

مدل بهینه‌سازی-مکان‌یابی چندهدفه چندمحصولی پویا با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان

بابک فضل‌ی بشلی^۱، علی جهان^{۲*}

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان

۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۶/۰۷/۲۹، تاریخ تصویب: ۹۷/۴/۳۱)

چکیده

یکی از حلقه‌های مهم در زنجیره تأمین شبکه توزیع است. مسئله مکان‌یابی توزیع‌کنندگان نیز یکی از مسائل مهم زنجیره تأمین درباره تصمیم‌های سیستم توزیع محسوب می‌شود. همچنین یکی از مهم‌ترین اهداف زنجیره تأمین رضایت مشتریان است؛ بنابراین قابلیت اطمینان می‌تواند در ارسال محصولات کافی به مشتریان مؤثر باشد. در این پژوهش مدل غیرقطعی مکان‌یابی چهار هدفه عدد صحیح مختلط غیرخطی، چندمحصولی و چنددوره‌ای با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های کل، کمینه‌سازی فضای انبارش توزیع‌کنندگان، کمینه‌سازی زمان تأخیر و تعجیل در ارسال به توزیع‌کنندگان و افزایش قابلیت اطمینان مراکز توزیع در ارسال به مشتریان، همچنین مدل پیشنهادی مسئله برای زنجیره تأمین چهار سطحی ارائه شده است. حل مدل چندهدفه به کمک روش ریاضی E -محدودیت و تابع حددار صورت گرفته است. در نهایت برای بررسی کارایی مدل و عملکرد روش‌های پیشنهادی چندین مثال عددی طراحی و نتایج حاصل از آن‌ها مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین، قابلیت اطمینان انبارها، مکان‌یابی، هزینه موجودی‌ها

مقدمه

زنجیره تأمین به مجموعه فعالیت‌های مرتبط با جریان و تبدیل کالاها از مرحله ماده خام تا تحویل به مصرف‌کننده نهایی و جریان‌های اطلاعاتی مرتبط با آن‌ها گفته می‌شود. افزایش روزافزون رقابت میان کارخانه‌ها و شرکت‌ها برای تولید محصولات با کیفیت و مطابق سلیقه مشتری، به دیدگاهی جدید در میان تمامی سازندگان و تولیدکنندگان نیاز دارد. بسیاری از فعالیت‌های مرتبط با روابط بخش‌های گوناگون زنجیره تأمین، براساس انتقال و مدیریت موجودی صورت می‌گیرد. بسیاری معتقدند تمرکز زنجیره تأمین باید بر مدیریت موجودی باشد. هر زمان که شرکت‌ها دریافتند مشارکت در مدیریت موجودی کل زنجیره بهتر از مدیریت موجودی انفرادی است، مدل‌های جامع فروشنده-خریدار در زنجیره تأمین مدنظر قرار می‌گیرد.

زنجیره‌های دوسطحی را ابتدا کلارک و همکاران در سال ۱۹۶۰ بررسی کردند [۱]. در سال ۲۰۰۵ نیز هسیو و لین [۲] مدل مقدار اقتصادی سفارش در زنجیره تأمین را توسعه دادند که در آن کانال توزیع متشکل از یک

تأمین‌کننده و یک خرده‌فروش در نظر گرفته شد. به‌منظور کامل‌تر کردن مدل‌های ارائه‌شده در دو سطح مربوط به خریدار-فروشنده، در بسیاری از پژوهش‌ها حالت چند خریدار-یک فروشنده، یک خریدار-چند فروشنده و چند خریدار-چند فروشنده ارائه شده است. نخستین پژوهش در دو سطح خریدار-فروشنده را جگلکار و تارتر در سال ۱۹۹۰ [۳] انجام دادند. سپس توسعه این مدل از سوی بنرجی و بورتون در سال ۱۹۹۴ صورت گرفت [۴]. بعدها در بسیاری از پژوهش‌ها مدل‌هایی در این زمینه ارائه شد؛ برای مثال می‌توان به مطالعات بن دایا و هاریجا در سال ۲۰۰۴ [۵]، سیاجادی در سال ۲۰۰۶ [۶] و هوک در سال ۲۰۰۸ [۷] اشاره کرد. طالع‌زاده و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ [۸] مدل چندمحصولی چند فروشنده-چند خریدار را پیشنهاد دادند. روتروی و کدالی در سال ۲۰۰۵ [۹] مدل موجودی سه‌سطحی تک‌محصولی را بررسی کردند که یک انبار، یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش دارد. آزارون و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۰]، شبکه تأمین سه‌سطحی با پارامترهای غیرقطعی هزینه را با اهداف حداقل کردن

زنجیره‌های تأمین به داشتن مراکز توزیع قابل اطمینان نیاز دارند که بتوانند حداکثر ارسال به مشتریان را امکان پذیر کنند.

آلتیپارمک و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۳]، مدل سه هدفه حداقل کردن هزینه کل، حداکثرسازی سرویس مشتری و حداکثرسازی توازن ظرفیت بهره‌برداری را برای مراکز توزیع مدلی ارائه دادند. جعفری و همکاران [۱۴] نیز در سال ۲۰۱۰، به بررسی مدل مکان‌یابی چندتسهیلی پرداختند که هدف آن حداقل کردن هزینه بود. در مدل مسئله، تابع مطلوبیت به عنوان هدف دوم با اهداف حداقل کردن هزینه کل و حداکثرکردن مطلوبیت در نظر گرفته شده که برای حل آن از روش LP -متریک استفاده شده است. یزدیان و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۵] مدل برنامه‌ریزی را برای مراکز توزیع و تخصیص تقاضای مشتریان ارائه کردند که در آن به تعیین مکان تسهیلات و مقدار حمل و نقل میان هر دو لایه متوالی از زنجیره تأمین پرداخته شده است. مکان‌یابی مراکز توزیع و حمل و نقل محصولات نیز تابع هدف این مدل است. همچنین بسیاری از مقالات به یکپارچه‌سازی سیستم خرید-تولید-توزیع پرداختند. پور روستا و همکاران در سال ۲۰۱۱ مدل برنامه‌ریزی چندمحصولی چنددوره‌ای خرید-تولید-توزیع را در زنجیره تأمین غیرقطعی در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فازی به منظور نزدیک‌ترکردن مقادیر پارامترها به دنیای واقعی ارائه دادند. هدف این مدل، حداقل کردن هزینه‌های خرید، راه‌اندازی، تولید، نگهداری و حمل و نقل است [۱۶]. رزمی و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۷]، مدل تک‌محصولی تک‌دوره‌ای را در زنجیره تأمین دوسطحی ارائه دادند که متشکل از تولید، انتقال و مکان مشتریان و مجموعه‌ای از انبارهای بالقوه در دسترس است که در معرض اختلال و شکست قرار دارند. در این مسئله، چندین سناریو با احتمال مشخص براساس میزان تقاضا، شکست تسهیلات، هزینه‌های حمل و انبارش وجود دارد. از اهداف این مدل حداقل کردن هزینه‌ها و حداکثرکردن میزان پوشش‌دهی تقاضای مشتریان است. عرب‌زاد و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۸] مدلی سه‌هدفه را برای شبکه‌های توزیع ارائه کردند که هدف از آن افزایش کارایی و پاسخگویی به مشتری بود. در این مسئله، زنجیره

