم‌قطعیت تقاضای محصولات نهایی و قطعات یدکی؛ ۲. عدم‌قطعیت تأمین و ۳. عدم‌قطعیت در عملکرد قطعات. تقاضای محصولات نهایی دارای یک تابع تصادفی از قیمت خرده‌فروشان، دوره خدمات پس‌ازفروش و سطح خدمت است. تقاضای قطعات یدکی تصادفی بوده و به میزان کل محصولات نهایی عرضه‌شده و کیفیت محصولات وابسته است. عدم‌قطعیت تأمین نیز به‌واسطه بروز خرابی در عملکرد این تسهیلات است که

درنهایت منجر به تصادفی‌شدن ظرفیت آن‌ها می‌شود [۳۴]. علاوه بر عدم‌قطعیت حاضر در سطوح مختلف زنجیره تأمین، انتشار عدم‌قطعیت با حرکت جریان از لایه‌های بالایی به پایینی در سطح شبکه مستقیم به‌منظور تعیین میزان جریان غیرقطعی نیز در نظر گرفته شده است.

درنهایت، در این مقاله زنجیره تأمین با لحاظ‌نمودن هر دو جریان مستقیم محصولات نهایی و خدمات ازفروش تحت عدم‌قطعیت تقاضا و تأمین بررسی شده است. هدف از برنامه‌ریزی در این سیستم پیچیده، تعیین بهترین استراتژی بازاریابی (قیمت، دوره خدمات پس‌ازفروش و سطح خدمت) و برقراری یک جریان پویای قابل‌اطمینان در سطح زنجیره با هدف پشتیبانی از استراتژی‌های بازاریابی است. نوآوری‌های ارائه‌شده در این مقاله به‌طورکلی عبارت است از: ۱. کمی‌سازی انتشار عدم‌قطعیت در سطح شبکه زنجیره تأمین؛ ۲. تعیین ارتباط بین سطح خدمت زنجیره و عملکرد تصادفی تسهیلات؛ ۳. تعیین ارتباط بین عملکرد تصادفی تسهیلات زنجیره و مقادیر جریان؛ ۴. عدم‌قطعیت استوار هزینه‌های تأمین؛ ۵. ارائه یک مدل ریاضی جامع برای برنامه‌ریزی همزمان زنجیره تأمین مستقیم محصولات و خدمات پس‌ازفروش و تعیین بهترین استراتژی بازاریابی تحت عدم‌قطعیت؛ ۶. ارائه یک الگوریتم حل فراابتکاری برای مدل ارائه‌شده.

۳. روش‌شناسی پژوهش

تعریف مسئله. در این مسئله، برنامه‌ریزی زنجیره تأمین یک شرکت تولیدکننده برای پاسخگویی به تقاضای مشتریان محصولات نهایی و خدمات پس‌ازفروش بررسی شده است. محصولات با قیمت و دوره خدمات پس‌ازفروش معین شامل تعمیر بدون دریافت هزینه به مشتریان عرضه می‌شوند. قطعات اصلی پس از انتقال از تأمین‌کنندگان به تولیدکنندگان و مونتاژشدن، محصول نهایی را ایجاد می‌کنند که درنهایت توسط خرده‌فروشان به مشتریان عرضه می‌شوند. قطعات یدکی موردنیاز برای تعمیر محصولات توسط زنجیره تأمین خدمات تأمین می‌شوند که این زنجیره دارای سه فعالیت است که عبارت‌اند از: ۱. انتخاب تأمین‌کنندگان قطعات برای تعمیر محصولات برگشتی؛ ۲. ارسال قطعات یدکی به خرده‌فروشان برای تعمیر محصولات برگشتی؛ ۳. تعمیر کامل برخی از قطعات معیوب محصولات برگشتی و استفاده از آن‌ها در پاسخگویی به تقاضای خدمات پس‌ازفروش. در زنجیره تأمین موردبررسی، خرده‌فروشان نقش مراکز جمع‌آوری و تعمیر را در زنجیره‌های تأمین برگشتی بر عهده دارند. هزینه‌های حمل‌ونقل برگشت محصولات بر عهده مشتریان است. محصولات و قطعات یدکی موردنیاز در ابتدای هر دوره در اختیار خرده‌فروشان قرار می‌گیرند. پیش از آغاز هر دوره، خرده‌فروشان نیازمندی‌های خود را به تولیدکنندگان و تأمین‌کنندگان سفارش می‌دهند. با توجه به تقاضای خرده‌فروشان و ظرفیت تولید، هر تولیدکننده اقدام به ارائه سفارش قطعات موردنیاز به تأمین‌کنندگان می‌کند.

تأمین‌کنندگان نیز با توجه به میزان سفارش دریافت‌شده از تولیدکنندگان و خرده‌فروشان و ظرفیت خود، قطعات موردنیاز را تأمین می‌کنند. در مواجه با عدم‌قطعیت‌های فضای تصمیم‌گیری، عدم‌قطعیت پارامترهای کلیدی در مدل‌سازی لحاظ شده است که عبارت‌اند از: ۱. تقاضای محصولات نهایی و قطعات یدکی موردنیاز در دوره خدمات پس از فروش؛ ۲. ظرفیت تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان؛ ۳. دوره عمر قطعات؛ ۴. هزینه‌های تأمین. عدم‌قطعیت ظرفیت‌های تولید و تأمین به‌دلیل امکان بروز خرابی در سیستم است که درنهایت منجر به نرخ تصادفی تولید محصولات نامنطبق می‌شود. جریان با کیفیت مدنظر در گذر از لایه‌های زنجیره تأمین دچار تغییر شده و این مشکل در پی انتشار عدم‌قطعیت شدت می‌یابد. در چنین سیستم تولیدی پیچیده در شرایط عدم‌قطعیت، سؤال‌های مطرح‌شده توسط برنامه‌ریزان عبارت‌اند از: ۱. بهترین سطح خدمت برای زنجیره تأمین مستقیم محصول و خدمات پس از فروش؛ ۲. میزان قابلیت اطمینان تسهیلات زنجیره تأمین برای پشتیبانی از سطح خدمت مدنظر؛ ۳. میزان جریان کالا در زنجیره با هدف حفظ قابلیت اطمینان جریان؛ ۴. بهترین استراتژی‌های بازاریابی برای شرکت؛ ۵. همبستگی میان استراتژی‌های بازاریابی.

مدل ریاضی پیشنهادی. در ادامه مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی معرفی شده است.

مجموعه‌ها. S ، M، R، N، T، SL، W، $S1$، $S2^{(s1)}$ و $S^{(n)}$: به‌ترتیب مجموعه تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، خرده‌فروشان، قطعات، مسیرها، سناریوهای سطوح خدمت و تأمین‌کنندگان قطعه n.

$T^{(s)}$، $T^{(m)}$ و $T^{(r)}$: به‌ترتیب مجموعه مسیرهای بالقوه آغازشده از تأمین‌کننده s، گذرنده از تولیدکننده m و ختم‌شده به خرده‌فروش r.

پارامترها.

$D_r(sl_p, sl_a, w, p)$ و $\bar{D}_r(sl_p, sl_a, w, p)$: به‌ترتیب تابع تقاضا و متوسط تقاضا برای خرده‌فروش r.

ε_r و $G_r(.)$: به‌ترتیب متغیر تصادفی نشان‌دهنده بخش غیرقطعی تقاضای خرده‌فروش r و تابع توزیع تجمعی آن.

$D_{m,t|m\in t}(x_t)$، $D_{s,t|s\in t}(x_t)$، $G'_{m,t}(.)$ و $G''_{s,t}(.)$: به‌ترتیب میزان محصولات نامنطبق تولیدشده توسط تولیدکننده m و تأمین‌کننده s و توابع توزیع تجمعی آن‌ها.

z'_α: مقدار تابع توزیع نرمال استاندارد برای احتمال α.

a^s_1، ma^s_1، a^s_2، ma^s_2، a^m، a^t_{sm}، a^t_{mr} و a^t_{sr}: به‌ترتیب میانگین و انحراف از میانگین هزینه خرید و تولید واحد کالا در تأمین‌کننده s، تولید در تولیدکننده m، حمل‌ونقل بین تأمین‌کننده s و تولیدکننده m، تولیدکننده m و خرده‌فروش r و تأمین‌کننده s و خرده‌فروش r.

$bud1_s$ و $bud2_s$: بودجه‌های عدم‌قطعیت هزینه‌های تأمین واحد کالا در تأمین‌کننده s.

h^+_r و h^-_r: به‌ترتیب هزینه نگهداری موجودی مازاد و کمبود موجودی در پایان هر دوره.

β_m، μ_s، γ_s، PR_s و θ_n: به‌ترتیب، حداکثر نرخ تولید محصول نامنطبق در تولیدکننده m، متوسط کاهش ظرفیت، نرخ تولی قطعات نامنطبق و نرخ تولید در تأمین‌کننده s و قابلیت اطمینان قطعه n.

$f_n(.)$، $F_n(.)$ و $F_n^{(m)}(.)$: به‌ترتیب تابع توزیع چگالی و تجمعی خرابی قطعه n و تابع توزیع تجمعی کل زمان mامین خرابی قطعه n.

p و λ_n و cr_n: به‌ترتیب قیمت محصول، تعداد خرابی قابل تعمیر قطعه n و هزینه تعمیر آن.

$Num_n(w)$، $AD_n(w)$ و $VD_n(w)$: به‌ترتیب تعداد خرابی تصادفی، تعداد و واریانس جایگزینی آن در محصول در دوره خدمات پس‌ازفروش.

$D_t'^n$ و Π_r: به‌ترتیب تقاضای بازار خدمات پس‌ازفروش قطعه n و کل هزینه خرده‌فروش r در پایان هر دوره.

متغیرها. y_t ، z_{sl} و v_w: به‌ترتیب متغیر باینری نشان‌دهنده انتخاب مسیر t، انتخاب سطح خدمت sl و دوره خدمات پس‌ازفروش w.

x_t، Δx_t، $\Delta x'_t$ و $x'^{(n)}_t$: به‌ترتیب جریان محصول، تولید اضافی توسط تولیدکننده و تأمین‌کننده و جریان قطعه n در مسیر t.

rl_s، rl_m و rl_r: قابلیت اطمینان تأمین‌کننده s، تولیدکننده m و خرده‌فروش r.

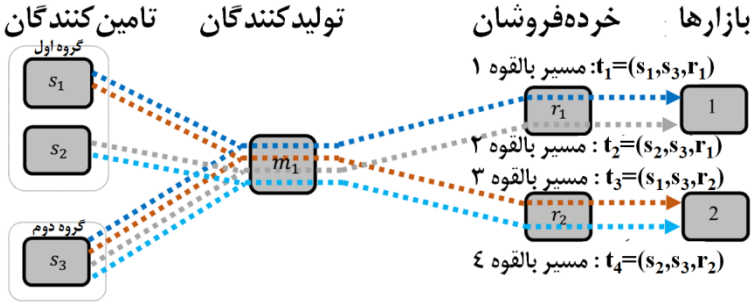
$Pro1_s$، $(Pro2_s)$ $Zro1_s$ $(Zro2_s)$ $Xro1_s$ و $(Xro2_s)$: به‌ترتیب متغیرهای مکمل اول، دوم و سوم برای مدل همتای استوار به‌منظور درنظرگرفتن عدم‌قطعیت هزینه تأمین کالا.

