فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۹۵، تابستان ۱۳۹۹، ۲۵۶-۲۲۵

ارائه مدل مدیریت موجودی پایدار با تقاضای تصادفی آزاد- توزیع در یک زنجیره تامین تک سطحی

شیرین شعاع بین* سید مهدی سجادی فرد**
اصغر آقایی*** میلاد آقایی**** محمدرضا فتحی *****

دریافت: ۹۸/۲/۱۷ پذیرش: ۹۸/۹/۱۰

مدیریت موجودی پایدار / تقاضای آزاد-توزیع / اتلاف انرژی / رویکرد min-max

چکیده

امروزه در زنجیره تامین با رویکردهای جدیدی روبه‌رو هستیم که به ملاحظات زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی می‌پردازد و همین امر موجب پیچیدگی بیشتر مسایل آن و به ویژه حوزه مدیریت موجودی می‌گردد. یکی از این رویکردها، رویکرد پایداری است. از این رو، مساله پژوهش پیش رو یک مسأله مدیریت موجودی پایدار است که در آن، تقاضا در مدت زمان تحویل یک متغیر تصادفی، تابع توزیع آن نامعلوم، اما میانگین و واریانس آن مشخص است. در این راستا، این پژوهش برای حل چنین مشکلی، با استفاده از رویکرد min-max و کران اسکارف، تابع هدف مسأله مورد نظر را به ازای بدترین حالت (بدترین تابع توزیع تقاضا)

*. کارشناس ارشد مهندسی صنایع گرایش لجستیک و زنجیره تامین، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
**. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
***. استادیار گروه لجستیک، دانشگاه علوم انتظامی امین، ایران
****. دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی دانشگاه علامه طباطبایی(ره) و عضو هیات علمی دانشگاه علوم انتظامی امین، ایران
milad.aghaee@ymail.com
*****. استادیار گروه مدیریت صنعتی و مالی، دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران
■ میلاد آقایی، نویسنده مسئول

بهینه‌سازی کرده است. نتایج بهینه‌سازی مسأله در شرایط در نظرگرفته شده، نشان‌دهنده آن است که جنبه‌های پایداری در تعیین مقدار بهینه سفارش و همچنین وسیله نقلیه مناسب برای حمل سفارش و در نتیجه، هزینه‌های کلی یک سیستم نقش به سزایی دارد. به این ترتیب، در مسافت‌های طولانی‌تر به دلیل در نظرگرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی، هر چه مسافت بین محل سفارش‌دهی تا محل تامین سفارش بیشتر شود، وسائل نقلیه با فاکتور اتلاف انرژی کمتر انتخاب می‌شوند و در مقابل، اندازه سفارش‌دهی افزایش می‌یابد.

طبقه‌بندی JEL : C61,Q40

مقدمه

امروزه اهمیت رویکردهای نوین از جمله پایداری در زنجیره تامین به گونه‌ای است که پایداری فعالیت‌های صنعتی برای بسیاری از شرکت‌ها به موضوع مهمی تبدیل شده است و می‌توان گفت، یکی از فاکتورهای مهم ارزیابی شرکت‌ها، پایداری است. در این شرایط و در مقابل فشارهای دولت، مشتریان و دیگر ذینفعان، شرکت‌ها و سازمان‌ها به دنبال اجرای طرح‌هایی هستند که اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های آنها را کاهش دهد و در عین حال، همچنان شرکت را سودده نگاه دارد[1]. در این راستا، یکی از فعالیت‌های تاثیرگذار در مباحث پایداری و زنجیره تامین، مدیریت موجودی است. تصمیم‌گیرندگان در بخش مدیریت موجودی همواره به دنبال یافتن مقدار بهینه سفارش‌دهی هستند تا علاوه بر کاهش هزینه‌های خود، پاسخگوی تقاضای مشتریان نیز باشند. در این راستا، اولین مدل مقدار سفارش اقتصادی توسط هریس (۱۹۱۳) ارائه شد و توسعه‌های زیادی برروی آن صورت گرفت؛ اما این گسترش‌ها بدون در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی بود تا اینکه به دنبال این جریان، دسته جدیدی از مسائل مدیریت موجودی به نام مدیریت موجودی پایدار شکل گرفت و در آن با یافتن مقدار بهینه سفارش‌دهی، نه تنها کاهش هزینه‌ها و افزایش سود حاصل می‌گردد، بلکه اثرات مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی را نیز کاهش داده و به عملکرد پایدارتر شرکت کمک می‌کند. در واقع، نقطه اثر اصلی این گونه تصمیم‌گیری‌ها، مربوط به حمل ونقل سفارشات است و تصمیم‌گیرندگان در تعیین اندازه سفارش، علاوه بر آنکه هزینه‌های سفارش‌دهی، نگهداری و کمبود را در نظر می‌گیرند، باید به هزینه‌های ناشی از اثرات زیست‌محیطی نیز توجه و سعی در کاهش آنها داشته باشند. از سوی دیگر همان طور که گفته شد، تصمیم‌گیری برای تعیین مقدار بهینه سفارش‌دهی باید به گونه‌ای باشد که پاسخگوی تقاضا باشد. از طرف دیگر آنچه اغلب شرکت‌ها با آن مواجه هستند، تقاضای غیر قطعی است که در موارد قابل توجهی روند تغییرات آن قابل تشخیص نیست و نمی‌توان تابع توزیع مشخصی را برای آن تعیین کرد و تنها اطلاعات جزئی از آن در اختیار است. در این حالت، مساله موجودی در دسته مسائل آزاد توزیع قرار خواهد گرفت. برای حل این مساله، در رویکرد min-max، تلاش‌هایی به منظور حذف احتیاج به دانش کامل از توزیع تقاضا انجام شده است. بنابر آنچه تشریح گردید، در

1. Bouchery et al, (2012)

مسائل موجودی با شرایطی روبه‌رو هستیم که هر کدام به نوعی بر تصمیم‌گیری تعیین سیاست سفارش‌دهی بهینه تاثیرگذار هستند. از میان این شرایط، شرط پایداری و غیرقطعی بودن تقاضا، مد نظر پژوهش حاضر است و منجر به تعریف مساله این پژوهش می‌گردد. این پژوهش یک مساله مدیریت موجودی پایدار را در حالتی که تقاضا غیر قطعی و میانگین و واریانس آن معلوم است و هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد تابع توزیع آن در دست نیست، در نظر می‌گیرد.

هدف اصلی این پژوهش یافتن مقدار بهینه اقتصادی و نوع وسیله حمل و نقل، به نحوی است که اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی کاهش یابد، کل هزینه‌های لجستیکی سیستم کمینه شود و تقاضای غیر قطعی مشتری به خوبی پاسخ داده شود.

۱. پیشینه پژوهش

اسکارف و دیگران (۱۹۵۸) یک مسأله روزنامه فروش تک دوره‌ای را مد نظر قرار دادند و مقادیر سفارش‌دهی را که کمترین سود مورد انتظار را بیشینه می‌کرد، با در نظر گرفتن توزیع‌های پیوسته‌ی تقاضای کلی با میانگین و واریانس مشخص، تعیین کردند. کاسگی و همکاران[1] (۱۹۶۰) یک رویکرد برنامه‌ریزی پویا را برای مسأله روزنامه فروش چند دوره‌ای با در نظر گرفتن توزیع آزاد پیشنهاد کردند و در پژوهش آنها، تنها اطلاعات در دسترس درباره تقاضا، یک بازه بسته بود که تمام مفاهیم ممکن را پوشش می‌داد. همان نویسندگان در سال ۱۹۶۱ اصول سفارش‌دهی بر اساس رویکرد min-max را تحت همان مسأله قبل ارائه دادند و نتیجه پژوهش خود را با مطالعه قبلی مقایسه کردند. گالگو و مون[2] (۱۹۹۳) برای نتایج حاصل شده از کار اسکارف در سال ۱۹۵۸ در مسأله روزنامه فروش تک دوره‌ای، توسعه‌های متنوعی ایجاد کردند. گالگو (۱۹۹۲) در پژوهش دیگری، رویکرد min-max را به مدل موجودی مرور دائم با افق برنامه‌ریزی نامحدود (R,Q) با احتمال وقوع هزینه‌های کمبود، اضافه کرد. گالگو و مون (۱۹۹۴) تکنیک‌های مشابهی را برای مدل‌های مرور دوره‌ای و دائم با افق برنامه‌ریزی نامحدود، با هزینه‌های پس افت و فروش از دست رفته به‌کار بردند. گالگو و دیگران (۲۰۰۱) مسائل موجودی تصادفی چند دوره‌ای را با توزیع‌های گسسته تقاضا در نظر گرفتند. آن‌ها

1. Kasegai et al
2. Gallego & Moon

فرض کردند که اطلاعات در دسترس برای توزیع تقاضا محدود به گشتاورها، صدک‌های انتخاب شده و یا ترکیبی از آن‌ها شده است. آن‌ها نشان دادند که هدف، کمینه‌سازی بیشینه هزینه مورد انتظار است و بسیاری از مدل‌های موجودی به این شکل می‌توانند به وسیله یک توالی از برنامه‌های خطی حل شوند. یو و دیگران[1] (۲۰۰۷) مدل‌های نوع min-max را برای چندین تابع هزینه‌ای نگهداری و پس افت در نظر گرفتند. برای یک تابع هزینه عمومی، آن‌ها توزیع‌های مطلوب و نامطلوب را برای تقاضا شناسایی کردند و کران‌هایی برای تابع هزینه فراهم آوردند. مدل‌های بسیار زیادی در ادبیات علمی موجود است که تمرکز اصلی آن‌ها بر روی کاهش اثرات کربن منتشر شده ناشی از فعالیت‌های لجستیکی است. اما مدل‌های کمتری طبقه‌بندی هزینه‌های خارجی را در نظر گرفته است. ونکت[2] (۲۰۰۷) در مطالعه خود با در نظر گرفتن انتشارات کربن ناشی از مصرف انرژی و سوخت در حمل و نقل و انبارش کالاهای فاسد شدنی به مطالعه تاثیرات زیست‌محیطی در مساله موجودی پرداخت. تاو و دیگران[3] (۲۰۱۰) در مقاله خود عملکرد زیست‌محیطی را براساس هزینه‌های آن به‌عنوان یک تابع خطی از مقدار تولید یا سفارش‌دهی در مدل EPQ و مدل EOQ در نظر گرفتند. ارسلان و ترکای[4] (۲۰۱۳) در مطالعه خود هزینه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی را در مدل EOQ در نظر گرفتند. بن‌جعفر و دیگران[5] (۲۰۱۳) در مقاله خود نشان دادند که چطور هماهنگ کردن سطوح مختلف زنجیره تامین می‌تواند موجب کاهش انتشارات کربن شود. هوا و دیگران[6] (۲۰۱۱) در مقاله خود تاثیر سازوکار تجارت انتشار گازهای گلخانه‌ای در زنجیره‌تامین را بررسی کردند. بنی و جابر[7] (۲۰۱۱) در مقاله خود جنبه‌هایی از مدیریت موجودی (مانند بسته‌بندی، زباله‌ها و محل فروشگاه ها) را که منجر به آسیب‌های زیست‌محیطی می‌شود، معرفی کردند و در مدل EOQ کلاسیک، تاثیرات زیست‌محیطی مربوط به سفرهای وسائل نقلیه و دفع زباله‌ها را ارائه دادند. وهاب و دیگران[8] (۲۰۱۱) در مطالعه خود یک مدل زنجیره‌تامین دو سطحی