مجموع هزینه‌های حال و مورد انتظار آتی، واریانس هزینه‌ها و میزان عدم اطمینان تحت بودجه معلوم ارائه دادند. ال‌سید و همکاران در سال ۲۰۱۰ مدلی را برای زنجیره لجستیک چنددوره‌ای سه‌سطحی تحت تقاضای نامعین در حرکت رفت و تقاضای قطعی مشتریان در حرکت برگشت به منظور حداکثرسازی سود ارائه دادند [۱۱]. در پژوهش ژو و همکاران در سال ۲۰۱۳ که به زنجیره‌های تأمین چندسطحی مربوط است [۱۲]، زنجیره سطوح زنجیره تأمین به صورت شبکه در نظر گرفته شده است.

به منظور نزدیک‌ترکردن مدل‌ها به دنیای واقعی و شرایط حاکم بر صنایع و زنجیره تأمین مربوط به آن‌ها، در بسیاری از پژوهش‌های به بررسی مسائل چندهدفه در حوزه کنترل موجودی پرداخته شده است. در میان موضوعات گوناگون برای زنجیره‌های تأمین بسیاری از آن‌ها به مسائل مربوط به مکان‌یابی، کاهش سرمایه درگیر در بخش انبارها و افزایش قابلیت اطمینان و ارسال به مشتریان در کنار حداقل کردن هزینه کل زنجیره تأمین پرداخته‌اند.

یکی از مهم‌ترین تصمیم‌های مدیران عملیاتی، مکانیابی تسهیلات تولیدی جدید است. بطوریکه با ظهور مدیریت زنجیره تأمین به عنوان مهم‌ترین مرز رقابتی، این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. مسائل مکان‌یابی عموماً به دنبال کاهش هزینه و افزایش رضایت مشتریان هستند. تصمیم‌گیری درباره مکان تسهیلات از جمله تصمیم‌های راهبردی است که رابطه‌هایی را برای تصمیم‌گیری‌های دیگر زنجیره ایجاد می‌کند؛ بنابراین هرچقدر این تصمیم‌ها علمی‌تر و درست‌تر باشد، به همان میزان تصمیم‌گیری‌های دیگر اثربخشی بیشتری خواهد داشت. مکان‌یابی مراکز توزیع به دنبال انتخاب مراکز توزیع از مجموعه بالقوه است؛ به گونه‌ای که هزینه‌های مربوطه کل کمینه شود. همچنین بسیاری از پژوهشگران به بررسی افزایش سطح خدمت‌رسانی به مشتریان از نظر زمان ارسال یا میزان ارسال در کنار حداقل کردن هزینه‌ها پرداخته‌اند. بدیهی است یکی از عوامل مهم رضایت مشتریان به عنوان هدف نهایی زنجیره‌های تأمین، دریافت محصول مورد نیاز آن‌ها به مقدار کافی است. درواقع

مینیم کردن هزینه‌هاست. پسندیده و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۴] مدل دوهده‌ای در زنجیره سه‌سطحی ارائه کردند که در آن قابلیت اطمینان انبارها مدنظر قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین اهداف زنجیره تأمین رضایت مشتریان است؛ بنابراین قابلیت اطمینان در ارسال محصولات کافی به مشتریان اهمیت بسیاری دارد.

افزون بر آنچه بیان شد، ارسال میزان مورد نیاز به مشتریان نباید سبب افزایش سطح موجودی‌های مراکز توزیع (انبارها) و افزایش سرمایه درگیر در این مراکز شود. در نتیجه مدیریت سطح موجودی انبارها اهمیت می‌یابد. همچنین در صورتی که زنجیره‌ای بخواهد با سطح بهینه، موجودی ارسال کافی به مشتریان را در نظر داشته باشد، باید مسئله زمان را نیز مدنظر قرار دهد.

کمالی و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۲۵] مدل چهارده‌ای را برای زنجیره تأمین دوسطحی (خریدار-فروشنده) ارائه دادند. در این مدل، زمان تحویل در کنار اهداف کیفیت، ارزش خرید و هزینه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است. محدودیت‌های مورد نظر در این مدل عبارت‌اند از: محدودیت تساوی کل تولید و تقاضا، ظرفیت تولید، مقدار سفارش و تخفیف. علاوه‌براین، الگوریتمی برای انتخاب تأمین‌کننده ارائه شده است. ازگن و گلستان در سال ۲۰۱۴ [۲۵]، مدل برنامه‌ریزی خطی احتمالی را به‌منظور بهینه‌کردن دو تابع هدف حداقل‌سازی هزینه و حداکثرسازی سود در زنجیره تأمین چهارسطحی شامل تأمین‌کننده، کارخانه‌ها، مراکز توزیع و مشتریان شبکه زنجیره ارائه کردند. در نهایت کارایی مدل مسئله با مثال عددی نشان داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، حجم سرمایه درگیر در بخش انبار توزیع‌کنندگان بسیار اهمیت دارد و بهینه‌کردن میزان انبارش در این خصوص بسیار تأثیرگذار است. همچنین با بهینه‌کردن سطح انبارش، زمان ارسال و میزان خدمت‌دهی به مشتریان نیز باید مدنظر قرار بگیرد. صراف‌ها و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۶] مدل شبکه تولید-توزیع دوهده‌ای چنددوره‌ای را ارائه کردند که برای سیستم تولید کارگاهی ارائه شده است. علاوه‌بر حداقل‌کردن هزینه‌ها، کمینه‌کردن زمان تأخیر نیز از اهداف این مدل است. صادقی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۷] مدل دوهده‌ای موجودی تحت مدیریت