شکل ۱ یک ساختار شماتیک از زنجیره تأمین موردبررسی را نمایش می‌دهد. محصول مدنظر دارای دو قطعه اصلی است. قطعه نخست توسط گروه اول تأمین‌کنندگان شامل تأمین‌کننده اول و دوم و قطعه دوم نیز توسط گروه دوم تأمین‌کنندگان تنها شامل سومین تأمین‌کننده تأمین می‌شود. جریان قطعات از تأمین‌کنندگان آغاز و در تولیدکننده پس از مونتاژ تبدیل به جریان محصول نهایی شده که درنهایت با انتقال به خرده‌فروشان، تقاضای مشتریان را پاسخ می‌دهد. در ساختار زنجیره تأمین مستقیم، چند مسیر بالقوه برای پاسخگویی به تقاضای

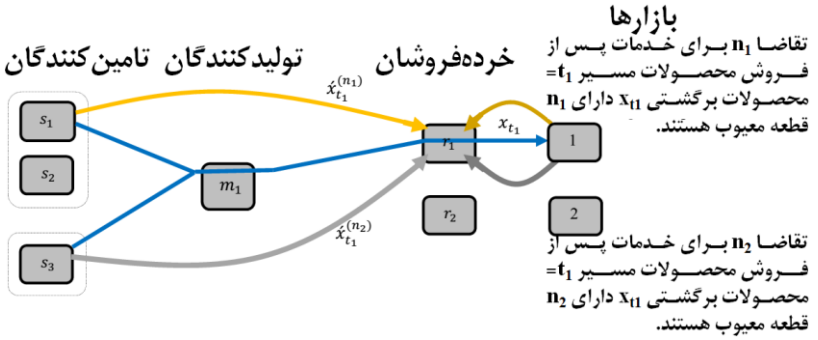
بازار وجود دارد. در شکل ۱، هر مسیر از یک تأمین‌کننده برای هر قطعه آغازشده و با گذر از تولیدکننده در میانه راه تنها به یک خرده‌فروش ختم می‌شود. به‌دلیل استفاده از مفهوم مسیر در مدل‌سازی مسئله موردبررسی، این رویکرد می‌تواند بدون تغییر برای انواع دیگر از شبکه‌های زنجیره تأمین نیز توسعه یابد. هر مسیر در شکل ۱ (نمایش ۴ مسیر بالقوه) با توجه به سطوح تشکیل‌دهنده آن از سه جز تشکیل شده است. جز نخست و دوم آن به ترتیب گروه اول و دوم تأمین‌کنندگان است. به‌دلیل حضور تنها یک تولیدکننده، نیازی به ذکر آن در عنوان مسیر نیست (ذکر نام در صورت حضور چند تولیدکننده). جز سوم هر مسیر نشان‌دهنده خرده‌فروش است. بهترین این مسیرها با توجه به معیار سودآوری برای تولید محصول و ارائه آن به بازارها انتخاب می‌شود. محصولات این زنجیره تأمین با قیمت و دوره خدمات پس‌ازفروش معین بدون دریافت هزینه به مشتریان عرضه می‌شود. محصولات ارائه‌شده به مشتریان با یک نرخ تصادفی به‌دلیل بروز ایرادات کیفی به خرده‌فروشان برگشت داده می‌شوند و قطعات معیوب تعمیر می‌شوند. این قطعات یدکی توسط تأمین‌کنندگان زنجیره تأمین در اختیار خرده‌فروشان از طریق مسیرهای بالقوه قرار می‌گیرند. برای نمونه، اگر مسیر بالقوه اول در شکل ۱ به‌عنوان مسیر فعال برای انتقال قطعات با حجم جریان x_{t_1} انتخاب شود، میزان قطعات اول و دوم موردنیاز برای تعمیر x_{t_1} محصول به‌ترتیب برابر است با $x'^{(n_1)}_{t_1}$ و $x'^{(n_2)}_{t_1}$ و توسط تأمین‌کنندگان مسیر یک (t_1) شامل s_1 و s_3 برای خرده‌فروش نهایی مسیر (r_1) انتقال می‌یابد (شکل ۲)؛ درنتیجه با تعیین مسیر مستقیم در زنجیره تأمین و مقادیر جریان، مسیر فعال برای زنجیره تأمین خدمات پس‌ازفروش و جریان آن نیز مشخص می‌شود. در این مسئله، عدم‌قطعیت تقاضا و عرضه با لحاظ‌نمودن تقاضای تصادفی در گره‌های تقاضا و عملکرد تصادفی در تسهیلات تأمین و تولید به‌دلیل امکان بروز خرابی در سیستم‌های آن‌ها در نظر گرفته شده‌است. وجود عدم‌قطعیت در سطوح مختلف زنجیره تأمین منجر به انتشار عدم‌قطعیت در مسیرهای فعال می‌شود که لحاظ‌نمودن آن تأثیر مهمی بر تعیین سطح پاسخ زنجیره‌های تأمین محصول نهایی و خدمات پس‌ازفروش دارد (شکل ۲).

انتشار عدم‌قطعیت در زنجیره تأمین مستقیم. سطح خدمت زنجیره تأمین محصول نهایی و خدمات پس‌ازفروش نشان‌دهنده قابلیت اطمینان کل شبکه زنجیره تأمین در برابر عدم‌قطعیت‌ها و انتشار آن‌ها است. سطح خدمت نشان‌دهنده توانایی زنجیره تأمین در ایجاد تعادل بین تقاضا و عرضه وابسته به قابلیت اطمینان تسهیلات است. محصولات نهایی در هر مسیر شبکه تولید و به همراه قطعات یدکی به بازار عرضه می‌شوند. هر مسیر محصولات نهایی شامل خرده‌فروش، تولیدکننده و تأمین‌کنندگان و هر مسیر خدمات پس‌ازفروش شامل یک خرده‌فروش و یک

تأمین‌کننده به ازای هر قطعه است (شکل ۲). فرآیند کمی‌سازی انتشار عدم‌قطعیت در هر مسیر از عدم‌قطعیت در آخرین سطح آغازشده و تا سطوح بالایی ادامه می‌یابد.



شکل ۱. مسیرهای بالقوه در دسترس در ساختار زنجیره نمونه موردبررسی



شکل ۲. ارائه خدمات پس از فروش عرضه‌شده توسط مسیر فعال

مدیریت عدم‌قطعیت در سطح خرده‌فروشان. جایگاه شرکت در بازار با توجه به سطوح خدمت در زنجیره‌های تأمین محصول نهایی و خدمات پس‌ازفروش، دوره خدمات پس‌ازفروش و قیمت خرده‌فروشی تعیین می‌شود. متوسط تقاضای محصول هر بازار در هر دوره یک تابع صعودی نسبت به سطح خدمت و دوره خدمات پس‌ازفروش و یک تابع نزولی نسبت به قیمت است. تقاضای واقعی مشتریان غیرقطعی است و با توجه به یافته‌های پژوهشگران [۳۵]، تابع تصادفی تقاضا در بازار به‌صورت رابطه ۱ است.

$$D_r\left(sl_p, sl_a, w, p\right) = \varepsilon_r \times \bar{D}_r\left(sl_p, sl_a, w, p\right) \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، ε_r یک متغیر تصادفی پیوسته با تابع توزیع تجمعی $G_r(\varepsilon_r)$ و مستقل از سطح خدمت، دوره خدمات پس‌ازفروش و قیمت خرده‌فروشی است. هر خرده‌فروش در هر دوره محصولات موردنیاز خود را به تولیدکنندگان سفارش می‌دهد. این محصولات توسط مسیرهای

فعال ختم‌شده به آن خرده‌فروش در آغاز دوره تأمین می‌شوند. امکان تأمین محصول در طول دوره و یا پس از درک تقاضا وجود ندارد. تقاضای بازار r تصادفی با تابع توزیع تجمعی $G_r(\square)$ است. بروز کمبود و مازاد موجودی در هر دوره دارای هزینه است. با توجه به قابلیت اطمینان خرده‌فروش، میزان سفارش محصول توسط خرده‌فروش با توجه به هدف حداقل‌کردن هزینه‌های کل در پایان دوره تعیین می‌شود. میزان سفارش محصول برای خرده‌فروش r برابر است با:

$$Min \quad \Pi_r = \begin{pmatrix} h_r^+ .E\left[\sum_{T^{(r)}} x_t - D_r\left(sl_p, sl_a, w, p\right)\right]^+ \\ +h_r^- .E\left[D_r\left(sl_p, sl_a, w, p\right) - \sum_{T^{(r)}} x_t\right]^+ \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

$$\Pr\left[D_r\left(sl_p, sl_a, w, p\right) \le \sum_{T^{(r)}} x_t\right] \ge rl_r \qquad (۳)$$

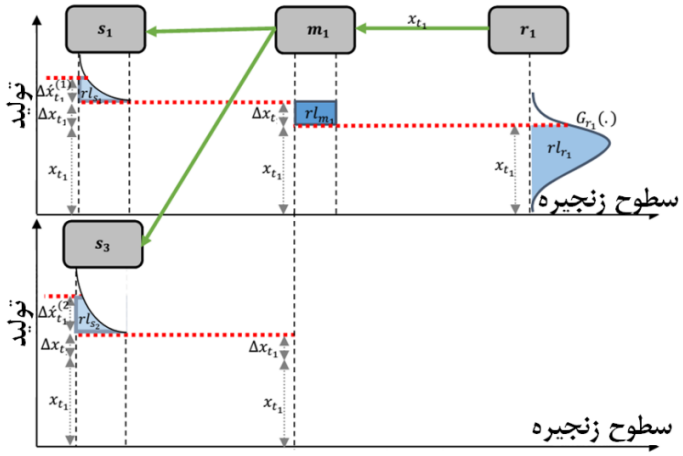
عبارت‌های نخست و دوم تابع هدف ۲ به ترتیب نشان‌دهنده تابع انتظاری هزینه‌های نگهداری موجودی اضافی و کمبود موجودی در پایان دوره برای هر خرده‌فروش است؛ درنتیجه، هدف عبارت است از حداقل‌کردن هزینه کل خرده‌فروش (شکل ۳) و بدون لحاظ محدودیت ۳ منجر می‌شود $\sum_{T^{(r)}} x_t = \bar{D}_r\left(sl_p, sl_a, w, p\right) G_r^{-1}\left(\frac{h_r^-}{h_r^- + h_r^+}\right)$؛ همچنین باتوجه به قابلیت اطمینان خرده‌فروش، $\sum_{T^{(r)}} x_t \ge \bar{D}_r\left(sl_p, sl_a, w, p\right) G_r^{-1}(rl_r)$؛ درنتیجه مقدار بهینه میزان سفارش برابر است با $\sum_{T^{(r)}} x_t = \bar{D}_r\left(sl_p, sl_a, w, p\right) G_r^{-1}\left(\max\left\{rl_r, \frac{h_r^-}{h_r^- + h_r^+}\right\}\right)$ که میان مسیرهای فعال ختم‌شده به خرده‌فروش توزیع می‌شود.