1. Yue et al
2. Venkat
3. Tao et al
4. Arsalan & Turkay
5. Benjaafar et al
6. Hua et al
7. Bonney & Jaber
8. Wahab et al

را ارائه نمودند که مقدار بهینه هر بار حمل و تعداد بهینه دفعات حمل را با در نظر گرفتن هزینه انتشارات کربن محاسبه می‌کرد. بوچری و دیگران[1] (۲۰۱۲) در مقاله خود، مدل EOQ را به منظور حل مساله چند هدفه توسعه یافته ارائه دادند که هدف آن نه تنها کمینه‌سازی هزینه‌های لجستیکی است، بلکه رسیدن به اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی از دیگر اهداف این مساله است. باتنی و دیگران[2] (۲۰۱۴) مدلی را با هدف توسعه تحلیل هزینه‌های خارجی مدیریت زنجیره‌تامین ارائه دادند. دیگسی و دیگران[3] (۲۰۱۲) در مطالعه خود مقدار سفارش‌دهی پایدار را ارائه دادند که در آن، مقدار سفارش‌دهی پایدار با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های لجستیکی و هزینه‌های زیست‌محیطی در شرایط قطعی بودن تقاضا و مدت زمان تحویل ارزیابی می‌شود. این مشکلات با بکارگیری فاکتور اتلاف انرژی[4] به طور مشترک حل شده‌اند. جونکرز[5] (۱۹۸۱) در مقاله خود مواردی مانند گرم شدن زمین، اسیدی شدن و اثر تروپسفریک را در تابع هزینه‌های خارجی در نظر گرفته است. روبینو و دیگران[6] (۲۰۱۲) در مقاله خود توسعه بیشتری را با اضافه کردن هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از تعمیر و خرید قطعات یدکی انجام گرفته پیشنهاد دادند. دیگسی و دیگران (۲۰۱۳) مدلی را با درنظر گرفتن تقاضا به‌عنوان متغیر تصادفی توسعه یافته ارائه دادند. دیگسی و دیگران (۲۰۱۳) مدت زمان تحویل را به‌عنوان متغیر تصادفی معرفی کرده‌اند. دیگسی و دیگران (۲۰۱۵) درمقاله خود تاثیر راهبردهای مختلف درونی‌سازی[7] را برای هزینه‌های خارجی حمل و نقل (مانند وضع مالیات به ازای انتشار آلاینده‌های مختلف به منظور جبران و کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی که به محیط خارجی یک سیستم موجودی تحمیل می‌شود) بر روی جواب بهینه بررسی کرده‌اند. دیگسی و دیگران (۲۰۱۵) در مقاله خود تقاضای غیرقطعی قطعات یدکی قابل تعمیر را در نظر گرفته‌اند. زادجعفر و غلامیان (۱۳۹۷) در مقاله‌ای به مروری بر مدل‌های موجودی با رویکرد پایداری در زنجیره تأمین پرداختند. بر این اساس، مطالعات پیشین بر حسب ترکیبات مختلف ابعاد پایداری دسته بندی شدند و هر دسته بندی به طور جداگانه مورد تجزیه و

1. Bouchery et al
2. Battini et al
3. Digiesi et al
4. loss factor
5. Jonkers
6. Rubino et al
7. Internalization

تحلیل قرار گرفته است. در پایان نیز با تشریح خلاءهای پژوهشی، پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ارائه گردید. بهرامی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به مدل‌سازی و حل یک سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده چند کالایی با محدودیت‌های تصادفی گنجایش انبار و بودجه پرداختند. در این مقاله یک سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده دو سطحی با یک تامین کننده و چندین فروشنده مورد مطالعه قرار گرفته است. در این سیستم چند محصولی، تامین کننده کالاها را به صورت دوره‌ای برای فروشندگان ارسال می‌کند. با توجه به اینکه در واقعیت در مورد میزان بودجه و فضایی که شرکت‌ها می‌توانند در دسترس داشته باشند، قطعیتی وجود ندارد، محدودیت‌های تصادفی فضای انبار و بودجه تامین کننده و فروشندگان به مدل افزوده شده است. هدف مدل حداقل کردن کل هزینه‌های زنجیره تامین با تعیین مقادیر بهینه سفارش برای هر فروشنده به ازای هر کالا می‌باشد. در انتها ارایه مثال عددی حل شده و تحلیل حساسیت روی پارامترهای تامین کننده و فروشندگان روشن ساخت که توجه به پارامترهای تامین کننده برای کاهش هزینه‌های کل سیستم موثرتر است. زادجعفر و غلامیان (۲۰۱۸) یک مدل ریاضی را برای موجودی پایدار ارائه کرده‌اند که در آن تأثیر عوامل محیطی بر عوامل اجتماعی بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا با اضافه کردن درآمد حاصل از فروش زباله به این مدل، مدل مقدار سفارش اقتصادی (EOQ) را مورد تجدید نظر قرار داده‌اند. در مرحله بعد، با توجه به انتشار گازهای اکسیدهای گوگرد (SO_2) و گازهای اکسید نیتروژن (NO_x) به‌عنوان معیار آلاینده‌های آلی آب، یک دستورالعمل اقتصادی سبز پیشنهاد شده است. مدل کمّی سپس به منظور بررسی وابستگی متقابل بین جنبه‌های زیست‌محیطی و جنبه‌های اجتماعی، با اضافه کردن ارگونومی محیط زیست از لحاظ تأثیر انتشار SO_2 بر سلامت انسان، مدل پایدار ارائه شده است. طالعی‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی چهار مدل جدید مقدار اقتصادی تولید پایدار را توسعه داده‌اند. برای یافتن مقادیر بهینه متغیرهای سیستم موجودی، چهار مشکل مستقل حداکثر سود برای چهار موقعیت مختلف حل شده است. این مدل‌های پیشنهادی شامل یک مدل اساسی هستند که در آن کمبود مجاز نیست و در صورت مجاز نبودن کمبود، مدل‌های فروش، پشتیبان‌گیری کامل و پشتیبان‌گیری جزئی با توجه به انگیزه تولیدکننده برای بهبود سطح خدمات می‌توانند توسط مدیران عملیات انتخاب شوند.

۲. تشریح مسأله

مدل EOQ به‌عنوان یکی از ابتدایی‌ترین مدل‌های مدیریت موجودی، مقدار بهینه سفارش را در تعامل میان هزینه نگهداری و هزینه سفارش‌دهی به‌دست می‌آورد. در مدل‌های توسعه یافته EOQ، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های کمبود نیز در نظر گرفته می‌شود. در این مدل‌ها هزینه حمل و نقل بخشی از هزینه‌های سفارش‌دهی است. اما از آنجایی که براساس رویکرد پایداری در زنجیره تامین، در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی در فعالیت‌های یک شرکت نیز اهمیت بالائی دارد؛ بنابراین در نظر گرفتن هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از کارکرد وسائل نقلیه در یک سیستم، رویکرد مناسبی برای ورود مباحث پایداری به سیاست‌های بهینه آن سیستم است. علاوه بر این در مدیریت زنجیره تامین، انتخاب وسیله حمل و نقل ارتباط تنگاتنگی با سیاست موجودی مورد استفاده و محدودیت‌های جغرافیایی دارد. در این راستا، ارزیابی هزینه‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در محاسبات مربوط به مباحث مدیریت موجودی وارد شده و مدیریت موجودی پایدار را امکان پذیر ساخته است. بدین منظور از فاکتور اتلاف انرژی به‌عنوان یکی از معیارهای سنجش اثرات زیست‌محیطی وسائل نقلیه در یک سیستم استفاده می‌شود. بر این اساس، پژوهش پیش‌رو در نظر دارد در حوزه مسائل مدیریت موجودی پایدار، به بررسی یک سیستم کنترل موجودی تک سطحی بپردازد که در آن، تقاضا در مدت زمان تحویل یک متغیر تصادفی با تابع توزیع احتمال نامعلوم است و تنها میانگین و انحراف معیار آن مشخص است. در واقع انباری را در نظر میگیریم که در آن یک نوع کالا وجود دارد و میانگین تقاضا (μ) و انحراف معیار (σ) هر دو معلوم هستند؛ اما هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره تابع توزیع احتمال آن در دست نیست و یا به دلیل آنکه اطلاعات موجود کافی نبوده، دست‌یابی به تابع توزیعی که رفتار دقیق تقاضا را نشان دهد، امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این شرایط، چنانچه مشتری به این انبار مراجعه کند و سطح موجودی صفر باشد، با کمبود مواجه خواهد شد و این کمبود از نوع پس افت[1] خواهد بود و در طول کل دوره‌ها بر اساس سیستم FIFO به تقاضای عقب افتاده پاسخ داده می‌شود. سیاست سفارش‌دهی در این سیستم مرور دائم (r,Q) است؛ یعنی هر زمان که سطح موجودی به r می‌رسد، به اندازه Q سفارش داده می‌شود و LT واحد زمان بعد، سفارش داده شده از محل