سه‌سطحی شامل یک مرکز تولیدی، چندین مرکز توزیع و چند مشتری نهایی در نظر گرفته شده است و فرض می‌شود میان مرکز تولیدی و گره‌های توزیع‌کنندگان، گزینه‌های حمل متفاوتی وجود دارد. مسئله انتخاب مراکز توزیع و تخصیص مقادیر حمل به گزینه‌های حمل متفاوت در این مدل در نظر گرفته شده است. درمورد تابع هدف زمان، تعجیل و تأخیر در این مدل، جریمه‌ای برای رسیدن زودهنگام یا دیرتر از زمان موردنظر است. همچنین توابع کیفیت و هزینه موجودی نیز در مدل مدنظر قرار گرفته است. جیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۹]، به کمک ترکیب روش‌های کیفی و کمی، مدلی برای مکان‌یابی ارائه دادند که در آن، طرح انتخاب مکان اولیه با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی از تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر بر انتخاب مکان به دست می‌آید. در نهایت از مدل عدد صحیح مختلط برای انتخاب مکان نهایی استفاده شد. در مدل پیشنهادی، علاوه‌بر عوامل عمومی مؤثر، حفاظت از محیط، مدیریت مرکز توزیع و رضایت مشتری در نظر گرفته شد و تجزیه و تحلیل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفت. براساس نتایج، ترکیب روش کمی و کیفی می‌تواند مدل انتخاب سایت جامع‌تر و دقیق‌تر را به کمک مطابقت نزدیک با شرایط عملی ارائه دهد. احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۰]، مسئله غیرخطی عدد صحیح مختلط چندمحصولی مکان‌یابی-موجودی را در شبکه توزیع زنجیره تأمین ارائه کردند که مکان‌یابی-تخصیص حداکثرکردن سود کل ارائه خدمت به مشتریان محسوب می‌شود. مرتضایی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۱] مدل چندمحصولی چنددوره‌ای را ارائه کردند که کمینه‌کردن هزینه‌ها و افزایش سطح تقاضای مشتری به کمک ماکزیم کردن نسبت اختلاف تقاضا و کمبود به تقاضا از اهداف آن است. پسندیده و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۳] مدلی چندمحصولی و چنددوره‌ای را برای زنجیره‌ای سه‌سطحی ارائه کردند که هزینه و قابلیت اطمینان انبار در آن در نظر گرفته شده است. یکی از توابع این مدل به صورت حاصل ضرب میزان محصول ارسالی از انبار در احتمال خرابی انبار از زمانی به بعد است که نشان‌دهنده متوسط محصول ارسالی است. اهداف دوم این مدل نیز ماکزیم کردن میزان ارسالی از انبار در کنار

فروشنده و تحت شرایط عدم قطعیت را ارائه دادند که در آن، عدم قطعیت تقاضا به صورت عدد فازی نشان داده شده است. این مدل به دنبال حداقل کردن فضای انبار در کنار کمینه کردن هزینه‌هاست. محدودیت‌های بودجه و تعداد سفارش‌ها نیز از جمله محدودیت‌های مسئله مذکور است. بدیهی است در صورت ذخیره اضافی محصولات در بخش انبار، سرمایه درگیر در این بخش زیاد می‌شود که به صرفه نیست. درواقع باید مقدار موجودی بخش انبار تا حد ممکن در سطح بهینه قرار داشته باشد؛ زیرا اضافه موجودی منجر به افزایش هزینه‌ها می‌شود و کمبود آن نیز هزینه‌هایی را به دنبال خواهد داشت، اما در صورت انبارش به مقدار لازم می‌توان از مزایای نگهداری موجودی‌ها که بر

همه آشکار است بهره برد. از سوی دیگر، کاهش فضای انبارش و میزان موجودی به هماهنگی و کنترل بیشتری در امر ارسال محصولات نیاز دارد که در اینجا مسئله زمان بسیار اهمیت دارد؛ زیرا ارسال همراه با تأخیر یا زودتر از موعد، مشکلاتی را برای سیستم به وجود می‌آورد؛ از این رو زمان ارسال یکی از مسائل مهم خواهد بود. همچنین مشتریان عناصر کلیدی زنجیره‌های تأمین هستند که علاقه دارند محصولات را به مقدار کافی و با کمترین هزینه دریافت کنند. به همین دلیل مقدار ارسال و هزینه کل در زنجیره‌های تأمین اهمیت می‌یابد. با توجه به پیشینه این مسئله، همه این عوامل در کنار هم بررسی نشده است. در جدول ۱، شکاف پژوهش‌های مربوط آمده است.

جدول ۱. شکاف پژوهشی

مؤلفان	ویژگی‌های مسئله				اهداف مسئله			
	تعداد سطوح زنجیره	تعدد محصولی	چنددوره‌ای	غیر قطعی	موجودی هزینه	زمان	فضای انبارش	قابلیت اطمینان
صادقی و همکاران (۲۰۱۵)								
عربزاد و همکاران (۲۰۱۵)								
پسندیده و همکاران (۲۰۱۵)								
مدل پیشنهادی								

فرضیه‌های مدل پیشنهادی

- در مدل مسئله فرض شده است که کارخانه‌های تولیدی چند محصول را تولید می‌کنند.
- برنامه‌ریزی مسئله برای چند دوره‌ای در نظر گرفته شده است.
- زنجیره تأمین مدل چهارسطحی در نظر گرفته شده است.
- زمان بین دو شکست متوالی انبار توزیع‌کنندگان در ارسال محصولات به مشتریان متغیر تصادفی است و از توزیع‌نمایی پیروی می‌کند.
- به دلیل محدودیت در فضای انبارش مسئله برای ارسال زودتر و دیرتر از موعد محصولات به توزیع‌کنندگان جریمه در نظر می‌گیرد.