مدیریت عدم‌قطعیت در سطح تولیدکننده. تقاضای هر مسیر توسط تولیدکننده آن تأمین می‌شود. مسیر t از تولیدکننده m می‌گذرد و تولیدکننده باید میزان x_t واحد محصول باکیفیت را تولید کند؛ درحالی‌که ظرفیت تولید به‌دلیل امکان بروز خرابی در سیستم و مواجه با کاهش تولید و یا تولید محصول بی‌کیفیت، با عدم‌قطعیت همراه است و تولیدکننده باید محصول مازاد تولید کند. این میزان تولید به عدم‌قطعیت تولیدکننده وابسته است و باید به قدری باشد که تولیدکننده با احتمال مشخص، اطمینان به پاسخگویی به تقاضای تخصیص داده‌شده را داشته باشد.

$$\Pr\left(D_{mt} \le \Delta x_t\right) = rl_m \rightarrow \Delta x_t = G_{mt}^{-1}\left(rl_m\right) \qquad (۴)$$

نرخ تولید محصولات معیوب تولیدکننده m یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0,\beta_m]$ است. به‌منظور حفظ قابلیت اطمینان، تولیدکننده برای تولید $x_t+\Delta x_t$ واحد محصول برای مسیر t برنامه‌ریزی می‌کند (رابطه ۵).

$$\Pr(\alpha_m.x_t \le \Delta x_t)=\Pr\left(\alpha_m \le \frac{\Delta x_t}{x_t}\right)=rl_m \rightarrow \Delta x_t = rl_m.\beta_m.x_t \qquad (۵)$$



شکل ۳. انتشار عدم‌قطعیت در مسیر t_1 شامل (s_1,s_3,r_1) متعلق به زنجیره تأمین مستقیم

مدیریت عدم‌قطعیت در سطح تأمین‌کنندگان. تأمین‌کننده s در مسیر فعال t قرار دارد و سفارش برای دریافت قطعات به میزان $x_t+\Delta x_t$ را دریافت می‌کند. ظرفیت تأمین‌کنندگان غیرقطعی بوده و نیاز به تأمین قطعات مازاد وابسته به قابلیت اطمینان آن است. تأمین مازاد، اطمینان با احتمال مشخص برای تأمین‌کننده برای پاسخگویی به تقاضای تولیدکننده را ایجاد می‌کند؛ بنابراین احتمال تولید محصول بی‌کیفیت و یا مواجه با کمبود قطعات موردنیاز کمتر از سطح مازاد برای پاسخگویی به تقاضای تولیدکننده برابر با قابلیت اطمینان است.

$$\Pr\left(D_{st} \le \Delta x_t'^{(s)}\right)=rl_s \rightarrow \Delta x_t'^{(s)}=G_{st}''^{-1}(rl_s) \qquad (۶)$$

تأمین‌کننده با تولید محصولات معیوب و یا نرخ تولید کمتر از توان مواجه است؛ درنتیجه در طی یک مدت‌زمان تصادفی، نرخ محصولات معیوب یا کمبود مشخص است. زمان خرابی تسهیل تأمین‌کننده دارای تابع توزیع نمایی با میانگین $\frac{1}{\mu_s}$ است. برای پاسخ به تقاضای دریافت‌شده برای قطعات در مسیر t، قطعه مازاد تأمین می‌شود. با درنظرگرفتن نرخ تأمین،

$\frac{\Delta x_t'^{(s)} + \Delta x_t + x_t}{PR_s}$ واحد زمانی برای تأمین موردنیاز صرف می‌شود. قابلیت اطمینان هر تأمین‌کننده برابر است با احتمال اینکه میزان تولید محصولات بی‌کیفیت و یا مواجهه با کمبود قطعات در طی دوره کمتر از قطعات مازاد باشد؛ همچنین تأمین‌کننده s با احتمال rl_s، اطمینان دارد که می‌تواند به سفارش تولیدکننده پاسخ دهد. با موجودی اضافی، تأمین‌کنندگان مسیر t در لایه نخست اطمینان دارند که با احتمال $\prod_{(\forall s \in t)} rl_s$ می‌توانند تمامی سفارش قطعات تولیدکنندگان را برآورده کنند. تولیدکننده با تولید محصول مازاد با احتمال rl_m اطمینان دارد که می‌تواند تقاضای خرده‌فروش هر مسیر را پاسخ دهد. با سفارش x_t واحد محصول از این مسیر، خرده‌فروش با احتمال rl_r اطمینان دارد که می‌تواند به میزان نسبت x_t بر $\sum_{T^{(r)}} x_t$ از تقاضای بازار خدمات پس‌ازفروش در دوره را پاسخ دهد. قابلیت اطمینان کل مسیر t برابر با $\left(\prod_{(\forall s \in t)} rl_s\right) \times rl_m \times rl_r$ است. تقاضای محصولات نهایی هر بازار و خرده‌فروش می‌تواند توسط تمامی مسیرهای فعال ختم‌شده به خرده‌فروش برآورده شود. خرده‌فروش r با احتمال $\prod_{\left(\forall t \in T^{(r)}\right)} \left[\left(\left(\prod_{(\forall s \in t)} rl_s\right) \times rl_m \times rl_r\right).y_t + (1-y_t)\right]$ اطمینان دارد که تقاضای بازار مربوطه در دوره آتی قابل‌پاسخگویی است درنتیجه سطح خدمت برای ارائه محصولات نهایی موردنیاز خرده‌فروش برابر با $\prod_{\left(\forall t \in T^{(r)}\right)} \left[\left(\left(\prod_{(\forall s \in t)} rl_s\right) \times rl_m \times rl_r\right).y_t + (1-y_t)\right]$ است.

$$rl_s = \Pr\left[PR_s\, t + (1-\gamma_s).PR_s.\left(\frac{\Delta x_t'^{(s)} + \Delta x_t + x_t}{PR_s} - t\right) \geq \Delta x_t + x_t\right] =$$
$$\Pr\left[t \geq \left(\frac{\Delta x_t + x_t}{PR_s}\right) - \left(\frac{1-\gamma_s}{\gamma_s.PR_s}\right).\left(\Delta x_t'^{(s)}\right)\right] = EXP\left[-\mu_s.\left(\left(\frac{\Delta x_t + x_t}{PR_s}\right) - \left(\frac{1-\gamma_s}{\gamma_s.PR_s}\right).\left(\Delta x_t'^{(s)}\right)\right)\right] \quad (۷)$$
$$\rightarrow \Delta x_t'^{(s)} = \frac{\gamma_s}{1-\gamma_s}\left[\frac{PR_s}{\mu_s}\ln(rl_s) + (\Delta x_t + x_t)\right]$$

انتشار عدم‌قطعیت در زنجیره تأمین خدمات پس‌ازفروش. خدمات پس‌ازفروش برای محصولات تأمین‌شده توسط هر مسیر به بازار باید توسط آن مسیر تأمین شود. نخستین گام در برنامه‌ریزی جریان شبکه خدمات پس‌ازفروش برای چند دوره، پیش‌بینی میزان قطعات موردنیاز است. پس از تعیین جریان خدمات پس‌ازفروش در هر مسیر، این جریان تحت‌تأثیر انتشار عدم‌قطعیت در طول مسیر (از سطح انتهایی به سطح ابتدایی) قرار می‌گیرد.

پیش‌بینی میزان سفارش قطعات یدکی توسط هر خرده‌فروش. فرض می‌شود که میزان x_t واحد از محصولات نهایی توسط مسیر فعال t برای خرده‌فروش r تأمین می‌شود. میزان قطعه موردنیاز برای تعمیر محصولات معیوب برگشت داده‌شده از سوی مشتریان در طی دوره خدمات پس‌ازفروش برابر با تقاضای دریافت خدمات پس از فروش برای مسیر t است. میزان تقاضای خدمات پس‌ازفروش به میزان محصول نهایی تأمین‌شده، دوره خدمات پس‌ازفروش و قابلیت اطمینان قطعات بستگی دارد. عملکرد قطعات محصول از یکدیگر مستقل بوده و زمان خرابی قطعه یک متغیر تصادفی با تابع چگالی و تجمعی مشخص است. تعداد λ_n خرابی نخست از قطعه n قابل‌تعمیر است؛ اما تعویض آن با یک قطعه جدید اقتصادی‌تر است. رفتار بروز خرابی قطعه پس از تعمیر تغییر نمی‌کند؛ درنتیجه قطعات جدید و تعمیرشده دارای رفتار خرابی یکسان هستند. توابع $F_n^{(m)}$ و $Num_n(w)$ نشان‌دهنده تابع توزیع تجمعی زمان کل تا وقوع mامین خرابی و متوسط تعداد خرابی‌های قطعه n در بازه $[0, w]$ است؛ در این صورت:

$$\Pr\{Num_n(w)=m\}=F_n^{(m)}(w,\theta_n)-F_n^{(m+1)}(w,\theta_n) \quad \forall n\in N \tag{۸}$$

متوسط و پراکندگی تعداد قطعات موردنیاز برای تعمیر هر محصول در دوره خدمات پس‌ازفروش، برابر است با (۹) و (۱۰).

$$AD_n(w,\theta_n,\lambda_n)=\sum_{m=\lambda_n+1}^{+\infty}F_n^{(m)}(w,\theta_n) \quad \forall n\in N \tag{۹}$$

$$VD_n(w,\theta_n,\lambda_n)=\sum_{m=\lambda_n+1}^{+\infty}\left[2.(m-\lambda_n)-1\right].F_n^{(m)}(w,\theta_n)-\left[\sum_{m=\lambda_n+1}^{+\infty}F_n^{(m)}(w,\theta_n)\right]^2 \quad \forall n\in N \tag{۱۰}$$

با استفاده از قضیه حد مرکزی، تعداد قطعه n موردنیاز برای بازار خدمات پس‌ازفروش در مسیر t با تقاضای D_t^n دارای تابع توزیع نرمال (۱۱) بوده و میزان تعداد قطعات n سفارش داده‌شده توسط خرده‌فروش r از مسیر t برابر است با (۱۲).

$$D_t^n \sim Normal\left(\mu_{D_t^n}=x_t.AD_n(w,\theta_n,\lambda_n),\sigma^2_{D_t^n}=x_t.VD_n(w,\theta_n,\lambda_n)\right) \quad \forall n\in N;\forall t\in T \tag{۱۱}$$

$$x_t'^{(n)}=x_t.AD_n(w,\theta_n,\lambda_n)+\left(z'_{rl_r}.\sqrt{x_t.VD_n(w,\theta_n,\lambda_n)}\right) \quad \forall n\in N \tag{۱۲}$$

با سفارش تعداد $x_t'^{(n)}$ واحد از قطعه n، خرده‌فروش اطمینان دارد با احتمال rl_r می‌تواند تقاضای خدمات پس‌ازفروش برای قطعه n در مسیر t را پاسخ دهد. خرده‌فروش r نه‌تنها محصول نهایی