1. Backlog

تامین که در فاصله L نسبت به انبار قرار دارد، با وسیله نقلیه‌ای به سرعت v و فاکتور اتلاف انرژی f، به انبار خواهد رسید. در این حالت، مدت زمان تحویل LT برابر L/v خواهد بود. از آنجایی که مدت زمان تحویل LT در این مسأله کوچک‌تر از طول یک دوره (CT) است، همواره یک سفارش در راه داریم؛ یعنی زمانی که سطح موجودی به r می‌رسد (زمان سفارش)، تعداد سفارش در راه برابر صفر و لحظه‌ای بعد از آن برابرQ است. به این ترتیب می‌توان گفت، $p = \frac{LT}{CT}$ است که در آن p در بازه [۰;۱] قرار دارد. از طرف دیگر؛ $CT = \frac{Q}{D}$, $LT = \frac{r}{D}$. پس می‌توان نتیجه گرفت: $p = \frac{LT}{CT} = \frac{r}{Q}$. در چنین شرایطی سفارش حمل شده Q، هزینه‌هایی با عناوین: هزینه سفارش‌دهی به ازای هر بار سفارش، هزینه حمل و نقل به ازای حمل هر تن سفارش در هر کیلومتر و هزینه زیست‌محیطی به ازای انتشار هر تن گاز گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت در هر کیلومتر، به سیستم تحمیل می‌کند. در شرایطی که مقدار سفارش داده شده کافی نباشد و یا به موقع دریافت نشود، با کمبود مواجه شده و هزینه کمبود نیز به سیستم تحمیل می‌شود. مجموع این هزینه‌ها، هزینه کلی سیستم را تشکیل می‌دهند. بر این اساس، هدف این پژوهش یافتن مقدار بهینه فاکتور اتلاف انرژی (f)، انتخاب وسیله نقلیه بهینه، مقدار بهینه سفارش پایدار (SOQ) و نقطه سفارش مجدد، در حالتی است که تابع توزیع تقاضا در مدت زمان تحویل نامعلوم است؛ به نحوی که هزینه‌های کلی سیستم کمینه گردد و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش یابد. در این حالت، به دلیل آنکه تابع توزیع تقاضا در دست نیست، نمی‌توان براساس رفتار تقاضا سیاست بهینه سفارش را تعیین کرد. به همین دلیل، به سراغ رویکرد min-max در مسائل موجودی رفته و با استفاده از این رویکرد، مقدار بهینه تابع هدف را به ازای بدترین تابع توزیع تقاضا به‌دست می‌آوریم.

۲-۱. فرضیه‌های مدل

- در تقاضای احتمالی با تابع توزیع نامعلوم، تنها میانگین و واریانس آن مشخص است؛
- کمبود جایز است و به صورت پس افت ظاهر می‌شود؛
- تنها یک سفارش در راه داریم و سفارش یک جا دریافت می‌شود؛
- مدت زمان تحویل سفارش قطعی و مقدار آن برابر است با: $LT = L/v$؛
- قیمت کالا در طول مدت برنامه ریزی ثابت است؛
- مدل تک سطحی و تک محصولی است؛

- خط مشی سفارش‌دهی مرور دائم است؛
- حمل و نقل با یک وسیله نقلیه انجام می‌شود و هزینه حمل برای هر سفارش و مدت زمان تحویل حمل به نوع وسیله نقیله در یک مسیر بستگی دارد.
- هر وسیله نقلیه، فاکتور اتلاف انرژی مخصوص به خود را دارد؛

۲-۲. هدف مدل

هدف مدل، کمینه کردن مجموع هزینه‌های سیستم موجودی با تعیین مقدار بهینه سفارش پایدار (SOQ)، نقطه سفارش (r_{opt}) و نوع وسیله نقلیه مناسب برای حمل سفارش (با تعیین f_{opt}) است.

جدول۱- پارامترهای مدل

پارامتر	نام	واحد
D	متغیر تصادفی تقاضا	[unit/period]
μ_D	میانگین تقاضا در سال	[unit/year]
σ_D	انحراف معیار تقاضا در سال	[unit/year]
$\mu_{D_{LT}}$	میانگین تقاضا در مدت زمان تحویل	[unit/h]
$\sigma_{D_{LT}}$	انحراف معیار تقاضا در مدت زمان تحویل	[unit/h]
M	جرم یک واحد کالا	[kg/unit]
LT	مدت زمان تحویل	[h]
C_S	هزینه یک واحد کمبود	[unit.order/€]
$C_T(f, L)$	هزینه حمل یک تن کالا	[t/€]
C_H	هزینه نگهداری یک واحد کالا	[unit.year/€]
C_O	هزینه هر بار سفارش	[order/€]
C_p	قیمت واحد کالا	[unit/€]
L	فاصله حمل و نقل	[km]
T	مدت زمان یک دوره	[h]
v	سرعت وسیله نقلیه	[km/h]

جدول ۲- متغیرهای مدل

متغیر	نام	واحد
F	فاکتور اتلاف انرژی وسیله نقلیه	-
Q	تعداد سفارش	[unit]
R	نقطه سفارش	[unit]
SS	ذخیره احتیاطی	[unit]
SOQ	تعداد سفارش پایدار	[unit]

هزینه‌های سیستم موجودی

هزینه سفارش‌دهی: (۱) $\varphi_o = \frac{D}{Q}.C_O \quad [€/year]$

هزینه خرید: (۲) $\varphi_p = C_p.D \quad [€/year]$

هزینه حمل و نقل: (۳) $\varphi_T = \frac{D}{Q}.C_T(f.L) = D.m[a.f^2 + b.f + c] \quad [€/year]$

هزینه‌های زیست‌محیطی (خارجی): (۴) $\varphi_{EX} = D.L.m\left[f^2\sum \varepsilon_i.\gamma_i + f.\sum \varepsilon_i.\alpha_i + \sum \varepsilon_i.\beta_i\right] \quad [€/year]$

هزینه نگهداری: (۵) $\varphi_h = C_h.\left[\frac{1}{2}.Q + SS\right] \quad [€/year]$

هزینه کمبود: (۶) $\varphi_s = C_s.\frac{D}{Q}\int_r^{+\infty}(D-r).pdf(D)dD \quad [€/year]$

هزینه کل: (۷)

$$K = \frac{D.C_O}{Q} + C_p.D + h.\left[\frac{1}{2}.Q + SS\right] + C_s.\frac{D}{Q}\int_r^{+\infty}(D-r).pdf(D)dD + D.m[a.f^2 + b.f + c] + D.L.m\left[f^2\sum \varepsilon_i.\gamma_i + f.\sum \varepsilon_i.\alpha_i + \sum \varepsilon_i.\beta_i\right] \quad [€/year]$$

کران بالای امید ریاضی تعداد کمبود: (۸)

$$\int_r^{+\infty}(D-r).pdf(D).dD \le \left(\frac{\sqrt{\frac{L}{v}.\sigma^2 + \left(r - \frac{L}{v}.\mu\right)^2} - \left(r - \frac{L}{v}.\mu\right)}{2}\right)$$

پارامتر p

یکی از مفروضات این پژوهش این است که همواره یک سفارش در راه داریم؛ به این معنی که مدت زمان تحویل LT، کوچک‌تر از مدت زمان یک دوره (T) است. به این ترتیب می‌توان گفت $\mathbf{p} = \frac{\mathbf{LT}}{\mathbf{T}}$ است که p در بازه [۰;۱] قرار دارد. از طرفی، از روابط مدیریت موجودی می‌دانیم:

$$LT = \frac{r}{D} \quad , \quad T = \frac{Q}{D} \qquad (۹)$$

پس می‌توان نتیجه گرفت:

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{LT}}{\mathbf{T}} = \frac{r}{Q} \quad (۱۰)$$

بنابراین پارامتر p نرخ بین نقطه سفارش (r) و سطح موجودی در ابتدای هر دوره سفارش‌دهی (مقدار سفارش)،Q، است، همچنین می‌تواند به‌عنوان نرخ بین مدت زمان تحویل و مدت زمان مصرف (یک دوره) معرفی گردد. از طرفی برای یک وسیله نقلیه مشخص، مقدار نقطه سفارش مجدد (r) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$r = D.LT \quad (۱۱)$$

بنابراین با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱) و همچنین با فرض $LT = \frac{L}{v_{(f)}}$، مقدار سفارش به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\mathbf{Q} = \frac{D.L}{p.v(f)} \quad (۱۲)$$

۲-۳. تابع هدف

از آنجایی که کمینه‌سازی تابع هزینه کل در این پژوهش مورد هدف است، با توجه به حد بالای معرفی شده در این رویکرد، بیشترین تعداد کمبود در مدت زمان تحویل محاسبه تا بیشینه تابع هدف (بدترین حالت) به‌دست آید، در نتیجه مسأله این پژوهش نیز به کمینه‌سازی بیشینه تابع هدف تبدیل گردد. بدین منظور، لازم است کران بالای امید ریاضی تعداد کمبود (رابطه ۸) در تابع هدف هزینه کل جایگذاری شود و تابع هدف نهایی مسأله به شکل رابطه (۱۳) درآید.

$$k = \frac{p.C_o.(k_1.f^2+k_2.f+k_3)}{L} + C_p.D + C_h.\left[\frac{1}{2}.\frac{D.L}{p.(k_1.f^2+k_2.f+k_3)} + r - \frac{L.\mu}{(k_1.f^2+k_2.f+k_3)}\right] +$$
$$\frac{C_s.p.(k_1.f^2+k_2.f+k_3)}{2L}.\left(\sqrt{\frac{L.\sigma^2}{(k_1.f^2+k_2.f+k_3)} + \left(r - \frac{L.\mu}{(k_1.f^2+k_2.f+k_3)}\right)^2} - \left(r - \frac{L.\mu}{(k_1.f^2+k_2.f+k_3)}\right)\right) +$$
$$D.m[a.f^2 + b.f + c] + D.L.m[f^2 \sum \varepsilon_i.\gamma_i + f.\sum \varepsilon_i.\alpha_i + \sum \varepsilon_i.\beta_i] \quad (۱۳)$$