البته در برخی مطالعات، ظرفیت و زمان در دسترس محدود جزئی از محدودیت‌ها هستند. در این شرایط ظرفیت معینی وجود دارد و زمان‌های تولیدی در نظر گرفته می‌شوند، اما در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن ظرفیت و زمان‌های تولید و ارسال به عنوان توابع هدف در کنار مکان‌یابی انبار توزیع‌کنندگان، امکان انتخاب و برپایی مکان‌های توزیع با فضای انبارش بهینه و کنترل زمان ارسال محصولات در کنار برآورده کردن نیاز مشتریان با کمترین هزینه ایجاد می‌شود.

مدل پیشنهادی

در این بخش، مدل چندمحصولی چنددوره‌ای برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی پیشنهادی ارائه می‌شود.

d : شاخص مورد استفاده برای مراکز توزیع:

$$d = 1, 2, \dots, D$$

S : شاخص مورد استفاده برای تأمین‌کننده: $S = 1, 2, \dots, S$

t : شاخص مورد استفاده برای یک دوره زمانی:

$$t = 1, 2, \dots, T$$

r : شاخص مورد استفاده برای ماده خام مصرفی:

$$r = 1, 2, \dots, R$$

C : شاخص مورد استفاده برای مشتری نهایی:

$$C = 1, 2, \dots, C$$

j : شاخص مورد استفاده برای مکان‌های بالقوه مراکز توزیع:

$$j = 1, 2, \dots, J$$

پارامترها

O_{pdt}^g : کل هزینه سفارش‌دهی محصول g که از مرکز توزیع d به کارخانه p در دوره t سفارش داده می‌شود.

RP_{pdt}^r : میزان ماده خام r که برای تولید یک واحد محصول g استفاده می‌شود.

D_{pdt}^g : میزان تقاضای توزیع‌کننده d برای محصول g به کارخانه p در دوره t

D_{dct}^g : میزان تقاضای مشتری نهایی C برای محصول g به کارخانه p در دوره t

SC_{spt}^r : هزینه حمل واحد ماده خام r از تأمین‌کننده S به تولیدکننده p در دوره t

SC_{pdt}^g : هزینه حمل واحد محصول g از کارخانه m به توزیع‌کننده d در دوره t

SC_{dct}^g : هزینه حمل واحد محصول g از مرکز توزیع d به مشتری C در دوره t

PC_{pdt}^g : هزینه خرید واحد محصول g از مرکز توزیع d برای مشتری C در دوره t

PC_{spt}^r : هزینه خرید واحد ماده خام r از تأمین‌کننده S برای کارخانه p در دوره t

BC_{pdt}^g : هزینه هر واحد کمبود محصول g که باید از کارخانه p به مرکز توزیع d در دوره t ارسال می‌شد

BC_{dct}^g : هزینه هر واحد کمبود محصول g که باید از مرکز توزیع d به مشتری C در دوره t ارسال می‌شد

MC_{pt}^g : هزینه تولید هر واحد محصول g در کارخانه p در دوره t

W_{dt}^g : فضای انبارش لازم برای هر واحد محصول g در انبار توزیع‌کننده d در دوره t

• در مسئله فرض می‌شود که ماده خام به مقدار کافی در دسترس است و کمبود ماده خام وجود ندارد، اما برای محصولات تولیدی که از سوی کارخانه‌ها به مراکز توزیع و از مراکز توزیع به مشتریان ارسال می‌شوند، کمبود از نوع پس‌افت وجود دارد.

• به‌منظور کاهش عدم اطمینان، ماکزیم کردن حجم محصول ارسالی در زمان مناسب و به‌موقع و انتخاب مکان‌های مناسب برای توزیع‌کنندگان در نظر گرفته شده است.

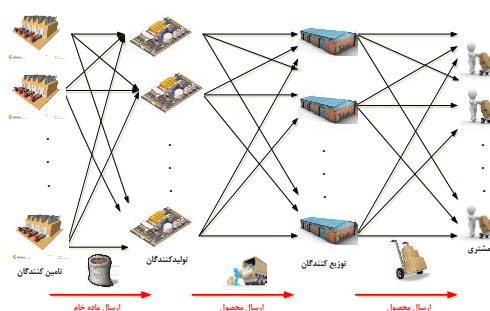
• هزینه خرید در دوره‌های مختلف برای محصول i و ماده خام i' متفاوت است.

• هزینه حمل گزینه‌های حمل در دوره‌های مختلف متفاوت است.

• مکان‌یابی توزیع‌کنندگان از میان مجموعه مکان‌های بالقوه از تصمیم‌های راهبردی مسئله در دسترس است.

• مدل مسئله درباره میزان ماده خام ارسالی از سوی هر تأمین‌کننده، مقدار محصولی که در هر کارخانه در هر دوره باید تولید شود، موجودی محصولات در مراکز توزیع و کارخانه‌ها، مقدار کمبود مراکز توزیع در همه دوره‌ها برنامه‌ریزی می‌کند.

در شکل ۱، مدل مفهومی مسئله پیشنهادی ارائه شده است. براین اساس، زنجیره تأمین مسئله چهار سطح تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و مشتریان نهایی را شامل می‌شود.



شکل ۱. مدل مفهومی زنجیره تأمین مسئله پیشنهادی

شاخص‌ها

g : شاخص مورد استفاده برای محصولات تولیدی:

$$g = 1, 2, \dots, G$$

p : شاخص مورد استفاده برای کارخانه‌ها: $p = 1, 2, \dots, P$

مدل سازی

مدل پیشنهادی ارائه شده به دنبال کاهش سرمایه درگیر در موجودی ها و افزایش اطمینان توزیع کننده ها در ارسال محصولات به مشتریان است. در این مدل قابلیت اطمینان انبار در ارسال محصولات کافی به مشتریان افزایش می یابد. از دیگر راه های کاهش عدم اطمینان در بخش توزیع کنندگان، مکان یابی درست مراکز توزیع از میان مکان های بالقوه است. به منظور کاهش سرمایه درگیر و هزینه ها، توابع هدف حداقل کردن هزینه های موجودی و فضای انبار در نظر گرفته شده اند. به دلیل کمبود فضای نگهداری موجودی محصولات در بخش انبار توزیع کنندگان، مدل پیشنهادی سعی می کند با در نظر گرفتن جریمه برای ارسال زودتر و دیرتر از موعد، محصولات را در زمان کافی به توزیع کنندگان ارسال کند. مدل ر برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چندهدفه مسئله در دسترس به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \text{Min} Z_1 = & \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^J (F_{dj} y_{dj}) \\ & + \sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (O_{pdt}^g \frac{q_{pdt}^g}{q_{pdt}^g + \varepsilon}) \\ & + \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (SC_{spt}^r q_{spt}^r) \\ & + \sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (SC_{pdt}^g q_{pdt}^g) \\ & + \sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T (SC_{dct}^g q_{dct}^g) \\ & + \sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (b_{pdt}^g BC_{pdt}^g) \\ & + \sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T (b_{dct}^g BC_{dct}^g) + \sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (MC_{pt}^g P_{pt}^g) \\ & + \sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (PC_{pdt}^g q_{pdt}^g) \\ & + \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (PC_{spt}^r q_{spt}^r) \\ & + \sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (HC_{pt}^g I_{pt}^g) + \sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (HC_{dt}^g I_{dt}^g) \\ \text{Min} Z_2 = & \sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T [(\sum_{p=1}^P (q_{pdt}^g + I_{pdt}^g)) \times W_{dt}^g] \quad (1) \\ \text{Min} Z_3 = & [\sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (\alpha_{pdt}^g \times E_{pdt}^g \times q_{pdt}^g) \\ & + [\sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (\beta_{pdt}^g \times T_{pdt}^g \times q_{pdt}^g)] \quad (2) \end{aligned}$$

$$\text{Min} Z_3 = [\sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (\alpha_{pdt}^g \times E_{pdt}^g \times q_{pdt}^g) + [\sum_{g=1}^G \sum_{p=1}^P \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T (\beta_{pdt}^g \times T_{pdt}^g \times q_{pdt}^g)] \quad (3)$$

HC_{pt}^g : هزینه نگهداری واحد محصول g در مرکز تولیدی p در انتهای دوره t
 HC_{dt}^g : هزینه نگهداری واحد محصول g در مرکز توزیع d در انتهای دوره t
 E_{pdt}^g : زمان تعجیل در رسیدن محصول g به مرکز توزیع d در دوره t
 λ_{dt} : نرخ خرابی انبار d در دوره t
 T_{pdt}^g : زمان تأخیر در رسیدن محصول g به مرکز توزیع d در دوره t
 COT_{pdt}^g : زمان ارسال واقعی محصول g از کارخانه p به مرکز توزیع d در دوره t
 dd_{pdt}^g : موعد تحویل محصول g از کارخانه p به مرکز توزیع d در دوره t
 α_{pdt}^g : جریمه هر واحد زمان تعجیل در رسیدن محصول g از کارخانه p به مرکز توزیع d در دوره t
 β_{pdt}^g : جریمه هر واحد زمان تأخیر در رسیدن محصول g از کارخانه p به مرکز توزیع d در دوره t
 F_{dj} : هزینه ثابت برپایی مرکز توزیع d در مکان j
 ε : مقدار بسیار کوچک

متغیرها

q_{pdt}^g : میزان ارسال محصول g که از کارخانه p به مرکز توزیع d در دوره t ارسال می شود
 q_{spt}^r : میزان ارسال ماده خام r از تأمین کننده s به کارخانه p در دوره t
 q_{dct}^g : میزان ارسال محصول g از مرکز توزیع d به مشتری c در دوره t
 b_{pdt}^g : میزان کمبود در ارسال محصول g از کارخانه p به مرکز توزیع d در دوره t
 b_{dct}^g : میزان کمبود در ارسال محصول g از مرکز توزیع d به مشتری c در دوره t
 I_{pt}^g : مقدار موجودی محصول g در کارخانه p در دوره t
 I_{dt}^g : سطح موجودی محصول g در مرکز توزیع d در انتهای دوره t
 P_{pt}^g : میزان تولید محصول g در کارخانه p در دوره t
 y_{dj} : متغیر صفر و ۱، در صورتی که مرکز توزیع d در مکان j دایر شود، ۱ و در غیر این صورت صفر است.

به مشتریان است. این تابع زمان میان دو شکست انبار را متغیر تصادفی فرض می‌کند که توزیع نمایی دارد و در آن حجم ارسالی به مشتریان ماکزیمم می‌شود؛ با این فرض که توزیع‌کنندگانی که در طول بازه هر دوره برنامه‌ریزی، احتمال بالاتری برای مواجه‌نشدن با مشکل دارند، امکان ارسال حجم بیشتری به مشتریان را داشته باشند. همچنین به منظور در نظر گرفتن برخی شرایط حاکم بر دنیای واقعی، محدودیت‌هایی در مدل در نظر گرفته شده است. براساس رابطه ۵، میزان موجودی کارخانه و مقداری که در همان دوره به تمامی توزیع‌کنندگان ارسال می‌شود، برابر میزان تولید آن مرکز در آن دوره است. در محدودیت ۶، میزان ارسال‌ها به هر مرکز توزیع در هر دوره و میزان کمبود آن مرکز در همان دوره برابر میزان تقاضایی است که آن انبار از محصول g در آن دوره داشته است. براساس رابطه ۷، مجموع میزان ارسال از مرکز توزیع d به مشتریان باید کوچک‌تر-مساوی مجموع مقادیر ارسال‌شده از کارخانه‌ها به همان مرکز توزیع باشد. رابطه ۸ بیان می‌کند میزان ارسال ماده خام از تأمین‌کننده s به کارخانه p در دوره t بیشتر از مقدار مورد نیاز است و کمبود ماده خام وجود ندارد. معادله ۹، معادله تعادلی مربوط به مقادیر ارسال و موجودی‌های بین کارخانه و مراکز توزیع و مشتریان را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه ۱۰، اختلاف زمان ارسال و موعد تحویل باید کمتر از مقدار تأخیر مجاز تعیین‌شده باشد. همچنین رابطه ۱۱ نشان می‌دهد اختلاف موعد تحویل و زمان ارسال باید از تعجیل مجاز تعیین‌شده کمتر باشد. در روابط ۱۲ و ۱۳ معادلات تعادلی مربوط به کمبود در مسیر میان کارخانه‌ها و توزیع‌کنندگان و توزیع‌کنندگان و مشتریان مشخص شده است. رابطه ۱۴ نشان می‌دهد تعداد R مرکز توزیع در مجموع دایر می‌شود. همچنین براساس معادله ۱۵ در هر مکان تنها یک مرکز توزیع دایر می‌شود.