را به میزان x_t به تولیدکننده سفارش می‌دهد؛ بلکه میزان مازاد از قطعه n را از تأمین‌کنندگان وابسته به مسیر فعال مربوطه دریافت می‌کند. تأمین‌کننده s سفارش دریافت قطعه به تعداد $\Delta x_t + x_t$ را از تولیدکننده و سفارش به میزان $x_t'^{(n)}$ را از خرده‌فروش دریافت می‌کند. تأمین‌کننده s نیز به‌منظور مقابله با عدم‌قطعیت ظرفیت به تولید $x_t'^{(s)}$ قطعه اضافی اقدام می‌کند.

$$rl_S = \Pr\left(PR_S\, t + (1-\gamma_S).PR_S.\left(\frac{\Delta x_t^{(s)} + x_t'^{(n)} + \Delta x_t + x_t}{PR_S} - t \right) \geq x_t'^{(n)} + \Delta x_t + x_t \right) \quad (۱۳)$$

$$= \Pr\left[t \geq \left(\frac{x_t'^{(n)} + \Delta x_t + x_t}{PR_S} \right) - \left(\frac{1-\gamma_S}{\gamma_S.PR_S} \right).\left(\Delta x_t'^{(s)} \right) \right] = EXP\left[-\mu_S.\left(\frac{x_t'^{(n)} + \Delta x_t + x_t}{PR_S} \right) \right]$$

$$= EXP\left[-\mu_S.\left(\frac{1-\mu_S}{\gamma_S.PR_S} \right).\left(\Delta x_t'^{(s)} \right) \right] \rightarrow \Delta x_t'^{(s)} = \frac{\gamma_S}{1-\gamma_S}\left[\frac{PR_S}{\mu_S} \ln(rl_S) + \left(x_t'^{(n)} + \Delta x_t + x_t \right) \right]$$

عملکرد تأمین‌کنندگان در شبکه خدمات پس از فروش. با تولید مازاد، تأمین‌کننده s با احتمال rl_s اطمینان به پاسخ به تقاضای محصول نهایی و خدمات پس‌ازفروش دارد. با سفارش $x_t'^{(n)}$ واحد قطعه n از تأمین‌کننده، خرده‌فروش اطمینان دارد با احتمال rl_r به تقاضای خدمات پس‌ازفروش پاسخ می‌دهد؛ درنتیجه نرخ پاسخگویی به تقاضای قطعه n در مسیر t برابر با حاصل‌ضرب rl_s و rl_r است. تعداد n قطعه در هر محصول وجود دارد که نرخ پاسخگویی به تقاضای تمامی قطعات در مسیر t برابر است با $\prod_{\left(\forall n \in N, s \in S^{(n)} | s \in t\right)} rl_s$. تقاضای خدمات پس‌ازفروش خرده‌فروش r توسط تمامی مسیرهای فعال ختم‌شده به آن پاسخ داده می‌شود. سطح خدمت برای خرده‌فروش r برابر است با:

$$\prod_{\left(\forall t \in T^{(r)}\right)} \left[\left((rl_r)^{|N|}.\prod_{\left(\forall n \in N, s \in S^{(n)} | s \in t\right)} rl_s \right).y_t + (1-y_t) \right].$$

برنامه‌ریزی همزمان جریان در زنجیره تأمین محصولات نهایی و خدمات پس‌ازفروش. در این بخش یک مدل ریاضی جامع برای انتخاب بهترین استراتژی‌های بازاریابی و برنامه‌ریزی جریان پویا در سطح شبکه زنجیره تأمین با لحاظ‌نمودن قابلیت اطمینان تسهیلات و با هدف حداکثرکردن سود خالص شرکت ارائه شده است. برای این منظور در این مسئله یک مجموعه جدید شامل تمامی انتخاب‌ها برای دوره‌های خدمات پس‌ازفروش و سطوح خدمت در دو زنجیره محصول نهایی و خدمات پس‌ازفروش تعریف می‌شود. نخستین عبارت تابع هدف ۱۴،

نشان‌دهنده سود حاصل از ارائه محصولات نهایی به بازار است که دربردارنده تفاضل عایدی و هزینه‌های نگهداری، کمبود و مازاد موجودی در پایان هر دوره است. دومین عبارت، مجموع هزینه‌های تأمین است. هزینه‌های تولید در سومین عبارت لحاظ شده است. چهارمین، پنجمین و ششمین عبارات نیز هزینه‌های حمل‌ونقل قطعات ببین تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان، حمل‌ونقل محصولات نهایی بین تولیدکنندگان و خرده‌فروشان و حمل‌ونقل قطعات بین تأمین‌کنندگان و خرده‌فروشان را محاسبه می‌کنند. دو عبارت پایانی نیز عدم‌قطعیت پارامتر هزینه‌های تأمین را نشان می‌دهند. هدف نهایی تابع ۱۴ حداکثرکردن سود خالص کل زنجیره تأمین است. محدودیت‌های خطی ۱۵ تا ۱۸ با توجه به مدل همتای استوار مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی استوار بودجه‌ای برای نمایش عدم‌قطعیت هزینه تأمین قطعات اصلی در نظر گرفته شده است. محدودیت ۱۹ تضمین می‌کند که تنها یک استراتژی خدمات پس‌ازفروش توسط شرکت می‌تواند انتخاب شود. محدودیت ۲۰ مقید می‌کند که تنها یک مسیر برای پاسخگویی به تقاضای هر بازار فعال شود. محدودیت ۲۱ برقراری جریان تنها در مسیر فعال‌شده را ممکن می‌سازد. با توجه به محدودیت ۲۲، مجموع جریان محصولات در حال عبور از مسیرها و ختم‌شده به هر خرده‌فروش برابر با تقاضای حاضر در بازار برای محصول نهایی است. محدودیت ۲۳میزان جریان موردنیاز را در تسهیل تولیدکنندگان نشان می‌دهد. محدودیت ۲۴ میزان قطعات موردنیاز برای هر مسیر به‌منظور پاسخگویی به تقاضای بازار خدمات پس‌ازفروش را نشان می‌دهد. محدودیت ۲۵ جریان موردنیاز با توجه به عدم‌قطعیت ظرفیت تأمین‌کنندگان را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۲۶ و ۲۷ تضمین می‌کنند که قابلیت اطمینان هر تسهیل سطح خدمت مربوط به بازار محصولات نهایی و خدمات پس‌ازفروش را پاسخ می‌دهد.

$$
\begin{aligned}
Max \quad & \sum_{R,W,SL} v_w .z_{sl} .\bar{D}_r \left(sl_p, sl_a, w, p\right).\left[\begin{array}{l} p - h_r^+ .E\left(G_r^{-1}\left(Max\left\{rl_r, \frac{h_r^-}{h_r^+ + h_r^-}\right\}\right) - \varepsilon_r\right)^+ \\ -h_r^- .E\left(\varepsilon_r - G_r^{-1}\left(Max\left\{rl_r, \frac{h_r^-}{h_r^- + h_r^+}\right\}\right)\right)^+ \end{array}\right] \\
& - \sum_{N,S^{(n)},T^{(s)}} \left(a_1^s + a_2^s\right).\left[x_t + \Delta x_t + x_t'^{(n)} + \Delta x_t'^{(s)}\right] - \sum_{M,T^{(m)}} a^m .\left(x_t + \Delta x_t\right) \\
& - \sum_{S,M,T^{(m)} \cap T^{(r)}} a_{mr}^t .x_t - \sum_{N,S^{(n)},R,T^{(s)} \cap T^{(r)}} a_{sr}^t .x_t'^{(n)} - \sum_s Zro1_s \times bud1_s - \sum_s Zro2_s \times bud2_s
\end{aligned} \tag{۱۴}
$$

$$
-Zro1_s - \mathrm{Pro}1_s \geq ma_1^s \times \left(x_t + \Delta x_t + x_t'^{(n)} + \Delta x_t'^{(s)}\right) \quad \forall s \tag{۱۵}
$$

$$-\left(x_t+\Delta x_t+x_t'^{(n)}+\Delta x_t'^{(s)}\right)\le Xro1_S\le\left(x_t+\Delta x_t+x_t'^{(n)}+\Delta x_t'^{(s)}\right) \quad (۱۶)$$

$$-Zro2_S-\mathrm{Pro}2_S\ge ma_2^S\times\left(x_t+\Delta x_t+x_t'^{(n)}+\Delta x_T'^{(S)}\right)\quad\forall s \quad (۱۷)$$

$$-\left(x_t+\Delta x_t+x_t'^{(n)}+\Delta x_t'^{(s)}\right)\le Xro2_S\le\left(x_t+\Delta x_t+x_t'^{(n)}+\Delta x_t'^{(s)}\right) \quad (۱۸)$$

$$\sum_w v_w=1 \quad (۱۹)$$

$$\sum_{T^{(r)}} y_t\ge 1\quad\forall r\in R \quad (۲۰)$$

$$x_t\le BM.y_t\quad\forall t\in T \quad (۲۱)$$

$$\sum_{T^{(r)}} x_t=\left[\sum_{W,SL} v_w.z_{sl}.\bar{D}_r\left(sl_p,sl_a,w,p\right)\right].G_r^{-1}\left(Max\left\{rl_r,\frac{h_r^-}{h_r^-+h_r^+}\right\}\right)\quad\forall r\in R \quad (۲۲)$$

$$\Delta x_t=G_{mt}'^{-1}\left(x_t,rl_m\right).y_t\quad\forall t\in T,m\in t \quad (۲۳)$$

$$x_t'^{(n)}=x_t.AD_n\left(w,\theta_n,\lambda_n\right)+z'_{rl_r}.\sqrt{x_t.VD_n\left(w,\theta_n,\lambda_n\right)}\quad\forall t\in T,n\in N \quad (۲۴)$$

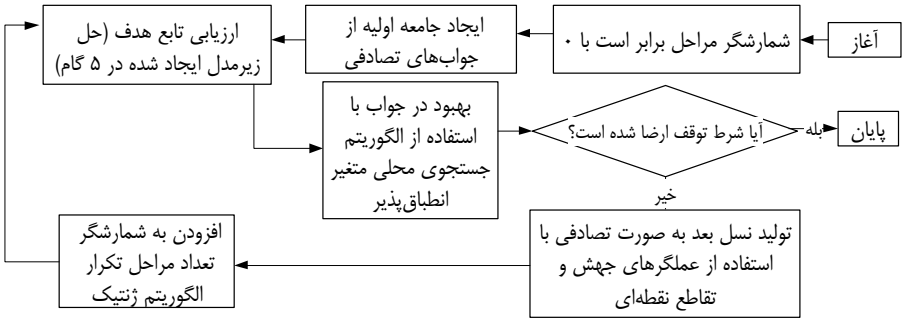
$$x_t'^{(s)}=G_{st}''^{-1}\left(x_t+\Delta x_t+x_t'^{(n)},rl_s\right).y_t\quad\forall t\in T,n\in N,s\in t,s\in S^{(n)} \quad (۲۵)$$

$$\sum_{SL} z_{sl}.sl_p=\prod_{\forall r\in R}\left[\left(\left(\prod_{\forall s\in t} rl_s\right)\times rl_m\times rl_r\right).y_t+\left(1-y_t\right)\right]\quad\forall r\in R \quad (۲۶)$$

$$\sum_{SL} z_{sl}.sl_a=\prod_{\left(\forall t\in T^{(r)}\right)}\left[\left(\left(rl_r\right)^{|N|}.\prod_{\left(\forall n\in N,s\in S^{(n)}|s\in t\right)} rl_s\right).y_t+\left(1-y_t\right)\right]\quad\forall r\in R \quad (۲۷)$$