۳. بهینه‌سازی و نتایج محاسبات

به منظور بررسی ویژگی‌های مدل به‌دست آمده، باید مدل را به ازای مقادیر پارامترهای مختلف، نسبت به متغیرهای f و r، حل کرد تا خروجی‌های آن مورد ارزیابی قرار بگیرند. رابطه ۱۳ نسبت به متغیر r محدب است؛ چراکه به ازای تمامی‌مقادیر r مشتق دوم تابع هدف

نسبت به r بزرگ‌تر از صفر است. بنابراین می‌توان مقدار بهینه r را به‌دست آورد و این مقدار را که بر حسب متغیر دیگر (f) است، در رابطه ۱۳ جایگذاری کرد. به این ترتیب، در تابع هدف تنها متغیر f ظاهر خواهد شد. همان طور که در مورد فاکتور اتلاف انرژی (f) اشاره شد، برای هر نوع وسیله نقلیه، فاکتور اتلاف انرژی f مشخصی وجود دارد. از طرفی، مدل مسأله مورد بحث در این پژوهش به ازای مسافت‌های (Lهای) مختلف، جواب‌های متفاوتی خواهد داشت. برای هر مسافت L داده شده نیز با توجه به اینکه پارامتر p چه مقداری گرفته است، مقادیر بهینه تابع هدف متفاوت خواهد بود. بنابراین، مقادیر پارامترهای ورودی L و p تعیین کننده سناریوهای حل مدل ارائه شده هستند. در هر سناریو، یافتن مقدار بهینه (f,Q)، یعنی مقادیری که هزینه کلی سیستم موجودی را کمینه کنند، هدف مورد نظر است. بنابراین، ابتدا لازم است مقادیر پارامترهای مسأله مشخص شوند. این پارامترها از نتایج پژوهش دیگسی و دیگران (۲۰۱۵) گرفته شده‌اند و به صورت زیر است.

جدول ۳. مقادیر پارامترها

پارامتر	مقدار
D	9152
Miu	2.6
sigma2	0.47
Co	1
Cp	40
Ch	15.46
Cs	10.06
M	0.5
H	3520
p	0.25, 0.5, 0.75, 0.9, 1

جدول ۴. پارامترهای رگرسیون و هزینه‌های مالی برای هر طبقه اثر زیست‌محیطی

i	E	alpha	beta	gama
1	0.05	0.8115	0.0097	0
2	4	0.0027	0.0005	0
3	30	0.0129	0	-0.0123

جدول ۵. پارامترهای رگرسیون برای سرعت وسیله نقلیه

Value	K
731.9	K1
-370.6	K2
65.4	K3

جدول ۶. مقادیر پارامترهای معادله (۳)

L	a	b	c
200	391.38	-402.35	108.69
300	370.86	-354.62	108.34
400	350.35	-306.9	107.99
500	329.84	-259.17	107.63
1000	227.28	-20.54	105.87
2000	22.168	456.72	102.35
3000	-182.94	933.98	98.82
4000	-388.06	1411.2	95.3
5000	-593.17	1888.5	91.77
10000	-1618.7	4274.8	74.15

با جایگذاری پارامترهای یادشده برای هر L داده شده در جدول ۶ و هر p در جدول ۳، همچنین به ازای $\frac{\partial K}{\partial r} = 0$ برای رابطه ۱۳، مدل در نرم‌افزار MATLAB R۲۰۱۵a کد شد. با بهینه‌سازی رابطه ۱۳، مقدار بهینه فاکتور اتلاف انرژی (f_{OPT}) و به دنبال آن وسیله حمل و نقل بهینه به ازای مسافت‌های متفاوت L مشخص می‌شود. از آنجایی که میانگین سرعت

هر وسیله نقلیه تابعی درجه دو از فاکتور اتلاف انرژی است، با مشخص شدن فاکتور اتلاف انرژی بهینه، میانگین سرعت مناسب $v^*(f_{OPT})$ نیز به‌دست می‌آید. با معرفی $v^*(f_{OPT})$ ، مقدار بهینه سفارش پایدار، SOQ، که تابع هزینه کل را کمینه کند، از طریق رابطه ۱۴ قابل محاسبه است:

$$SOQ = \frac{D.L}{p.v^*(f_{OPT})} \quad (۱۴)$$

مقادیر بهینه، هزینه کل K، نقطه سفارش r، مقدار سفارش پایدار SOQ و فاکتور اتلاف انرژی f به ازای مسافت‌های داده شده L، برای ۵ سناریو مختلف p به‌دست آمده است. لازم به ذکر است که به ازای تمامی pها، مقدار بهینه فاکتور اتلاف انرژی در مسافت‌های مشخص یکسان است. از بین حالات مختلف p، می‌توان p بهینه را به نحوی پیدا کرد که هزینه کل K کمینه‌ترین مقدار را داشته و به این ترتیب، به ازای هر مسافت داده شده L، هم مقدار بهینه فاکتور اتلاف انرژی f_{OPT} مشخص و هم p_{OPT} تعین می‌گردد. در این حالت، مقدار بهینه سفارش پایدار از رابطه ۱۵ و مقدار بهینه ذخیره احتیاطی از رابطه ۱۶ محاسبه می‌گردند. جدول ۷، نتایج بهینه کلی رابطه ۱۳ را به ازای مقادیر f_{OPT}، p_{OPT}، r_{OPT}، SOQ_{OPT}، SS_{OPT}، K_{OPT}، برای مسافت‌های مختلف L نشان می‌دهد.

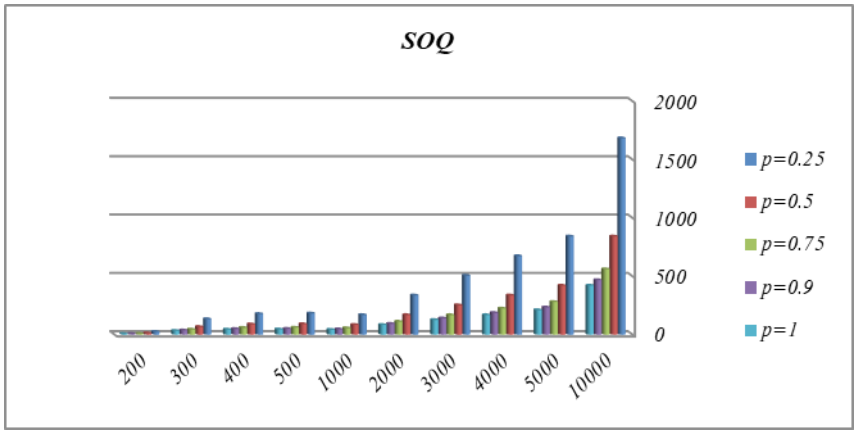
$$SOQ_{OPT} = \frac{D.L}{p_{OPT}.v(f_{OPT})} \quad (۱۵)$$

$$SS_{OPT} = r(opt) - \mu_{D_{LT(opt)}} \quad (۱۶)$$

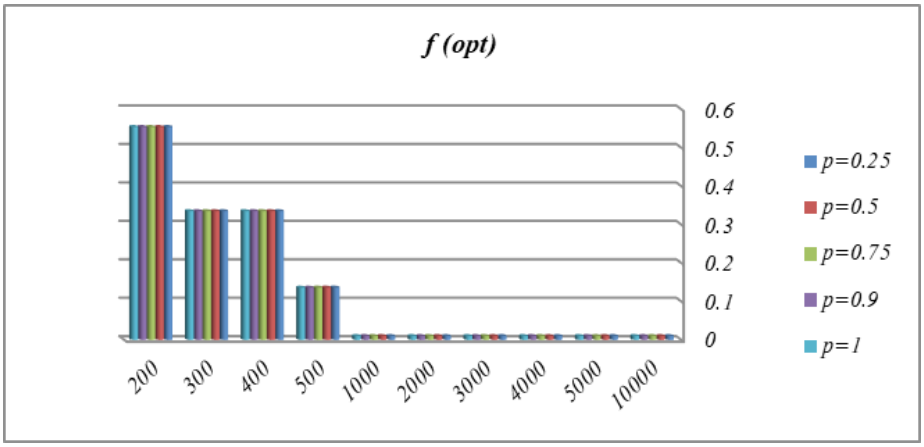
جدول ۷. مقادیر بهینه کلی حل مدل برای مسافت L

L	200	300	400	500	1000	2000	3000	4000	5000	10000
k_{OPT}	514826	657830.6	768296.8	852750.5	882001.9	919131.5	956273.6	993477.8	1030647	1216655
r_{OPT}	14.29	47.40	59.84	60.92	56.10	100.24	142.16	184.08	225.99	435.55
SOQ_{OPT}	24.55	44.47	49.41	50.62	56.12	84.19	126.28	168.37	210.47	420.94
SS_{OPT}	8.15	14.05	15.37	15.36	14.01	16.06	15.88	15.70	15.52	14.61
p_{OPT}	0.25	0.75	0.9	0.9	0.75	1	1	1	1	1
f_{OPT}	0.554	0.335	0.335	0.136	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

نمودارهای ۱ و ۲ نیز مقادیر بهینه مقدار سفارش پایدار، SOQ و فاکتور اتلاف انرژی و f_{OPT} را در مقابل فواصل مختلف برای ۵ مقدار مختلف p، نمایش می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، مقایسه دو نمودار ۱و۲، برای مقادیر مختلف L نشان می‌دهد که نتیجه حل مدل ۱۳ نسبت به f و r، با توجه به سیاست موجودی پایدار، در فواصل طولانی‌تر (بزرگتر از ۵۰۰ کیلومتر)، وسائل نقلیه با سرعت کمتر (مقدار بهینه فاکتور اتلاف انرژی f_{OPT} کمتر) (شکل ۲) و مقدار سفارش بزرگ‌تر (شکل ۱) را انتخاب می‌کند؛ در مسیرهای کوتاه‌تر نیز (کوچکتر یا مساوی ۵۰۰ کیلومتر)، نتیجه حل مدل، وسائل نقلیه با سرعت متوسط و سفارشات با سایز کوچکتر را پیشنهاد می‌کند. پارامتر p معرف نرخ بین مدت زمان تحویل و طول یک دوره است. بررسی دو نمودار ۱ و ۲ برای مقادیر مختلف پارامتر p نشان می‌دهد که تغییرات این پارامتر تاثیری بر روی مقدار بهینه فاکتور اتلاف انرژی f_{OPT} ندارد و به ازای هر ۵ مقدار p در یک فاصله مشخص، مقدار بهینه f یکسان است. در واقع، حتی در حالتی که مدت زمان تحویل کوتاه است (یعنی p=۰٫۲۵)، مدل وسائل‌نقلیه با سرعت خیلی بالا را انتخاب نمی‌کند؛ چراکه این نوع از وسائل نقلیه هزینه‌های زیست‌محیطی سیستم را افزایش می‌دهند. اما در مقابل مدت زمان تحویل کوتاه (کاهش نسبت بین مدت زمان تحویل و طول یک دوره، یعنی همان p منجر به افزایش مقدار SOQ می‌گردد.