بحث و یافته‌ها

در این پژوهش، از دو روش‌های پرکاربرد یعنی روش کلاسیک ϵ -محدودیت و تابع حددار برای حل مدل پیشنهادی استفاده شد. در این روش‌ها، یکی از اهداف مدل چهارهدفه، هدف اصلی در نظر گرفته شده است و سایر اهداف به محدودیت‌ها اضافه شده‌اند. مثال‌های عددی

$$Max Z_4 = [\sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T (e^{-\lambda_{dt} X} \times q_{dct}^g)] \quad (4)$$

S.t:

$$I_{pt}^g + \sum_{d=1}^D q_{pdt}^g = P_{pt}^g, \quad \forall g, d, t \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^P (q_{pdt}^g + b_{pdt}^g) = \sum_{p=1}^P D_{pdt}^g, \quad \forall g, d, t \quad (6)$$

$$\sum_{c=1}^C q_{dct}^g \leq \sum_{p=1}^P q_{pdt}^g, \quad \forall d, t \quad (7)$$

$$q_{spt}^r \geq [RP^r \times P_{pt}^g], \quad \forall r, s, p, t \quad (8)$$

$$I_{pd,t-1}^g + \sum_{p=1}^P q_{pdt}^g = (\sum_{c=1}^C q_{dct}^g) + I_{dt}^g, \quad \forall g, d, t \quad (9)$$

$$COT_{pdt}^g - dd_{pdt}^g \leq T_{pdt}^g, \quad \forall g, p, d, t \quad (10)$$

$$dd_{pdt}^g - COT_{pdt}^g \leq E_{pdt}^g, \quad \forall g, p, d, t \quad (11)$$

$$b_{dct}^g = b_{dc,t-1}^g + D_{dct}^g - q_{dct}^g, \quad \forall g, d, c, t \quad (12)$$

$$b_{pdt}^g = b_{pd,t-1}^g + D_{pdt}^g - q_{pdt}^g, \quad \forall g, p, d, t \quad (13)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^J y_{dj} = R \quad (14)$$

$$\sum_{d=1}^D y_{dj} \leq 1, \quad \forall j \quad (15)$$

رابطه ۱ تابع هدف هزینه‌های موجودی‌ها را در نظر می‌گیرد. این هزینه‌ها به ترتیب عبارت‌اند از: هزینه ثابت برپایی مراکز توزیع، سفارش‌دهی، حمل مواد خام به مراکز تولیدی، حمل محصولات از کارخانه‌ها به مراکز توزیع و حمل از مراکز توزیع به مشتریان، هزینه کمبود محصولات ارسالی در مسیر میان کارخانه‌ها و توزیع‌کنندگان و کمبود محصولات ارسالی به مشتریان، هزینه خرید مواد خام از تأمین‌کنندگان و خرید محصولات از تولیدکنندگان توسط مراکز توزیع، هزینه تولید محصولات در کارخانه‌ها و نگهداری محصولات در مراکز تولیدی و انبار توزیع‌کنندگان. تابع هدف دوم مسئله به دنبال حداقل کردن فضای انبارش توزیع‌کنندگان است که در رابطه ۲ آمده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، به دلیل کمتر شدن فضای انبارش به کنترل زمانی در ارسال محصولات نیاز است. برای این منظور رابطه ۳ که حداقل کردن زمان تأخیر و تعجیل در ارسال محصولات از تولیدکنندگان به توزیع‌کنندگان محسوب می‌شود، سومین تابع هدف تعریف شده است. همچنین تابع هدف چهارم مدل پیشنهادی به دنبال افزایش قابلیت اطمینان در ارسال محصولات کافی

شده است و سایر توابع به محدودیت‌های مدل اضافه می‌شوند.

روش تابع حددار

در این روش مانند روش E- محدودیت تابع هدف با اولویت بالاتر به عنوان هدف مدنظر قرار می‌گیرد و سایر اهداف در محدودیت‌ها گنجانده می‌شوند. حدود بالا و پایین محدودیت مربوط به هر هدف با استفاده از مقادیر بهینه توابع هدف موجود به دست می‌آید.

حل مثال‌های عددی

به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، مثال‌های عددی به صورت تصادفی در بازه‌هایی شذنی براساس مطالعات مشابه تولید شده است. جدول ۱ بازه پارامترهای مربوط به مثال‌های عددی تولیدشده را نشان می‌دهد.

در جدول ۳ ترکیبات مختلف E ‌های توابع مختلف و جواب‌های پارتوی حاصل از این ترکیبات برای مثال عددی دوم آمده است. به دلیل زیادبودن تعداد پاسخ‌ها و ترکیبات بخشی از نتایج در جدول ۳ آمده است.

ارائه شده برای مدل پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS 24.1.2 روی کامپیوتر پنج‌هسته‌ای با حافظه 4G و 2.4GHz حل شد و در گام بعدی مقایسه نتایج دو روش صورت گرفت.