الگوریتم حل پیشنهادی. حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه‌شده به‌دلیل وجود عبارت‌های غیرخطی به‌ویژه عبارت‌های مربوط به توابع چگالی و تجمعی مربوط به متغیرهای تصادفی بااستفاده از روش‌های حل دقیق معمول، امکان‌پذیر نیست؛ ازاین‌رو در این مقاله یک الگوریتم حل فراابتکاری کارا برای حل مدل پیشنهادی ارائه شده است. در این بخش، با توجه به ماهیت حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین که از نوع مسائل با پیچیدگی بسیار زیاد است، یک روش حل فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ممتیک ارائه شده است. نتایج اجرای الگوریتم ژنتیک طی سال‌های اخیر روی مجموعه وسیعی از مسائل برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تأمین در ابعاد بزرگ، حاکی از برتری نسبی این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم های تحولی است. باوجود قدرت الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی، این الگوریتم

دارای یک نقطه‌ضعف از نظر کارایی محدود در قدرت بخشیدن به فرآیند جست‌وجوی محلی است. این نقطه‌ضعف با معرفی الگوریتم ممتیک در مبانی نظری موضوع برطرف شده است که از یک فرآیند جست‌وجوی محلی در هر تکرار الگوریتم ژنتیک بهره می‌برد [۱]. در این مطالعه، یک الگوریتم ممتیک بر پایه الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی محلی متغیر انطباق پذیر برای حل مسئله موردبررسی ارائه شده است. جست‌وجوی فضای جواب توسط الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. بهبود جواب‌ها در هر مرحله از الگوریتم ژنتیک توسط الگوریتم جست‌وجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر انجام می‌شود. از الگوریتم ابتکاری تپه‌نورد نیز برای بیشتر عمق‌بخشیدن به فرآیند جست‌وجوی محلی در الگوریتم جست‌وجوی محلی متغیر انطباق پذیر استفاده شده است. ساختار الگوریتم ممتیک پیشنهادشده در شکل ۴ نشان داده شده است. هر کروموزوم جواب توسط یک ارائه یک بعدی نمایش داده شده است. اندازه این ارائه عبارت است از «مجموع تعداد سطوح خدمت برای بازار محصولات نهایی و خدمات پس‌ازفروش و دوره خدمات پس‌ازفروش».



شکل ۴. ساختار الگوریتم ممتیک بر پایه الگوریتم ژنتیک و جستجوی محلی متغیر انطباق‌پذیر

مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط پیشنهادی با جایگذاری مقادیر متغیرهای حاصل از کدگشایی کروموزوم، به یک زیرمسئله برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل و در چهار گام زیر حل می‌شود.

گام ۱. یک مجموعه جدید، $S1=\{s1\}$، شامل تمامی انتخاب‌های مربوط به مسیرهای ممکن در شبکه زنجیره تأمین برای پاسخگویی به تقاضای بازارها است. بزرگ‌ترین اندازه این مجموعه برابر با $|S1|=\prod_{\forall r\in R} 2^{\left(T^{(r)}-1\right)}$ است.

گام ۲. برای هر $s1 \in S1$، قابلیت اطمینان تسهیلات با هدف پاسخگویی به سطح خدمت sl_p برای محصولات نهایی و سطح خدمت sl_a برای خدمات پس‌ازفروش، تعیین می‌شوند $S2^{(s1)} = \{s2\}$.

$$s2 = \left(rl_r^{(s2)}(\forall r \in R), rl_m^{(s2)}(\forall m \in M), rl_s^{(s2)}(\forall s \in S) \right) \quad (۲۸)$$

تعیین ترکیب قابلیت‌های اطمینان شدنی با تفکیک فواصل پیوسته از قابلیت اطمینان انجام می‌شود. برای نمونه، فرض می‌شود که حداقل مقدار ممکن برای سطح خدمت خدمات پس‌ازفروش و محصولات نهایی به‌ترتیب برابر با ۷۵ و ۹۰ درصد است. پس از جداسازی فاصله اصلی [۱-۰/۹] به فواصل کوچک‌تر به‌اندازه ۰/۰۱ (فواصل محدودشده اما شدنی)، مجموعه ترکیب‌های شدنی تعیین می‌شوند (شکل ۵).

گام ۳. به ازای تمامی $\forall s1 \in S1$ و $\forall s2 \in S2^{(s1)}$، مدل خطی زیر با متغیرهای پیوسته حل می‌شود:

$$Cost^{(s1,s2)}(w, sl) = \bar{D}_r(sl, w, p).\left[\begin{array}{l} h_r^+.E\left(G_r^{-1}\left(Max\left\{ rl_r^{(s2)}, \frac{h_r^-}{h_r^+ + h_r^-} \right\} \right) - \varepsilon_r \right)^+ \\ h_r^-.E\left(\varepsilon_r - G_r^{-1}\left(Max\left\{ rl_r^{(s2)}, \frac{h_r^-}{h_r^+ + h_r^-} \right\} \right) \right)^+ \end{array} \right] + \quad (۲۹)$$

$$\begin{aligned} Min \quad & \sum_{N, S^{(n)}, T^{(s)}} \left(a_1^s + a_2^s \right).\left[x_t + \Delta x_t + x_t'^{(n)} + \Delta x_t'^{(s)} \right] + \sum_{M, T^{(m)}} a^m.\left[x_t + \Delta x_t \right] \\ & + \sum_{S, M, T^{(S)} \cap T^{(m)}} a_{sm}^t.\left[x_t + \Delta x_t \right] + \sum_{M, R, T^{(m)} \cap T^{(r)}} a_{mr}^t.x_t + \sum_{N, s^{(n)}, R, T^{(s)} \cap T^{(r)}} a_{sr}^t.x_t'^{(n)} \end{aligned}$$

$$\sum_{\forall t \in s1 | r \in t} x_t = \bar{D}_r\left(sl_p, sl_a, w, p \right) G_r^{-1}\left(Max\left\{ rl_r^{(s2)}, \frac{h_r^-}{h_r^- + h_r^+} \right\} \right) \quad \forall r \in R \quad (۳۰)$$

$$\Delta x_t = G_{m|m \in t, t}'^{-1}\left(x_t, rl_m^{(s2)} \right) \quad \forall t \in s1 \quad (۳۱)$$

$$x_t'^{(n)} = x_t.AD_n(w, \theta_n, \lambda_n) + z_{rl_r}'^{(s2)}.\sqrt{x_t.VD_n(w, \theta_n, \lambda_n)} \quad \forall t \in s1 \quad (۳۲)$$

$$\Delta x_t'^{\left(s|s \in t, s \in S^{(n)}\right)} = G_{st}''^{-1}\left(x_t + \Delta x_t + x_t'^{(n)}, rl_m^{(s2)} \right) \quad \forall t \in s1, s \in t \quad (۳۳)$$

$$x_t, \Delta x_t, \Delta x_t'^{(s)}, x_t'^{(n)} \geq 0 \quad \forall t \in s1, s \in \{\forall s \in S \mid s \in s1\}, \forall n \in N \quad (۳۴)$$

$$MCost(w,sl) = \underset{\forall s1 \in S1}{Min} \quad \underset{\forall s2 \in S2^{(s1)}}{Min} \quad Cost^{(s1,s2)}(w,sl) \qquad (۳۵)$$

گام ۴. حداقل هزینه ممکن برای $sl = (sl_p, sl_a) \in SL$ و $w \in W$ توسط رابطه (۳۵) مشخص می‌شود. بهترین مسیر انتخاب‌شده، تخصیص جریان و قابلیت اطمینان تعیین‌شده مرتبط با $Mcost(w,sl)$ به ترتیب با $Y^*(w,sl)$، $X^*(w,sl)$ و $RL^*(w,sl)$ نمایش داده می‌شوند.

الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر با استفاده از رویکرد سیستماتیک، از میان نه ساختار همسایگی برای جست‌وجوی همسایگی، برترین را بر اساس سابقه عملکرد انتخاب می‌کند. بهبود در جواب براثر اعمال ساختار همسایگی مدنظر در تکرارهای قبلی، مبنای سنجش عملکرد و انتخاب خواهد بود. این انتخاب توسط چرخه رولت انجام خواهد شد [۱]. علاقه‌مندان برای آشنایی بیش‌تر با ساختارهای همسایگی یادشده می توانند به پژوهش انجام شده توسط حسنی و همکاران (۱۳۹۴) مراجعه کنند [۱].

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

نخست، کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم ممتیک پیشنهادشده در مقایسه با دو الگوریتم فراابتکاری مشابه، بر اساس کیفیت جواب‌ها (مقدار تابع هدف) و زمان حل (برحسب ثانیه) پس از ۱۰ بار اجرای الگوریتم حل، بررسی شده است. در این بخش، نتایج تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش ارائه شده است. برای این منظور، سه مسئله نمونه اصلی و الگوی تولید داده ها از مطالعه انجام‌شده توسط رضاپور و همکاران (۲۰۱۵) به‌عنوان نزدیک‌ترین مسئله مشابه بررسی‌شده در مبانی نظری موضوع برداشت و توسعه داده شده است [۵] (جدول ۱). به‌منظور نمایش سطوح متفاوت محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده، سه سطح مختلف شامل صفر، ۵۰ و ۱۰۰ درصد کل بودجه‌های عدم‌قطعیت برای هریک از مسائل نمونه اصلی (نمایش داده‌شده در جدول ۱) لحاظ شده است؛ درنتیجه، ۹ مسئله نمونه درمجموع بررسی شده است. سطوح صفر و ۱۰۰ درصد بودجه به‌ترتیب نشان‌دهنده قطعیت و عدم‌قطعیت کامل است. سطوح میانی نیز حد متوسط محافظه‌کاری تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهند. تنظیم پارامترهای الگوریتم ممتیک پیشنهادی با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی انجام‌شده و نتایج در جدول ۲ آورده شده است. نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ نشان از برتری الگوریتم ممتیک پیشنهادی در مقایسه با دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و ممتیک بر پایه ژنتیک و جست‌وجوی همسایگی متغیر دارد. نتایج مقایسه با الگوریتم ژنتیک حاکی از اثربخشی فرآیند جست‌وجوی محلی در عمق‌بخشیدن به جست‌وجو و بهبود در کیفیت جواب‌ها است. الگوریتم ژنتیک ازنظر زمان حل برتر از ممتیک است؛ هرچند این برتری تحت‌تأثیر کیفیت پایین جواب آن قرار می‌گیرد. نتایج حل حاکی از آن است که با افزایش

بودجه عدم‌قطعیت، مقدار سود کل زنجیره کاهش یافته که رفتاری محافظه‌کارانه را در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین نشان می‌دهد.