نمودار ۱. مقدار بهینه SOQ در مقابل مسافت L برای مقادیر مختلف p



نمودار ۲. مقدار بهینه f در مقابل مسافت L برای مقادیر مختلف p

۵. اعتبارسنجی

همانطور که اشاره شد، تقاضا یک پارامتر غیر قطعی است که تنها اطلاعات جزئی در مورد آن در اختیار است و تابع توزیع آن معلوم نیست و تنها از میانگین و واریانس آن آگاه هستیم. به همین دلیل، بهینه‌سازی مسأله در بدترین شرایط را می‌پذیریم و از رویکرد min-max استفاده می‌کنیم. این محدودیت، دسترسی به اطلاعات کامل برای تقاضا در مدت زمان تحویل و در پی آن بهینه‌سازی بدترین حالت مسأله، هزینه‌هایی را به سیستم تحمیل می‌کنند که همان هزینه‌های نبود اطلاعات و یا به عبارت بهتر، ارزش اطلاعات هستند. حال به منظور سنجش کارایی رویکرد min-max در این مسأله و محاسبه ارزش اطلاعات، مقایسه‌ای میان نتایج محاسباتی حاصل از به کارگیری این رویکرد که در بخش قبل ارائه شد، با حالتی که تابع توزیع تقاضا مشخص است، انجام می‌پذیرد. فرض می‌شود که تقاضا در مدت زمان تحویل، دارای توزیع نرمال با میانگین μ و انحراف معیار σ است[1]. بهینه‌سازی در این حالت انجام شده و نتایج در قالب جدول ۸ ارائه شده است.

1. Digiesi et al., (2015)

جدول ۸. خروجی‌های بهینه‌سازی در حالتی که تقاضا توزیع نرمال دارد

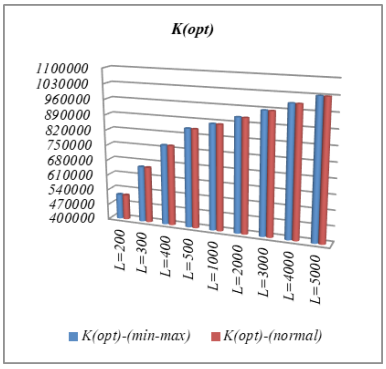
L	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
k_{OPT}	۵۱۴۶۰۴	۶۵۷۴۴۳	۷۶۷۸۷۲	۸۵۲۳۲۹,۹	۸۸۱۵۷۹,۹	۹۱۸۷۰۸	۹۵۵۸۵۱	۹۹۳۰۵۳	۱۰۳۰۲۱۸	۱۲۱۶۱۷۵
r_{OPT}	۸,۱۶	۳۷,۶۱	۴۹,۱۴	۴۷,۶۸	۴۴,۵۳	۸۹,۳۲	۱۳۱,۴۱	۱۷۳,۲۵	۲۱۴,۹۱	۴۲۱,۵۷
SOQ_{OPT}	۲۴,۵۵	۳۷,۰۶	۴۴,۴۷	۴۵,۵۶	۴۶,۷۷	۸۴,۱۹	۱۲۶,۲۸	۱۶۸,۳۷	۲۱۰,۴۷	۴۲۰,۹۴
SS_{OPT}	۲,۰۲	۴,۲۶	۴,۶۷	۲,۱۲	۲,۴۴	۵,۱۳	۵,۱۳	۴,۸۷	۴,۴۴	۰,۶۳
p_{OPT}	۰,۲۵	۰,۹	۱	۱	۰,۹	۱	۱	۱	۱	۱
f_{OPT}	۰,۵۵۴	۰,۳۳۵	۰,۳۳۵	۰,۱۳۶	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۰۱

جدول ۹. اختلاف بین خروجی‌ها در حالتی که تقاضا توزیع نرمال دارد و حالتی که توزیع تقاضا معلوم نیست

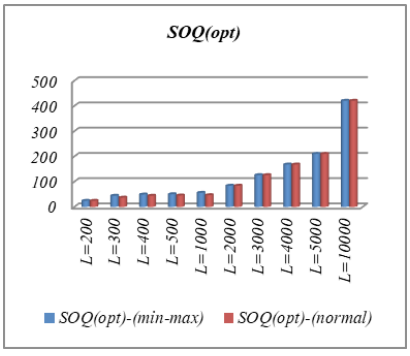
L	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
$k_{OPT_{min-max}} - k_{OPT_{normal}}$	۲۲۲	۳۸۷,۶	۴۲۴,۸	۴۲۰,۶	۴۲۲	۴۲۳,۵	۴۲۲,۶	۴۲۴,۸	۴۲۹	۴۸۰
$r_{OPT_{min-max}} - r_{OPT_{normal}}$	۶,۱۳	۹,۷۹	۱۰,۷	۱۳,۲۴	۱۱,۵۷	۱۰,۹۲	۱۰,۷۵	۱۰,۸۳	۱۱,۰۸	۱۳,۹۸
$SOQ_{OPT_{min-max}} - SOQ_{OPT_{normal}}$	۰	۷,۴۱	۴,۹۴	۵,۰۶	۹,۳۵	۰	۰	۰	۰	۰
$SS_{OPT_{min-max}} - SS_{OPT_{normal}}$	۶,۱۳	۹,۷۹	۱۰,۷	۱۳,۲۴	۱۱,۵۷	۱۰,۹۳	۱۰,۷۵	۱۰,۸۳	۱۱,۰۸	۱۳,۹۸
$p_{OPT_{min-max}} - p_{OPT_{normal}}$	۰	-۰,۱۵	-۰,۱	-۰,۱	-۰,۱۵	۰	۰	۰	۰	۰
$f_{OPT_{min-max}} - f_{OPT_{normal}}$	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

نتایج جدول ۹ و نمودارهای ۳ و ۴ و ۵، نشان می‌دهند که خروجی‌های بهینه‌سازی تابع هدف در حالتی که توزیع تقاضا معلوم نیست، نسبت به حالتی که توزیع تقاضا مشخص است، تفاوت قابل توجهی (با توجه به مقیاس خروجی مورد نظر) ندارد و این نشان از کارایی بالای رویکرد min-max دارد. هزینه سیستم در حالتی که توزیع تقاضا مشخص نیست بیشتر از حالتی است که توزیع معلوم است و این هزینه به دلیل نبود اطلاعات کافی است که به سیستم تحمیل می‌شود. در ردیف اول جدول ۹ ارزش اطلاعات به ازای مسافت‌های مختلف

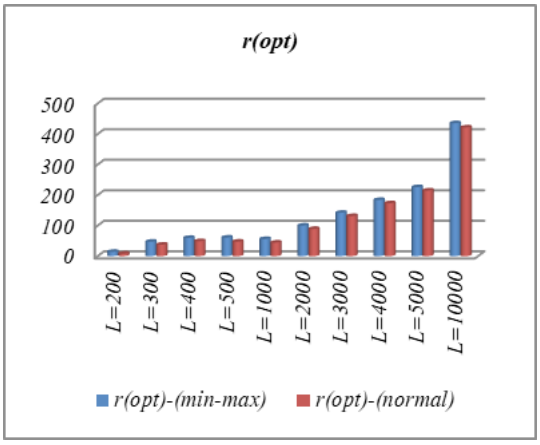
ارائه شده است. به طور کلی، ارزش اطلاعات با افزایش مسافت افزایش می‌یابد. اما این هزینه در مقابل مقدار هزینه کلی سیستم عدد بزرگی نیست. به همین دلیل، نمایش آن به صورت نموداری کار دشواری است (نمودار ۳). به همین ترتیب، مقادیر تعیین شده برای تعداد سفارش پایدار و نقطه سفارش مجدد، در صورت نبود اطلاعات کافی برای تشخیص توزیع تقاضا، مقدار بیشتری نسبت به حالتی که تابع توزیع تقاضا معلوم است، دارند (نمودار ۴ و ۵). اما نکته مهم این است که مقدار فاکتور اتلاف انرژی در هر دو حالت با هم برابر است و در هردو وسائل نقلیه یکسان برای حمل و نقل انتخاب می‌شود.



نمودار ۳ مقدار تابع هدف در دو حالت نرمال بودن تابع توزیع تقاضا و مشخص نبودن توزیع آن



نمودار ۴ - تعداد سفارش پایدار در دو حالت نرمال بودن تابع توزیع تقاضا و مشخص نبودن توزیع آن

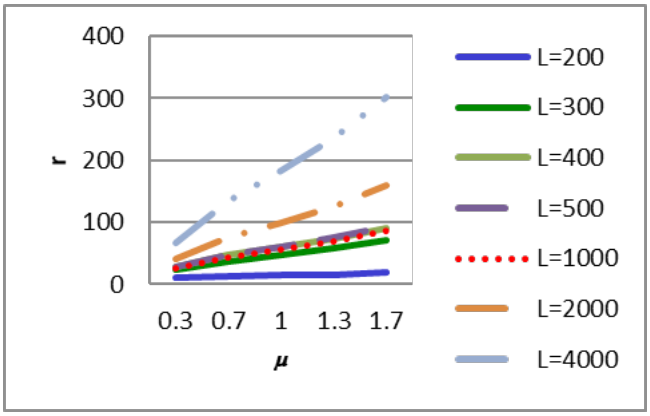


نمودار ۵ - مقدار نقطه سفارش در دو حالت نرمال بودن تابع توزیع تقاضا و مشخص نبودن توزیع آن

۵-۱. تحلیل حساسیت

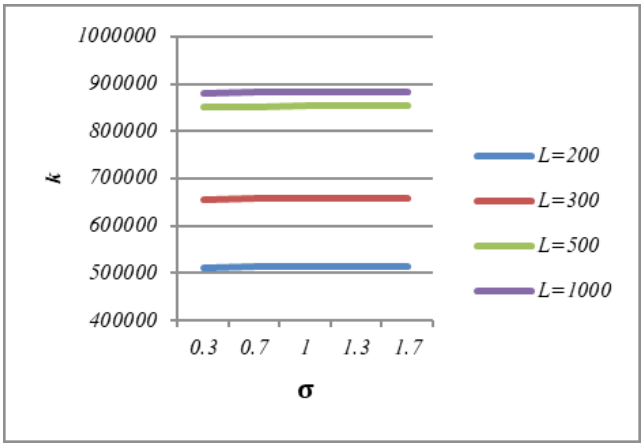
در این بخش به بررسی تغییرات در پارامترهای مفروض اصلی خواهیم پرداخت.