روش اپسیلون محدودیت

استفاده از روش E- محدودیت به منظور کاهش مشکلاتی که روش مجموع وزنی در حل مسائل چندهدفه با فضای هدف غیرمحدب دارد، پیشنهاد شده است. در روش E- محدودیت با حفظ تنها یک تابع هدف و در نظر گرفتن سایر توابع به عنوان مجموعه محدودیت‌ها با مقادیر سمت راست قابل تعریف توسط کاربر، مدل‌سازی جدیدی از مسئله بهینه‌سازی چندهدفه ایجاد می‌شود. هر بار براساس یکی از توابع هدف، مسئله حل شده و جواب بهینه ایجاد می‌شود. مهم‌ترین مزیت این روش کاربرد آن در مسائلی با فضای هدف محدب یا غیرمحدب است. همچنین با تغییر مقدار ε می‌توان جواب‌های بهینه مختلفی یافت. در نتیجه این روش در مقایسه با روش وزن‌دهی قادر به یافتن مجموعه متنوع‌تری از جواب‌های بهینه پارتوست. در مدل پیشنهادی تابع هزینه‌ها به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب

جدول ۲. بازه پارامترهای مثال عددی

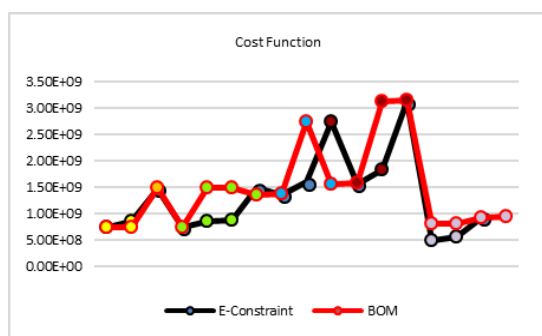
پارامتر	بازه	پارامتر	بازه
O_{fix}^0	[۴۰۰/۵۱۰]	BC_{fix}^0	[۳۰۰/۳۷۰]
RP^{θ}	[۴۰/۶۰]	MC_{fix}^0	[۴۰۰/۵۰۰]
D_{fix}^0	[۷۲۰/۹۰۰]	W_{fix}^0	[۲۲۵۰/۲۴۰۰]
D_{fix}^0	[۶۵۰/۸۵۰]	HC_{fix}^0	[۲۵۰/۴۰۰]
SC_{fix}^0	[۵۰۰/۹۰۰]	HC_{fix}^0	[۲۵۰/۴۰۰]
SC_{fix}^0	[۵۰۰/۹۰۰]	E_{fix}^0	[۲/۳]
SC_{fix}^0	[۴۰۰/۵۸۰]	λ_{fix}	[۴/۵]
PC_{fix}^0	[۵۰۰/۵۷۰]	T_{fix}^0	[۴/۶]
α_{fix}^0	[۲۰۰/۳۵۰]	β_{fix}^0	[۳۰۰/۴۰۰]
F_{dij}	[۴۸۰۰/۶۰۰۰]	ε	مقدار بسیار کوچک
PC_{fix}^0	[۳۰۰/۳۶۰]	COT_{fix}^0	[۶/۸]
BC_{fix}^0	[۲۰۰/۲۷۰]	dd_{fix}^0	[۵/۸]

جدول ۳. مقادیر هزینه مربوط به ترکیبات ε مختلف

ε ترکیبات				نتایج حل		
تابع هدف دوم	تابع هدف سوم	تابع هدف چهارم	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	تابع هدف سوم	تابع هدف چهارم
۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۷۴۴۶۴۰۰۰۰۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۴۸۹۲۸۰۰۰۰۰	نشدنی	نشدنی	نشدنی	نشدنی
۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۲۲۳۳۹۲۰۰۰۰۰	نشدنی	نشدنی	نشدنی	نشدنی
۱۵۰۰۷۰۰۰	۲۱۷۵۴۵۰۰	۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۷۰۰۰	۲۱۷۵۴۵۰۰	۷۴۴۶۴۰۰۰۰۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۷۰۰۰	۲۱۷۵۴۵۰۰	۱۴۸۹۲۸۰۰۰۰۰	نشدنی	نشدنی	نشدنی	نشدنی
۱۵۰۰۷۰۰۰	۲۱۷۵۴۵۰۰	۲۲۳۳۹۲۰۰۰۰۰	نشدنی	نشدنی	نشدنی	نشدنی
۱۵۰۰۷۰۰۰	۲۷۳۹۳۵۰۰	۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۷۰۰۰	۲۷۳۹۳۵۰۰	۷۴۴۶۴۰۰۰۰۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۷۰۰۰	۲۷۳۹۳۵۰۰	۱۴۸۹۲۸۰۰۰۰۰	نشدنی	نشدنی	نشدنی	نشدنی
۱۵۰۰۷۰۰۰	۲۷۳۹۳۵۰۰	۲۲۳۳۹۲۰۰۰۰۰	نشدنی	نشدنی	نشدنی	نشدنی
۱۵۰۰۷۰۰۰	۳۳۰۳۲۵۰۰	۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۷۰۰۰	۳۳۰۳۲۵۰۰	۷۴۴۶۴۰۰۰۰۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۱۵۰۰۷۰۰۰	۳۳۰۳۲۵۰۰	۱۴۸۹۲۸۰۰۰۰۰	نشدنی	نشدنی	نشدنی	نشدنی
۱۵۰۰۷۰۰۰	۳۳۰۳۲۵۰۰	۲۲۳۳۹۲۰۰۰۰۰	نشدنی	نشدنی	نشدنی	نشدنی
۵۰۳۸۵۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰
۵۰۳۸۵۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۷۴۴۶۴۰۰۰۰۰	۷۵۱۰۶۶۰۰۰	۱۵۰۰۷۰۰۰	۱۶۱۱۵۵۰۰	۱۱۰۵۱۹۰۰۰۰۰

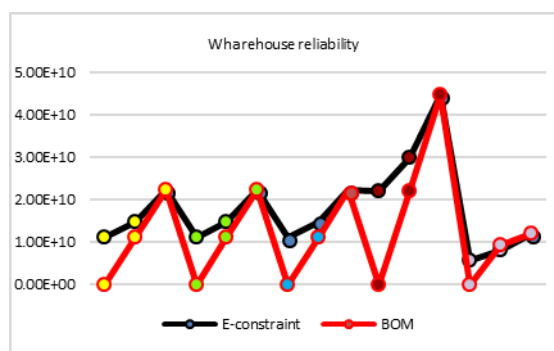
جدول ۴. ابعاد مثال‌های عددی طرح‌شده

اندیس	مسئله ۱	مسئله ۲	مسئله ۳	مسئله ۴	مسئله ۵	مسئله ۶
r	۲	۲	۴	۴	۴	۴
g	۲	۲	۲	۴	۴	۴
p	۲	۲	۲	۲	۳	۳
s	۲	۲	۲	۲	۲	۴
d	۲	۲	۲	۲	۲	۲
c	۲	۳	۳	۶	۶	۶
t	۲	۲	۲	۲	۲	۲
j	۲	۲	۲	۲	۲	۷

نمودار ۱. مقایسه تابع هزینه در روش‌های E -محدودیت و تابع حددار

نمودارهای ۱ تا ۴ مقایسه توابع هدف و زمان‌های حل حاصل از دو روش پیشنهادی به کار گرفته شده را نشان می‌دهد. در شکل ۴-۹ مقادیر تابع هدف هزینه مثال‌های طراحی شده در دو روش پیشنهادی آمده است. نقاط هم‌رنگ در نمودار نشان‌دهنده مقادیر تابع هدف در مثال عددی است. در بیشتر حل‌ها روش E -محدودیت تابع هزینه کمتری ارائه می‌دهد. همچنین در برخی حل‌ها نتایج حاصل از این دو روش حل برابر است.