جدول ۱. مسائل نمونه اصلی

مسئله نمونه اصلی	بازارها	خرده‌فروشان	تولیدکنندگان	تأمین‌کنندگان دسته ۱	تأمین‌کنندگان دسته ۲
۱	۱۰	۶	۳	۵	۳
۲	۲۰	۱۲	۵	۱۰	۶
۳	۳۰	۱۸	۷	۱۵	۹

جدول ۲. مقادیر تنظیم‌شده پارامترهای الگوریتم ممتیک بااستفاده از روش تاگوچی (مقادیر انتخابی مشخص‌شده با خط زیرین)

پارامتر	سطوح آزمایش	پارامتر	سطوح آزمایش
تکرار الگوریتم ژنتیک	(۳۰۰،۴۰۰،۵۰۰)	اندازه جمعیت	(۷۵،۵۰،۱۰۰)
تکرار الگوریتم جست‌وجوی متغیر همسایگی انطباق‌پذیر	(۸،۱۲،۱۰)	تکرار الگوریتم تپه‌نورد	(۳،۵،۴)
احتمال جهش (۱ منهای احتمال تقاطع)	(۰/۱،۰/۰،۲/۳)		

مسئله موردبررسی برای یک شرکت تولیدکننده انواع موتور خودرو بررسی شده‌است که برای حفظ مزیت رقابتی نسبت به رقبا، در نظر دارد، رضایت مشتریان را با ارائه خدمات پس‌ازفروش مناسب ارتقا دهد. شرکت تصمیم دارد سطح خدمات پس‌ازفروش را بازبینی کند با توجه به تحلیل اطلاعات مربوط به نرخ تقاضا و برگشت محصولات، استراتژی‌های بازار مانند قیمت خرده‌فروشی، دوره خدمات پس‌ازفروش و سطح خدمت. محصول تولیدی دارای دو قطعه اصلی n_1 و n_2 است. برای تأمین قطعات n_1 و n_2 به‌ترتیب تنها دو $S^{(n1)}=\{s1,s3\}$ و یک $S^{(n2)}=\{s2\}$ تأمین‌کننده وجود دارد. در زنجیره تأمین موردبررسی دو تولیدکننده $M=\{m1,m2\}$ قادر به مونتاژ محصول نهایی هستند که محصولات را به بازارهای هدف توسط خرده‌فروشان $R=\{r1,r2\}$ ارائه می‌کنند. مجموعه مسیرهای بالقوه $T=\{t_{1,2,1,1},t_{1,2,1,2},t_{3,2,2,1},t_{3,2,2,2}\}$ در زنجیره تأمین مستقیم در شکل ۶ نمایش داده شده است. زمان وقوع خرابی در فرایند تأمین‌کنندگان *S1*، *S2* و *S3* که منجر به تولید محصولات بی‌کیفیت یا کاهش توان تولید می‌شود دارای توزیع نمایی به‌ترتیب با میانگین‌های $\mu_1=2$، $\mu_2=2$ و $\mu_3=3$ است. نرخ تولید محصولات بی‌کیفیت برابر با $\gamma_1=10\%$، $\gamma_1=20\%$ و $\gamma_1=5\%$ است. نرخ تولید تأمین‌کنندگان، *S2* و *S3* به ترتیب برابر با ۸۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۹۰۰۰ واحد قطعه در هر دوره است. اطلاعات پارامترهای هزینه‌های تأمین قطعات در جدول ۴ ارائه شده است. نرخ تولید

محصولات نامنطبق در تولیدکننده ۱و ۲ دارای توزیع یکنواخت به‌ترتیب در بازه‌های $[0,\beta_{m=1}=0.15]$و $[0,\beta_{m=2}=0.08]$است. قیمت محصول نیز ثابت است. گزینه‌های خدمات پس از فروش برابر با ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ سال است. استراتژی‌های سطح خدمت عبارت است از: $sl_1=\left(sl_{1p}=0.98,sl_{1a}=0.96\right)$، $sl_2=\left(sl_{2p}=0.90,sl_{2a}=0.95\right)$ و $sl_3=\left(sl_{3p}=0.85,sl_{3a}=0.91\right)$.

میانگین و محدوده اطمینان سه سیگما برای نرخ خرابی قطعات در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. نتایج حل مدل نشان می‌دهد که سطح خدمت و استراتژی‌های خدمات پس‌ازفروش با بیش‌ترین سود برابر با $sl_p^*=0.85,sl_a^*=0.91$ و $w^*=1$ است. قابلیت اطمینان تسهیلات با کم‌ترین هزینه و با توجه به سطح خدمت مدنظر برابر با $rl_{s=1}$=1، $rl_{s=2}$=1، $rl_{s=3}$=0.94، $rl_{m=1}$=0.99، $rl_{m=2}$=0.93، $rl_{r=1}$=0.99 و $rl_{r=2}$=0.99 است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقادیر جریان در شبکه‌های تأمین محصول نهایی و خدمات پس‌ازفروش ارائه شده است.

جدول ۳. مقایسه کارایی الگوریتم ممتیک مبتنی بر ژنتیک با جست‌وجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر

الگوریتم‌های حل							
		الگوریتم ژنتیک		الگوریتم ممتیک مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر		الگوریتم ممتیک مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر	
مسئله نمونه	سهم بودجه عدم‌قطعیت	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل	تابع هدف	زمان حل
۱	۰	۴۱۴۰۹/۰۰	۶۰۹/۰۰	۴۶۳۷۸/۰۸	۷۵۲/۷۲	۴۹۱۱۴/۳۹	۷۰۱/۶۳
	۵۰	۳۹۰۸۶/۰۰	۶۴۶/۰۰	۴۳۸۱۵/۴۱	۸۰۶/۲۱	۴۷۰۵۷/۷۵	۷۶۹/۱۲
	۱۰۰	۳۷۲۹۱/۰۰	۷۱۲/۰۰	۴۱۲۸۱/۱۴	۹۳۷/۷۰	۴۳۳۸۶/۴۷	۹۰۶/۷۶
۲	۰	۶۰۰۴۳/۰۵	۸۰۱/۰۰	۶۳۲۵۹/۷۰	۱۰۱۳/۱۴	۶۴۲۹۰/۷۳	۹۷۹/۷۰
	۵۰	۵۴۷۵۹/۴۹	۸۴۶/۰۰	۶۱۳۸۵/۳۸	۱۰۶۳/۴۲	۶۰۴۸۰/۸۱	۱۰۱۸/۷۶
	۱۰۰	۵۱۵۳۶/۱۶	۹۱۵/۰۰	۵۸۶۶۰/۵۰	۱۱۸۴/۹۳	۵۹۲۶۵/۹۲	۱۱۳۸/۷۱
۳	۰	۸۸۵۶۳/۵۰	۱۱۱۹/۰۰	۹۴۱۹۳/۶۹	۱۵۰۰/۵۸	۹۲۱۱۱/۳۰	۱۴۲۷/۰۵
	۵۰	۸۰۴۹۶/۴۴	۱۲۹۶/۰۰	۹۰۸۵۰/۳۷	۱۶۸۹/۹۸	۸۷۲۳۹/۴۴	۱۶۱۲/۲۴
	۱۰۰	۷۳۱۲۹/۸۱	۱۴۱۴/۰۰	۸۰۵۹۹/۵۲	۱۸۷۴/۹۶	۸۵۲۴۹/۵۱	۱۷۸۳/۰۹

تعیین استراتژی بهینه قیمت. با تحلیل حساسیت مدل نسبت به قیمت، بهترین استراتژی قیمت‌گذاری تعیین می‌شود. با توجه به هزینه تولید و قیمت محصولات رقیب، قیمت محصول در بازه [۱۲–۸] بوده و مدل ریاضی برای مقادیر نمونه قیمت حل می‌شود (شکل ۱۱).

$$D_1\left(p,sl=\left(sl_p,sl_a\right),w\right)=\left(500+200w-250(p-10)-500(1-sl_a)-900\left(1-sl_p\right)\right).\varepsilon_1 \quad (۳۲)$$

$$D_2\left(p, sl=\left(sl_p, sl_a\right), w\right)=\left(400+200w-250(p-10)-500(1-sl_a)-900\left(1-sl_p\right)\right).\varepsilon_2^{(۳۳)}$$

تحلیل ارتباط قیمت-دوره خدمات پس‌ازفروش. برای تحلیل همبستگی دوره خدمات پس‌ازفروش و قیمت در سطح خدمت ثابت، مدل ریاضی برای یک مجموعه نمونه از قیمت‌ها در بازه [۱۲-۸] برای هر گزینه خدمات پس‌ازفروش و سطح خدمت حل می‌شود. سود حاصل برای گزینه‌های سطوح خدمت برابر با sl_{3p}=0.85 و sl_{3a}=0.91 است. تقاطع این توابع نشان‌دهنده قیمت بحرانی است که در آن اولویت گزینه‌ها برای خدمات پس‌ازفروش تغییر می‌کند (جدول ۴). سود دریافت‌شده با توجه به تغییرات قیمت برای تمامی گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش تغییر می‌کند. در یک بازه قیمتی معین، درحالی‌که تابع سود برای یک گزینه خدمات پس‌ازفروش صعودی است، برای دیگر گزینه‌ها می‌تواند نزولی و یا صعودی باشد. مدل به‌صورت مجدد برای گزینه‌های متفاوت خدمات پس‌ازفروش و قیمت با ثابت‌کردن سطح خدمت بر روی دومین گزینه حل می‌شود (sl_{2p}=0.90 و sl_{2a}=0.95) (جدول ۵). در موارد با سطح خدمت بالاتر، قیمت‌های بحرانی با مقادیر بیش‌تر در مقایسه با حالت قبلی رشد داشتند؛ اما همچنان مقادیر آن‌ها به یکدیگر نزدیک است. در سطوح بالاتر خدمت، نتایج حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات قیمت دارند. در این حالت، احتمال ایجاد تغییر در اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش در پی تغییرات کوچک در قیمت بیش‌تر است. نتایج تحلیل مشابه با اولین گزینه سطح خدمت (sl_{1p}=0.98 و sl_{1a}=0.96) در جدول ۶ ارائه شده است. مقایسه قیمت‌های بحرانی نشان می‌دهد که فاصله میان قیمت‌های بحرانی حاصل از سطح خدمت میانی برای سطوح خدمت پایین‌تر، کوچک‌تر است. این فاصله برای سطح خدمت بالاتر کوچک‌تر می‌شود. فواصل کوچک بدان معنا است که اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش از جنبه معیار سود نسبت به تغییرات قیمت حساس‌تر بوده و پایداری کمتری دارد؛ بنابراین با افزایش سطح خدمت، همبستگی بین قیمت و خدمات پس-ازفروش بیش‌تر می‌شود؛ همچنین اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش نسبت به تغییرات قیمت بسیار حساس‌تر است و برای بازه‌های کوچک‌تر قیمت و بالعکس پایدارتر است (جدول ۷).