تغییرات میانگین: میانگین تقاضا را در مدت زمان تحویل که یکی از مهمترین پارامترهای ورودی مسأله است، ۳۰ و ۷۰ درصد کاهش و افزایش می‌دهیم. خروجی‌های حل مدل نشان داد که تغییرات مقدار میانگین تقاضا، تنها بر روی مقدار بهینه نقطه سفارش تاثیرگذار است و موجب تغییر در مقدار بهینه r، می‌شود. روند تغییرات نقطه سفارش، برای مسافت‌های مختلف در مقابل تغییرات میانگین تقاضا، در نمودار ۶ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش میانگین تقاضا در هر یک از مسافت‌های داده شده، موجب افزایش مقدار بهینه نقطه سفارش می‌شود و روند افزایش در مسافت‌های طولانی‌تر با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد. در واقع، علت افزایش نقطه سفارش، پاسخگویی به تقاضای افزایش یافته است، تا آنجا که ممکن است به موقع به تقاضا پاسخ داده شود و احتمال بروز کمبود در طول مدت تحویل کم شود. از طرفی نتایج نشان می‌دهد که در مسافت‌های طولانی‌تر به دلیل در نظر گرفتن سیاست پایداری، باید از وسائل نقلیه کندتر استفاده کرد و در مقابل، اندازه سفارش و نقطه سفارش بزرگ‌تر شود. بنابراین افزایش مقدار نقطه سفارش مجدد در مسافت‌های طولانی‌تر ملموس‌تر خواهد بود.

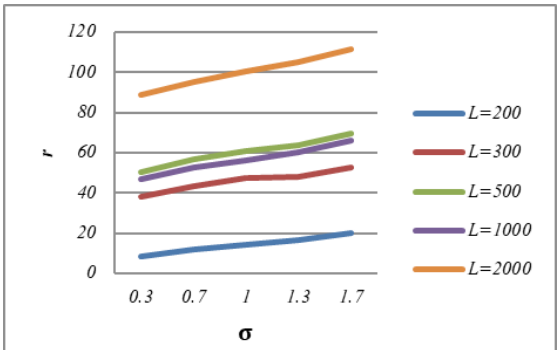


نمودار ۶. تغییرات نقطه سفارش در مقابل تغییرات میانگین تقاضا

تغییرات انحراف معیار: با توجه به خروجی‌های حل مدل ناشی از تغییرات افزایشی و کاهشی انحراف معیار تقاضا در مدت زمان تحویل، تغییرات مقدار σ بر روی مقادیر بهینه، نقطه سفارش مجدد، اندازه سفارش پایدار و ذخیره احتیاطی تاثیر گذاشته و همچنین، تاثیر بسیار کمی بر هزینه کل سیستم دارد؛ به طوری که با افزایش σ، هزینه کل به میزان ناچیزی افزایش می‌یابد. چنانچه در نمودار ۷ ملاحظه می‌شود، شیب تغییرات هزینه کل به ازای تغییرات انحراف معیار، قابل چشم پوشی است.

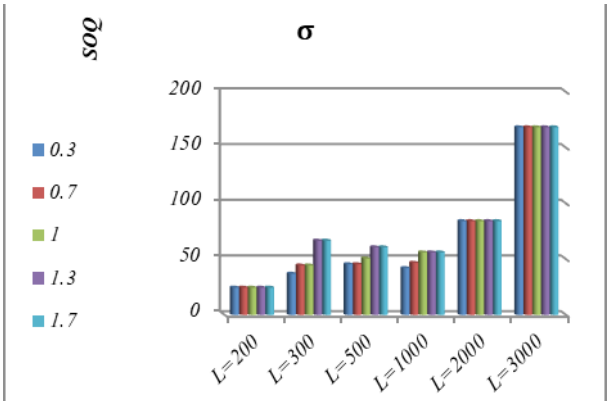


نمودار ۷. تغییرات هزینه کل در مقابل تغییرات انحراف معیار تقاضا



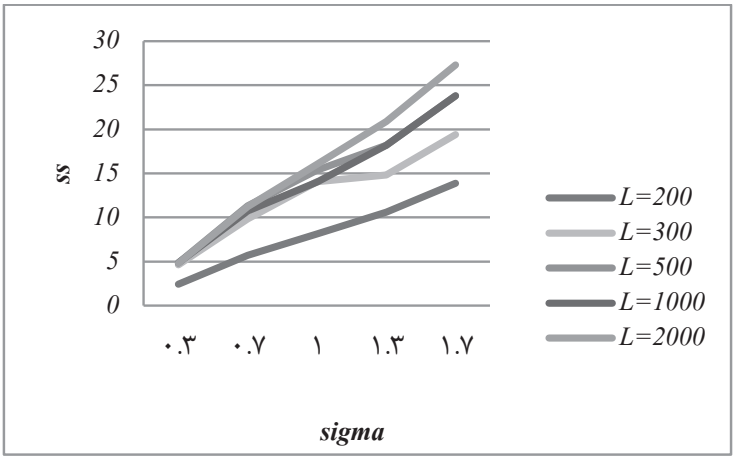
نمودار ۸. تغییرات نقطه سفارش در مقابل تغییرات انحراف معیار تقاضا

روند تغییرات نقطه سفارش مجدد در مقابل افزایش و کاهش انحراف معیار تقاضا، در نمودار ۸ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش انحراف معیار تقاضا موجب افزایش مقدار بهینه نقطه سفارش مجدد در هر یک از مسافت‌های داده شده می‌گردد. روند این تغییرات در مسافت‌های مختلف چندان متفاوت نیست و با شیب ملایمی برای هر مسیر اتفاق می‌افتد. از آنجایی که انحراف معیار تقاضا برخلاف میانگین تقاضا نقش مستقیمی در محاسبه r ندارد، بدیهی است که تغییرات آن نسبت به میانگین، تاثیرات کمتری بر مقدار بهینه نقطه سفارش داشته باشد. در واقع، افزایش نوسانات تقاضا در مدت تحویل، منجر به نگهداری موجودی بیشتر در طول این مدت می‌گردد تا از بروز کمبود جلوگیری شود؛ بنابراین باید نقطه سفارش افزایش یابد.



نمودار ۹. تغییرات مقدار سفارش پایدار در مقابل تغییرات انحراف معیار تقاضا

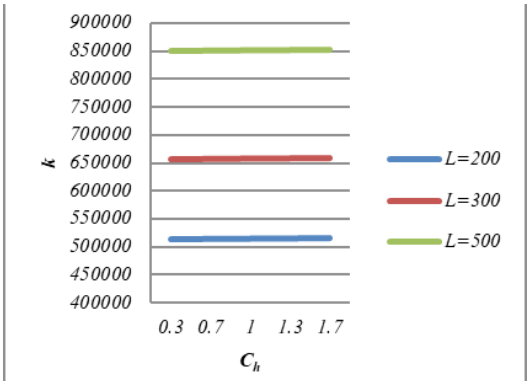
نمودار ۹، تغییرات مقدار بهینه سفارش پایدار را در مقابل افزایش و کاهش انحراف معیار تقاضا در مدت زمان تحویل نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش یا کاهش σ تنها در بازه مسافت بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلومتر، بر مقدار بهینه SOQ تاثیرگذار است. در این بازه برای هر یک از مسافت‌های داده شده، تغییرات مقدار بهینه سفارش پایدار روندی صعودی دارد و با افزایش انحراف معیار تقاضا، افزایش می‌یابد. اما این روند صعودی نیست و در برخی موارد افزایش جزئی انحراف معیار تقاضا بر روی مقدار بهینه SOQ بی تاثیر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، از آنجایی که در فواصل طولانی تر، به علت انتخاب وسیله نقلیه کندتر، مقدار بهینه سفارش پایدار به میزان قابل توجهی بزرگ است؛ بنابراین تغییرات جزئی در نوسانات تقاضا در مقابل حجم قابل توجه مقدار سفارش بی‌تاثیر است و مقدار بهینه SOQ را در فواصل طولانی تغییر نمی‌دهد. در مورد فاصله ۲۰۰ کیلومتری نیز به دلیل آنکه طول مسیر کوتاه است و از وسائل نقلیه سریعتر استفاده می‌شود؛ بنابراین، طول مدت تحویل کوتاه‌تر است و تصمیم‌گیری در مورد اندازه سفارش‌دهی با قطعیت بیشتری انجام می‌پذیرد. در این صورت، تغییرات نوسانات تقاضا در مدت تحویل، تاثیر چندانی بر اندازه سفارش‌دهی ندارد؛ اما در فواصل ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر، به دلیل آنکه نه فاصله خیلی کوتاه و نه اندازه سفارش خیلی بزرگ است؛ بنابراین تغییرات نوسانات تقاضا، در برخی موارد منجر به تغییر مقدار بهینه سفارش پایدار می‌گردد.