For $rl_r = 0.9:0.01:1.0\ (\forall r \in R)$
  For $rl_m = 0.9:0.01:1.0\ (\forall m \in M)$
    For $rl_s = 0.9:0.01:1.0\ (\forall s \in S)$
    IF $sl_p \cong \prod_{\left(\forall t \in \left(s1 \cap T^{(r)}\right)\right)} \left(\left(\prod_{(\forall s \in t)} rl_s \right) \times rl_{m|m \in t} \times rl_{r|r \in t} \right)$ and
    IF $sl_a \cong \prod_{\left(\forall t \in \left(s1 \cap T^{(r)}\right)\right)} \left((rl_r)^{|N|} . \prod_{\left(\forall n \in N, s \in S^{(n)} | s \in t\right)} rl_s \right)\ (\forall r \in R)$
      Add $\left(rl_r{}^{(s2)} = rl_r\ (\forall r \in R), rl_m{}^{(s2)} = rl_m\ (\forall m \in M), rl_s{}^{(s2)} = rl_s\ (\forall s \in S) \right)$ into S2
    End;
    End;
  End;
End;

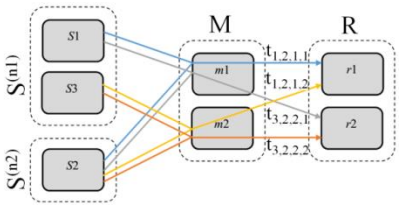
شکل ۵. شبه کد جداسازی فواصل قابلیت اطمینان

جدول ۴. مقادیر پارامترهای هزینه‌های تأمین

پارامتر	مقدار (دلار)	پارامتر	مقدار (دلار)	پارامتر	مقدار (دلار)	پارامتر	مقدار (دلار)
$a_1^{s=1}$	۰/۵۰	$a_{s=1,m=1}^{t}$	۰/۰۵	$a_{s=1,r=1}^{t}$	۰/۰۷	$a^{m=1}$	۲/۰۰
$a_2^{s=1}$	۰/۶۰	$a_{s=2,m=1}^{t}$	۰/۰۸	$a_{s=1,r=2}^{t}$	۰/۰۷	$a^{m=2}$	۲/۱۵
$a_1^{s=2}$	۰/۶۰	$a_{s=2,m=2}^{t}$	۰/۰۸	$a_{s=2,r=1}^{t}$	۰/۰۷	$a_{m=2,r=1}^{t}$	۰/۰۵
$a_2^{s=2}$	۰/۷۰	$a_{s=3,m=2}^{t}$	۰/۰۶	$a_{s=2,r=2}^{t}$	۰/۰۷	$a_{m=2,r=2}^{t}$	۰/۰۵
$a_1^{s=3}$	۰/۵۵	$a_{m=1,r=1}^{t}$	۰/۰۵	$a_{s=3,r=1}^{t}$	۰/۰۷	$h_{r=1 \text{ and } 2}^{+}$	۰/۱۱
$a_2^{s=3}$	۰/۷۰	$a_{m=1,r=2}^{t}$	۰/۰۴	$a_{s=3,r=2}^{t}$	۰/۰۷	$h_{r=1 \text{ and } 2}^{-}$	۰/۰۵

جدول ۵. اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش با توجه به مقادیر قیمت‌ها

محدوده قیمت	اولویت گزینه‌های خدمات پس از فروش	محدوده قیمت	اولویت گزینه‌های خدمات پس از فروش
$9 < p \le 10$	۱، ۰/۵، ۱/۵ و ۲	$10.80 < p \le 11.10$	۱/۵، ۱، ۲ و ۰/۵
$10.10 < p \le 10.55$	۱، ۱/۵، ۰/۵ و ۲	$11.10 < p \le 11.45$	۱/۵، ۲، ۱ و ۰/۵
$10.55 < p \le 10.80$	۱/۵، ۱، ۰/۵ و ۲		



شکل ۶. ساختار شبکه و مسیرهای بالقوه شبکه زنجیره تأمین در مسئله نمونه

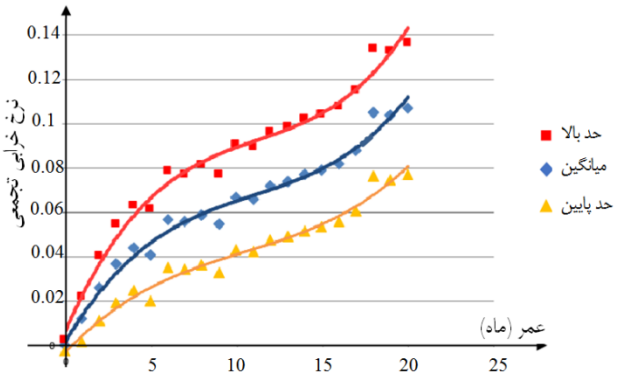
جدول ۶. اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش با توجه به مقادیر قیمت‌ها

محدوده قیمت	اولویت گزینه‌های خدمات پس از فروش	محدوده قیمت	اولویت گزینه‌های خدمات پس از فروش
$p \leq 10.45$	۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲	$11.65 < p \leq 12.00$	۱/۵، ۱، ۲ و ۰/۵
$10.45 < p \leq 11.15$	۱، ۰/۵، ، ۱/۵ و ۲	$12 < p \leq 12.26$	۱/۵، ۲، ۱ و ۰/۵
$11.15 < p \leq 11.65$	۱، ۱/۵، ، ۰/۵ و ۲	$12.26 \leq p$	۲، ۱/۵، ۱ و ۰/۵

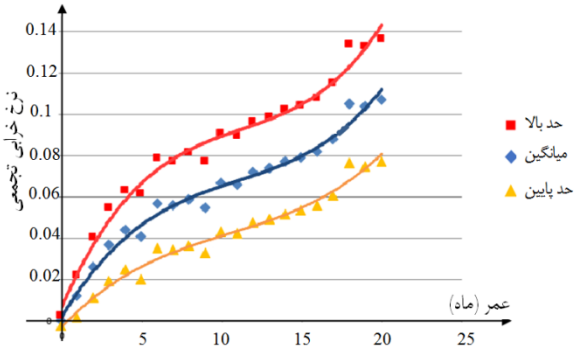
تحلیل ارتباط سطح خدمت - دوره خدمات پس‌ازفروش. رابطه خدمات پس‌ازفروش و سطح خدمت برای قیمت ثابت در شکل ۱۲ بررسی شده و حاکی از نبود اندرکنش میان توابع سود برای گزینه‌های مختلف سطح خدمت است؛ درنتیجه اولویت گزینه‌های سطح خدمت با تغییر خدمات پس‌ازفروش تغییر نمی‌کند. بیش‌ترین سود همواره متعلق به پایین‌ترین سطح خدمت است؛ درنتیجه برای یک قیمت مشخص، اولویت گزینه‌های سطح خدمت تغییر معناداری در پی تغییر خدمات پس‌ازفروش ندارد. اولویت گزینه‌های سطح خدمت معمولاً پایدار است و به‌راحتی تحت‌تأثیر تغییر خدمات پس‌ازفروش قرار نمی‌گیرد. رابطه متقابل سطح خدمت–خدمات پس‌ازفروش بسیار پایدارتر از رابطه خدمات پس از فروش - قیمت است؛ باوجود این، پایداری رابطه خدمات پس‌ازفروش - قیمت می‌تواند با افزایش حساسیت پارامتر سطح خدمت در تابع تقاضا تغییر کند. در شکل ۱۳ برای یک استراتژی مدنظر، ارتباط دو استراتژی دیگر ارائه شده است.

جدول ۷. اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش با توجه به مقادیر قیمت‌ها

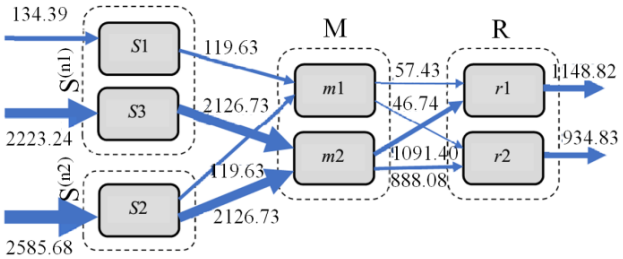
محدوده قیمت	اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش	محدوده قیمت	اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش
$p \leq 11.38$	۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲	$12.55 < p \leq 12.74$	۱/۵، ۱، ۲ و ۰/۵
$11.38 < p \leq 12.2$	۱، ۰/۵، ۱/۵ و ۲	$12.74 < p \leq 12.85$	۱/۵، ۲، ۱ و ۰/۵
$11.15 < p \leq 11.65$	۱، ۱/۵، ۰/۵ و ۲	$12.85 < p$	۲، ۱/۵، ۱ و ۰/۵
$12.41 < p \leq 12.55$	۱/۵، ۱، ۰/۵ و ۲		



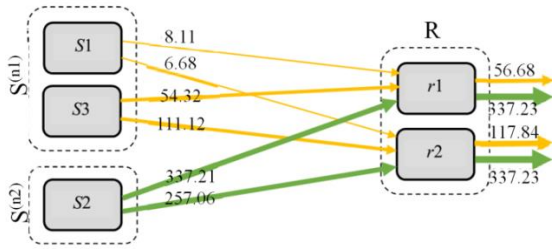
شکل ۷. نرخ خرابی قطعه نخست با توجه به دوره عمر آن



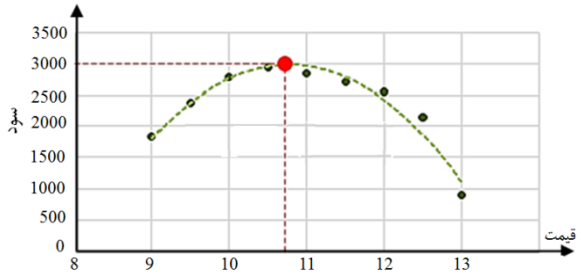
شکل ۸. نرخ خرابی قطعه دوم با توجه به دوره عمر آن



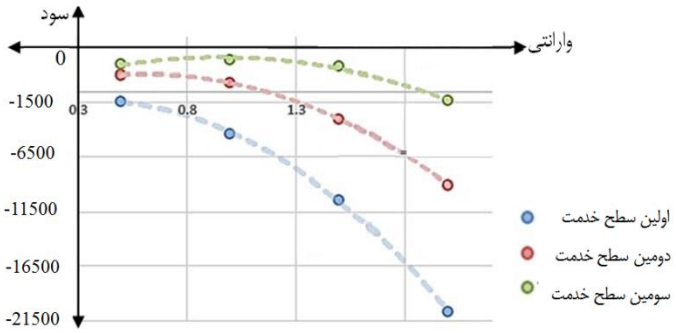
شکل ۹. جریان در شبکه زنجیره تأمین مستقیم



شکل ۱۰. جریان در شبکه خدمات پس از فروش



شکل ۱۱. رفتار تابع سود در برابر قیمت ثابت ۱۰ دلار



شکل ۱۲. نمایش همبستگی میان سطح خدمت و خدمات پس‌ازفروش

w=	۰/۵	۱/۰	۱/۵	۲/۰
(۰/۹۱و ۰/۸۵)	۱۰/۵	۱۰/۸	۱۱/۷	۱۲/۶۵
(۰/۹۵و ۰/۹۰)	۱۰/۸	۱۱/۹	۱۲/۸	۱۳/۵
(۰/۹۶و ۰/۹۸)	۱۱/۴	۱۳/۱	۱۳/۷	۱۴/۳

شکل ۱۳. تغییرات سه استراتژی بازاریابی: قیمت، سطح خدمت و دوره خدمات پس‌ازفروش

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مدل ارائه‌شده برای انتخاب استراتژی‌های بازاریابی برای مدیریت زنجیره تأمین به دو مسئله پرداخته شده است که عبارت‌اند از: ۱. مدل‌سازی همبستگی میان فرآیندهای زنجیره تأمین محصولات نهایی و خدمات پس‌ازفروش با درنظرگرفتن پویایی جریان‌ها به‌صورت توأم؛ ۲. درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در عملکرد تسهیلات زنجیره و انتشار آن در سطح شبکه. به این منظور، مجموعه‌ای از روابط کمی‌سازی شده است که عبارت‌اند از: ارتباط بین قابلیت اطمینان تسهیلات و سطح خدمت زنجیره تأمین؛ ارتباط بین قابلیت اطمینان تسهیلات و پویایی جریان و ارتباط بین سطح خدمت زنجیره تأمین و استراتژی‌های بازاریابی. ارتباط بین استراتژی‌های بازاریابی تحلیل‌شده و چگونگی اثرگذاری تغییر در یک استراتژی بر بهترین انتخاب دیگر استراتژی‌های

بررسی شده است. تحلیل همبستگی بین قیمت و دوره خدمات پس‌ازفروش نشان می‌دهد که با افزایش سطح خدمت، این همبستگی شدت بیش‌تری می‌یابد؛ درنتیجه، اولویت گزینه‌های خدمات پس‌ازفروش حساسیت بیش‌تری نسبت به تغییرات قیمت دارد. تحلیل همبستگی بین سطح خدمت و خدمات پس‌ازفروش نشان می‌دهد که در بازار، رابطه متقابل سطح خدمت و خدمات پس‌ازفروش نسبت به رابطه بین خدمات پس‌ازفروش و قیمت، بسیار پایدارتر است؛ هرچند رابطه بین سطح خدمت و خدمات پس از فروش با افزایش ضریب سطح خدمت در تابع تقاضا می‌تواند تغییر کند؛ همچنین نتایج حل نشان می‌دهد که با مواجه با سطوح بالاتر عدم‌قطعیت، زنجیره تأمین رفتار محافظه‌کارانه‌تری اتخاذ می‌کند و سود کلی آن کاهش می‌یابد. با توجه به پیچیدگی‌های زیاد حل مدل ارائه‌شده، یک روش حل فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ممتیک ارائه شده است که برای جست‌وجوی فضای جواب از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و بهبود کیفیت جواب‌ها در هر مرحله توسط الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر انطباق‌پذیر انجام می‌شود. نتایج سنجش کارایی الگوریتم حاکی از برتری معنادار آن از نظر کیفیت جواب است که حاکی از اثربخشی مثبت استفاده از یک ساختار سیستماتیک برای انتخاب ساختارهای همسایگی حین فرآیند بهبود جواب است. بازتولید قطعات معیوب برای تأمین نیاز خدمات پس ازفروش نیز می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار جدید دیگر در پژوهش‌های آتی بررسی شود؛ همچنین دیگر معیارهای ارزیابی با توجه به فضای تصمیم‌گیری مسئله موردبررسی نظیر حداکثرکردن سطح پاسخ و حداقل‌کردن میزان ضایعات با توسعه مدل چندهدفه نیز در نظر گرفته شوند.

منابع

۱. حسنی، علی‌اکبر؛حسینی، محمدحسن (۱۳۹۴). ارائه یک مدل جامع استوار دوهدفه و الگوریتم ممتیک برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برگشتی تحت شرایط عدم‌قطعیت. *فصلنامه چشم‌انداز مدیریت صنعتی. ۱۶*، ۹-۳۲.

2. Bijvank, M., G. Koole, & I.F.A.Vis, (2010). Optimising General Repair Problem with a Service Constraint. *European Journal of Operational Research, 204,* 76-85.

3. Davies, A., T. Brady, and M. Hobday, (2006). Charting a Path Towards Integrated Solutions. *MIT Sloan Management Review, 47,* 39-48.

4. Li, G., F.F. Huand, T.C.E. Cheng, & Q. Zheng, (2014). Make-Or-Buy Service Capacity Decision in a Supply Chain Providing After-Sales Service. *European Journal of Operational Research, 239,* 377-388.

5. Rezapour, S., R. Singh, J.K. Allen, & F. Mistree, (2015). Stochastic Supply Networks Servicing Pre- and After-Sales Markets. in Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences &Computers and Information in Engineering Conference. *Boston, Massachusetts, USA.*

6. Gaiardelli, P., N. Saccani, & L. Songini, (2007). Performance Measurement of The After-Sales Service Network - Evidence From The Automotive Industry. *Computers in Industry, 58,* 698-708.

7. Bacchetti, A. & N. Saccani, (2012). Spare Parts Classification and Demand Forecasting For Stock Control: Investigating The Gap Between Research and Practice. *Omega, 40,* 722-737.

8. Kosnik, T., M. Wong, D.J. Ji, & K. Hoover, (2006). Outsourcing Vs Insourcing In The Human Resource Supply Chain: A Comparison of The Five Generic Models. *Personnel Review, 35(6),* 671-684.

9. Kurata, H. & S.H. Nam, (2013). After-Sales Service Competition in a Supply Chain: Does Uncertainty Affect The Conflict Between Profit Maximization and Customer Satisfaction? *International Journal of Production Economics, 144,* 268-280.

10. Park, M., K.M. Jung, & D.H. Park, (2013). Optimal Post-Warranty Maintenance Policy with Repair Time Threshold For Minimal Repair. *Reliability Engineering & System Safety, 111,* 147-153.

11. Shahanaghi, k., R. Noorossana, S.G. Jalali-Naini, & M. Heydari, (2013). Failure Modeling and Optimizing Preventive Maintenance Strategy During Two-Dimensional Extended Warranty Contracts. *Engineering Failure Analysis, 28,* 90–102.

12. Vahdani, H., H. Mahlooji, & A.E. Jahromi, (2013) Warranty Servicing For Discretely Degrading Items with Non-Zero Repair Time Under Renewing Warranty. *Computers & Industrial Engineering, 65,* 176–185.

13. Wang, W., (2012). A Stochastic Model for Joint Spare Parts Inventory and Planned Maintenance Optimization. *European Journal of Operational Research, 216,* 127-139.

14. Oner, K.B., G.P. Kiesmuller, & G.J. Van Houtum, (2010). Optimization of Component Reliability in The Design Phase of Capital Goods. *European Journal of Operational Research, 205,* 615-624.

15. Chien, Y.H. & J.A. Chen, (2008). Optimal Spare Ordering Policy Under a Rebate Warranty. *European Journal of Operational Research, 186,* 708-719.

16. Chen, X., L. Li, & M. Zhou, (2012). Manufacturer's Pricing Strategy for Supply Chain with Warranty Period-Dependent Demand. *Omega, 40,* 807-816.

17. Hartman, J.C. & K. Laksana, (2009). Designing and Pricing Menu of Extended Warranty Contracts. *Naval Research Logistics, 56,* 199-214.

18. Su, C. & J. Shen, (2012). Analysis of Extended Warranty Policies with Different Repair Options. *Engineering Failure Analysis, 25,* 49–62.

19. Tsoukalas, M.Z. & G.K. Agrafiotis, (2013). A New Replacement Warranty Policy Indexed By The Product's Correlated Failure and Usage Time. *Computers & Industrial Engineering, 66,* 203–211.

20. Zhou, Z., Y. Li, & K. Tang, (2009). Dynamic Pricing and Warranty Policies for Products with Fixed Lifetime. *European Journal of Operational Research, 196,* 940–948.

21. Gupta, S. & D.R. Lehmann, (2007). Managing Customers As Investments: The Strategic Value of Customers in The Long Run. Pearson Education as Wharton School Publishing, Upper Saddle Reviser: NJ.

22. Barabadi, A., J. Barabady, & T. Markeset, (2014). Application of Reliability Models with Covariates in Spare Part Prediction and Optimization – A Case Study. *Reliability Engineering and System Safety, 123,* 1-7.

23. Wu, C.H., (2012). Price and Service Competition Between New and Remanufactured Products in a Two-Echelon Supply Chain. *International Journal of Production Economics, 140,* 496-507.

24. Kurata, H. & S.H. Nam, (2010). After-Sales Service Competition In A Supply Chain: Optimization of Customer Satisfaction Level or Profit Or Both? *International Journal of Production Economics, 127,* 136-146.

25. Khajavi, S.H., J. Partanen, & J. Holmstron, (2013). Additive Manufacturing In The Spare Parts Supply Chain. *Computers in Industry, 65(1),* 50-63.

26. Eskandarpour, M., E. Nikbakhsh, & S.H. Zegordi, (2014). Variable Neighborhood Search For The Bi-Objective Post-Sales Network Design Problem: A Fitness Landscape Analysis Approach. *Computers & Operations Research, 52,* 300–314.

27. Eskandarpour, M., S.H. Zegordi, & E. Nikbakhsh, (2013). A Parallel Variable Neighborhood Search for The Multi-Objective Sustainable Post-Sales Network Design Problem. *International Journal of Production Economics, 145(1),* 117–131.

28. Faridimehr, S. & S.T.A. Niaki, (2012). A Note On Optimal Price, Warranty Length and Production Rate for Free Replacement Policy in Static Demand Markets. *Omega, 40,* 805-806.

29. Lieckens, K.T., P.J. Colen, & M.R. Lambrecht, (2013). Optimization of a Stochastic Remanufacturing Network with an Exchange Option. *Decision Support Systems, 54,* 1548-1557.

30. Rappold, J. & B.D.V. Roo, (2009). Designing Multi-Echelon Service Parts Networks with Finite Repair Capacity. *European Journal of Operational Research, 199,* 781-792.

31. Sahba, P. & B. Balcioglu, (2011). The Impact of Transportation Delays on Repairshop Capacity Pooling and Spare Part Inventories. *European journal of Operational Research, 214,* 674-682.

32. Wu, C.C., C.Y. Chou, & C. Huang, (2009). Optimal Price, Warranty Length and Production Rate for Free Replacement Policy in The Static Demand Market. *Omega, 37,* 29- 39.

33. Rao, B.M., (2011). A Decision Support Model For Warranty Servicing of Repairable Items. *Computers and Operations Research, 38,* 112–130.

34. Sana, S.S., (2010). An Economic Production Lot Size Model in an Imperfect Production System. *European Journal of Operational Research, 201,* 158-170.

35. Bernstein, F. & A. Federgruen, (2004). A General Equilibrium Model For Industries With Price and Service Competition. *Operations Research, 52(6),* 868-886.