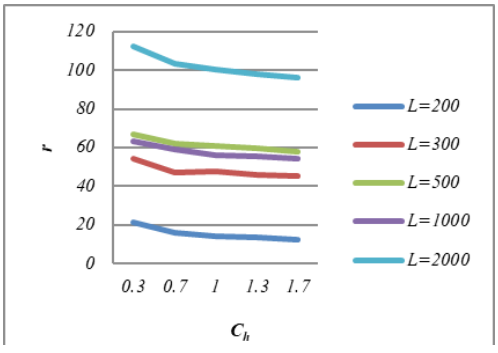
نمودار ۱۰. تغییرات ذخیره احتیاطی در مقابل تغییرات انحراف معیار تقاضا

همانطور که در نمودار ۱۰ مشاهده می‌شود، افزایش انحراف معیار تقاضا در مدت تحویل به شدت موجب افزایش ذخیره احتیاطی می‌شود که این امر به دلیل تاثیر مستقیم انحراف معیار تقاضا در محاسبه ذخیره احتیاطی است؛ چرا که فلسفه اصلی نگهداری موجودی تحت عنوان ذخیره احتیاطی، مقابله با نوسانات ناشی از تقاضاست. بنابراین، کوچکترین تغییر در انحراف معیار تقاضا، ذخیره احتیاطی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و افزایش نوسانات تقاضا منجر به افزایش مقدار بهینه ذخیره احتیاطی و کاهش آن نیز منجر به کاهش مقدار بهینه ذخیره احتیاطی می‌شود.

تغییرات هزینه نگهداری: تغییر در هزینه نگهداری منجر به بروز تغییراتی در مقادیر بهینه متغیرهای نقطه سفارش مجدد، اندازه سفارش پایدار و ذخیره احتیاطی می‌شود و تاثیر بسیار کمی بر روی هزینه کلی سیستم دارد؛ به طوری که با افزایش هزینه نگهداری، هزینه کل افزایش می‌یابد؛ اما این روند افزایشی با شیب بسیار کم اتفاق می‌افتد (نمودار ۱۱).

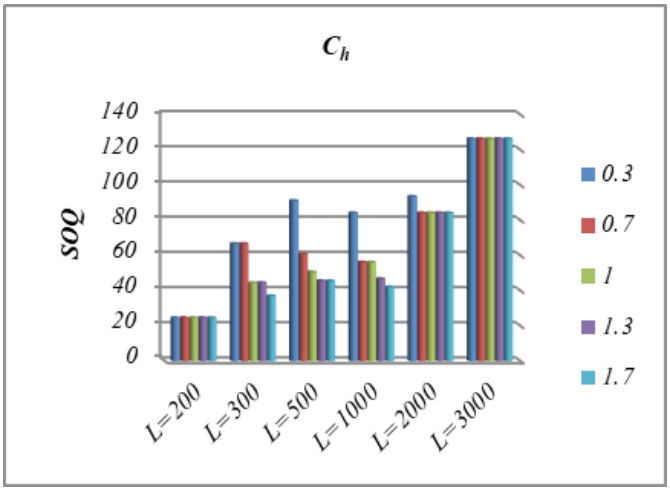


نمودار ۱۱. تغییرات هزینه کل در مقابل تغییرات هزینه نگهداری



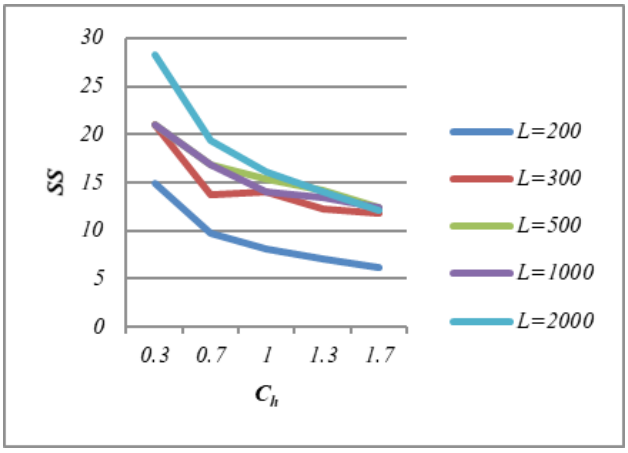
نمودار ۱۲. تغییرات نقطه سفارش در مقابل تغییرات هزینه نگهداری

تغییرات هزینه نگهداری رابطه معکوسی با مقدار بهینه نقطه سفارش مجدد دارد؛ به این صورت که افزایش هزینه نگهداری منجر به کاهش مقدار بهینه نقطه سفارش مجدد می‌شود و برعکس. اما همان طور که در نمودار (۱۲) نیز مشاهده می‌شود، روند تغییرات مقدار بهینه نقطه سفارش مجدد در اثر کاهش یا افزایش هزینه نگهداری، با شیب ملایمی اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، افزایش هزینه نگهداری باعث می‌شود برای کاهش هزینه‌های کلی سیستم، تا حدودی از نگهداری اقلام در مدت زمان تحویل خودداری شود؛ تا آنجا که با کمبود مواجه نشود و از حمل و نقل‌های اضافی سیستم که منجر به آلودگی محیط زیست می‌شوند، جلوگیری شود. بنابراین، نرخ کاهش مقدار بهینه نقطه سفارش به میزان قابل توجهی نیست. به همین ترتیب، افزایش هزینه نگهداری منجر به کاهش مقدار بهینه سفارش پایدار می‌شود؛ اما این تغییرات تنها در بازه بین ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلومتر رخ می‌دهد؛ چراکه در فواصل کمتر و یا بیشتر از این بازه، هزینه‌های زیست‌محیطی و حمل و نقل ناشی از حمل سفارش‌ها بسیار زیاد است و اجازه کاهش اندازه سفارش‌ها و به دنبال آن، افزایش دفعات رفت و آمد در مسیرهای طولانی را نمی‌دهد تا هدف مساله، یعنی کمینه‌سازی هزینه کل حفظ شود. روند این تغییرات در نمودار (۱۳) نشان داده شده است.



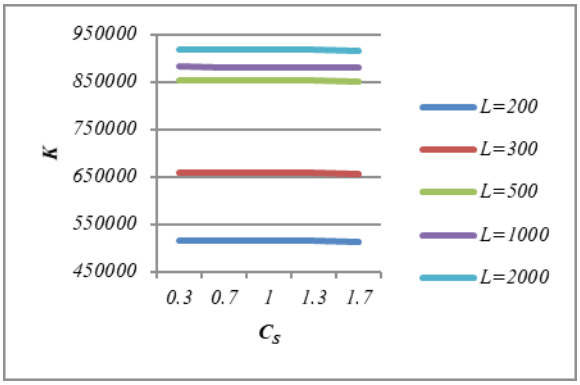
نمودار ۱۳. تغییرات مقدار سفارش پایدار در مقابل تغییرات هزینه نگهداری

ذخیره احتیاطی موجودیی است که در تمامی دوره‌ها باید برای جلوگیری از کمبود نگهداری شود. در نتیجه می‌توان گفت، حجم ذخیره احتیاطی نقش پررنگی را در هزینه‌های نگهداری سیستم اعمال می‌کند. بنابراین، کوچکترین مقدار افزایش هزینه نگهداری، منجر به کاهش ذخیره احتیاطی می‌شود (تا جایی هزینه‌های کمبود افزایش چشم‌گیری نداشته باشد و هزینه کل سیستم زیاد شود) و کاهش هزینه نگهداری منجر به کاهش مقدار بهینه ذخیره احتیاطی می‌شود (نمودار ۱۴).

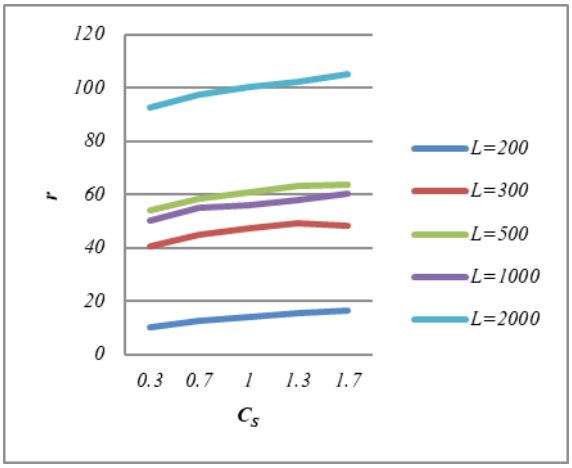


نمودار ۱۴.تغییرات ذخیره احتیاطی در مقابل تغییرات هزینه نگهداری

تغییرات هزینه کمبود: تغییرات هزینه کمبود نیز همانند هزینه نگهداری تاثیرش بر روی مقادیر بهینه متغیرهای نقطه سفارش مجدد، اندازه سفارش پایدار و ذخیره احتیاطی ملموس است. روند این تغییرات در نمودارهای ۱۶، ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، تغییرات هزینه کمبود با هزینه کل سیستم رابطه مستقیم دارد و افزایش یا کاهش هزینه کمبود به افزایش یا کاهش هزینه کل سیستم منجر می‌شود. اما شیب تغییرات ناشی از کاهش یا افزایش هزینه کمبود مانند حالت قبل (تغییر هزینه نگهداری) بسیار کم است. دلیل این امر نیز کوچک‌تر بودن این هزینه‌ها نسبت به هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های زیست‌محیطی است (نمودار ۱۵).



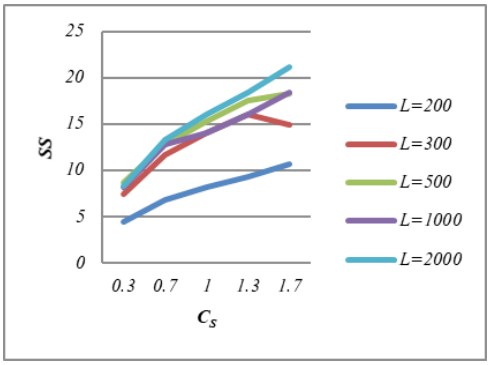
نمودار ۱۵. تغییرات هزینه کل در مقابل تغییرات هزینه کمبود



نمودار ۱۶. تغییرات نقطه سفارش در مقابل تغییرات هزینه کمبود

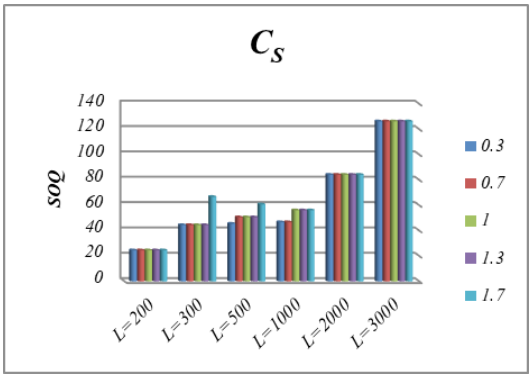
همانطور که انتظار می‌رود، تغییرات هزینه کمبود با مقدار بهینه نقطه سفارش مجدد رابطه مستقیم دارد و افزایش هزینه‌های کمبود منجر به افزایش مقدار بهینه r می‌شود؛ چراکه افزایش هزینه کمبود، انتخاب سیاست بهینه را (سیاستی که هزینه‌های کلی را کمینه سازد) به سمتی هدایت می‌کند که کمبود کمینه شود. بنابراین، نقطه سفارش مجدد افزایش می‌یابد و در حالت عکس کاهش می‌یابد (نمودار ۱۶). همین اتفاق در خصوص ذخیره احتیاطی به شکل

جدی‌تری صادق است؛ چراکه هدف اصلی نگهداری ذخیره احتیاطی مقابله با کمبودهای ناشی از نوسان تقاضا است. بنابراین، با افزایش هزینه کمبود، مقدار بهینه ذخیره احتیاطی به میزان قابل توجهی افزایش و با کاهش هزینه کمبود، کاهش می‌یابد (نمودار ۱۷).



نمودار ۱۷. تغییرات ذخیره احتیاطی در مقابل تغییرات هزینه کمبود

در بازه فاصله بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلومتر، رفتار مدل در خصوص متغیر SOQ، در مقابل تغییرات هزینه کمبود برعکس تغییرات هزینه نگهداری است. اما خارج از این بازه، در فواصل ۲۰۰ کیلومتری و کمتر از آن و همین طور فواصل ۲۰۰۰ کیلومتری و بزرگتر از آن، رفتاری مشابه حالتی که هزینه نگهداری تغییر می‌کند، دارد. تغییراتی که در بازه بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلومتر با تغییر در هزینه کمبود، رخ می‌دهد رابطه مستقیم با هزینه کمبود دارد اما این رابطه به صورت اکید نبوده و در برخی حالات مقدار بهینه سفارش پایدار تحت تاثیر افزایش یا کاهش هزینه کمبود قرار نمی‌گیرد (نمودار ۱۸).



نمودار ۱۸. تغییرات مقدار سفارش پایدار در مقابل تغییرات هزینه کمبود

در نهایت تحلیل حساسیت‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد که تغییر در پارامترهایی مانند میانگین تقاضا در طول مدت تحویل، انحراف معیار تقاضا در طول مدت تحویل، هزینه نگهداری و هزینه کمبود، بیش‌ترین تاثیر را بر روی متغیرهای نقطه سفارش مجدد، ذخیره احتیاطی و مقدار سفارش پایدار می‌گذارند و تاثیری ناشی از این تغییرات، روی متغیر فاکتور اتلاف انرژی مشاهده نشده است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی در حوزه مسائل مدیریت موجودی در حالتی که تقاضا یک پارامتر غیر قطعی است و تابع توزیع آن معلوم نیست و تنها اطلاعات موجود، میانگین و واریانس می‌باشد، انجام گرفته است. سیاست سفارش‌دهی در این مسأله، مرور دائم است. تحت چنین شرایطی، سعی شد با استفاده از رویکرد اسکارف، تابع هدف این مسأله به ازای بدترین تابع توزیع بهینه‌سازی شود (کمینه‌سازی بیشینه هزینه). اما نتایج بهینه‌سازی مسأله در شرایطی که تابع توزیع تقاضا مشخص نیست و از رویکرد max-min برای مقابله با عدم قطعیت استفاده می‌شود، نشان داد که جنبه‌های پایداری در تعیین مقدار بهینه سفارش و همین طور هزینه‌های کلی یک سیستم نقش به سزایی دارد. به این ترتیب که در مسافت‌های طولانی‌تر به دلیل آنکه هزینه‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است، هر چه مسافت بین محل سفارش‌دهی تا محل تامین سفارش بیشتر باشد، وسائل نقلیه با فاکتور اتلاف انرژی کمتر انتخاب می‌شوند و درمقابل سایز سفارش‌دهی افزایش می‌یابد. مقایسه این نتایج با حالتی که تابع توزیع تقاضا نرمال است، نشان داد که برای کلیه مسافت‌ها، مقدار بهینه تابع هدف نسبت به حالتی که توزیع تقاضا مشخص است، بیشتر است و این اختلاف در مقابل مقیاس هزینه کل در هر دو حالت رقم بسیار بالایی نیست. علت این امر نیز بالا بودن هزینه‌های زیست‌محیطی در مقابل هزینه‌های کمبود است. در مورد مقادیر بهینه سفارش پایدار و نقطه سفارش نیز وضعیت مشابه است با این تفاوت که مقدار اختلاف برای این دو متغیر قابل توجه است. در ادامه پیشنهادهای پژوهش به صورت زیر ارائه می‌شود:

۱. در این پژوهش، حالت حمل و نقل تکی فرض شده بود، در پژوهش‌های آتی می‌توان چند حالت برای حمل و نقل در نظر گرفت.

۲. مدل این پژوهش برای یک نوع محصول بود، در پژوهش‌های آتی می‌توان حالت چند محصولی را در نظر گرفت.

۳. بررسی سایر سیاست‌های موجودی برای مسأله مدیریت موجودی پایدار با تقاضای غیرقطعی آزاد- توزیع.

۴. در نظر گرفتن مدت زمان تحویل تصادفی در مسأله مورد بحث در این پژوهش.

منابع

بهرامی، زهرا، پسندیده، سید حمیدرضا، محمدی، محمد (۱۳۹۷)، مدل‌سازی و حل یک سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده چند کالایی با محدودیتهای تصادفی گنجایش انبار و بودجه، مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۶(۵۱)، ۱-۲۷.

زادجعفر، محدثه السادات، غلامیان، محمد رضا (۱۳۹۷)، مروری بر مدل‌های موجودی با رویکرد پایداری در زنجیره تأمین، نشریه علمی مدیریت زنجیره تأمین، ۲۰(۵۹)، ۴-۱۷.

Arslan, M., & Turkay, M. (2013). EOQ revisited with sustainability considerations. Foundations of Computing and Decision Sciences, 38(4), 223-249.

Battini, D., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2014). A sustainable EOQ model: theoretical formulation and applications. International Journal of Production Economics, 149, 145-153.

Benjaafar, S., Li, Y., & Daskin, M. (2013). Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models. Automation Science and Engineering, IEEE Transactions o, 99-116, (1)10.

Bonney, M., & Jaber, M. Y. (2011). Environmentally responsible inventory models: Non-classical models for a non-classical era. International Journal of Production Economics, 133(1), 43-53.

Bouchery, Y., Ghaffari, A., Jemai, Z., & Dallery, Y. (2012). Including sustainability criteria into inventory models. European Journal of Operational Research, 222(2), 229-240.

Digiesi, S., Mascolo, G., Mossa, G., & Mummolo, G. (2015). New Models for Sustainable Logistics: Internalization of External Costs in Inventory Management: Springer.

Digiesi, S., Mossa, G., & Mummolo, G. (2012). A loss factor based approach for sustainable logistics. Production Planning & Control, 23(2-3), 160-170.

Digiesi, S., Mossa, G., & Mummolo, G. (2013a). Supply lead time uncertainty in a sustainable order quantity inventory model. Management and Production Engineering Review, 4(4), 15-27.

Digiesi, S., Mossa, G., & Mummolo, G. (2013b). A sustainable order quantity model under uncertain product demand. Paper presented at the Manufacturing Modelling, Management, and Control.

Digiesi, S., Mossa, G., & Rubino, S. (2015). A sustainable EOQ model for repairable spare parts under uncertain demand. IMA Journal of Management Mathematics, 26(2), 185-203.

Gallego, G. (1992). A minmax distribution free procedure for the (Q, R) inventory model. Operations Research Letters, 11(1), 55-60.

Gallego, G., & Moon, I. (1993). The distribution free newsboy problem: review and extensions. Journal of the Operational Research Society, 825-834.

Gallego, G., Ryan, J. K., & Simchi-Levi, D. (2001). Minimax analysis for finite-horizon inventory models. IIE Transactions, 33(10), 861-874.

Harris, F. W. (1913). How many parts to make at once.

Hua, G., Cheng, T., & Wang, S. (2011). Managing carbon footprints in inventory management. International Journal of Production Economics, 132(2), 178-185.

Jonkers, C. (1981). The loss factor of transport. Förden und Heben, 31(2), 98-101.

Kasugai, H., & Kasegai, T. (1960). Characteristics of dynamic maximin ordering policy. Journal of the Operations Research Society of Japan, 298.

Kasugai, H., & Kasegai, T. (1961). Note on minimax regret ordering policy-static and dynamic solutions and a comparison to maxmin policy. Journal of the Operations Research Society of Japan, 3, 155-169.

Moon, I., & Gallego, G. (1994). Distribution free procedures for some inventory models. Journal of the Operational Research Society, 651-658.

Rubino, S., Mossa, G., & Digiesi, S. (2012). Sustainable Order Quantity of Repairable Spare Parts. Paper presented at the Advanced Maintenance Engineering.

Scarf, H., Arrow, K., & Karlin, S. (1958). A min-max solution of an inventory problem. Studies in the Mathematical Theoryof Inventory and Production, 10, 201-209.

Taleizadeha, A., Soleymanfarb, V.R., Govindan, K. (2018). Sustainable economic production quantity models for inventory systems with shortage, Journal of Cleaner Production, 174, 1011-1020.

Tao, Z., Guiffrida, A., & Troutt, M. (2010). A green cost based economic production/ order quantity model. Paper presented at the Proceedings of the 1st Annual Kent State International Symposium on Green Supply Chains, Canton, Ohio, US.

Venkat, K. (2007). Analyzing and optimizing the environmental performance of supply chains. Proceedings of the ACCEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, White Plains, New York, US.

Wahab, M., Mamun, S., & Ongkunaruk, P. (2011). EOQ models for a coordinated two-level international supply chain considering imperfect items and environmental impact. International Journal of Production Economics, 134(1), 151-158.

Yue, J., Wang, M.-C., & Chen, B. (2007). Mean-range based distribution-free procedures to minimize “overage” and “underage” costs. European Journal of Operational Research, 176(2), 1103-1116.

Zadjafar, M.A., & Gholamian, M.R. (2018). A sustainable inventory model by considering environmental ergonomics and environmental pollution, case study: Pulp and paper mills, Journal of Cleaner Production, 199, 444-458.