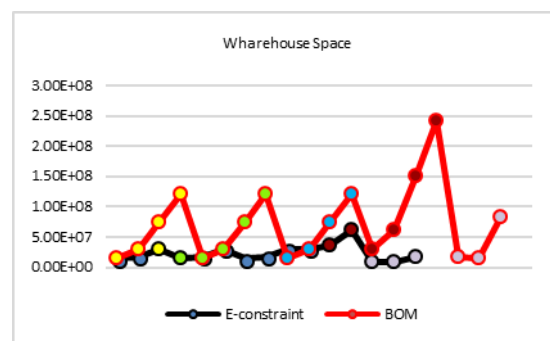
هدف چهارم در مدل پیشنهادی، تابعی غیرقطعی و مربوط به حداکثر کردن مقادیر ارسال به مشتریان به کمک حداقل کردن احتمال مواجه شدن انبار توزیع کنندگان با شکست است. نمودار ۴ مقایسه نتایج حاصل از این تابع در دو روش E -محدودیت و تابع حددار را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، مقادیر ارسال حاصل از روش اپسیلون محدودیت در مثال‌های عددی در سطوح بالاتری از روش BOM قرار دارد.



نمودار ۴. مقایسه تابع شکست انبار در روش‌های E -محدودیت و تابع حددار

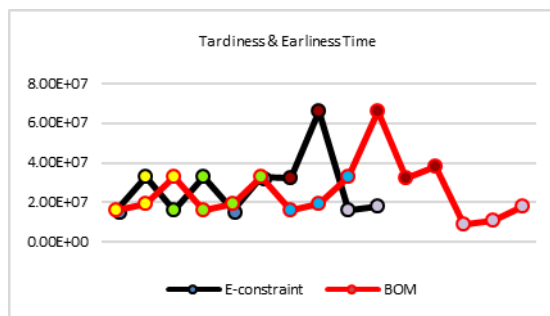
رویکردهای مقایسه روش‌های حل پیشنهادی استفاده از روش‌های علمی در تصمیم‌گیری موفق و منطقی بسیار اهمیت دارد. در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تکنیک‌هایی برای امتیازدهی به معیارهای وابسته به یک موضوع وجود دارد که در نهایت با استفاده از این امتیازها امکان رتبه‌بندی معیارها فراهم می‌شود. در این پژوهش، به منظور تعیین بهترین روش حل از رویکردهای MSI ، SI ، NOS برای مقایسه جواب‌های حاصل از دو روش حل استفاده شده است.

با توجه به نمودار ۲، روش تابع حددار در ارائه ترکیبات بیشتری از پاسخ کارا تر است، اما روش E -محدودیت در حداقل سازی فضای انبارش کارا تر به شمار می‌آید.



نمودار ۲. مقایسه تابع حداقل سازی فضای انبارش در روش‌های E -محدودیت و تابع حددار

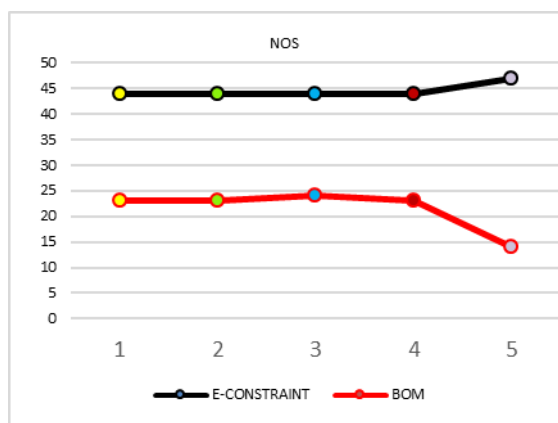
تابع زمان تأخیر و تعجیل تابع حداقل سازی است. در بیشتر نتایج روش E -محدودیت پاسخ کمتری ارائه شده است. همچنین در روش تابع حددار، ترکیبات بیشتری آمده است که البته در برخی از آن‌ها مقادیر زمان با اختلاف زیادی نسبت به مقادیر حاصل از روش اپسیلون محدودیت بزرگ‌تر است که این امر کارا تر بودن روش اپسیلون محدودیت در حداقل سازی زمان را نشان می‌دهد.



نمودار ۳. مقایسه تابع زمان تأخیر و تعجیل در روش‌های E -محدودیت و تابع حددار

جدول ۵. رویکردهای مقایسه روش‌های حل

Problem no.	E -constraint			BOM		
	MSI	CPU Time(s)	NOS	MSI	CPU Time(s)	NOS
۱	$1.0E+1/131107355$	۰۰/۲۱۲:۰۰:۰	۴۴	$1.0E+2/235166353$	۰۰/۴۱۳:۰۰:۰	۲۳
۲	$1.0E+1/131106432$	۰۰/۲۸۶:۰۰:۰	۴۴	$1.0E+2/235164618$	۰۰/۳۶۳:۰۰:۰	۲۳
۳	7571800824	۰۰/۲۶۷:۰۰:۰	۴۴	$1.0E+2/238155987$	۰۰/۱۸۲:۰۰:۰	۲۴
۴	$1.0E+2/262781177$	۰۰/۰۷۰:۰۰:۰	۴۴	$1.0E+4/47066839$	۰۰/۰۷۶:۰۰:۰	۲۳
۵	6245339684	۰۰/۰۱۸:۰۰:۰	۴۷	$1.0E+1/202520178$	۰۰/۰۸۱:۰۰:۰	۱۴



نمودار ۷. معیار *NOS* در سنجش مقادیر زمان حل روش‌های E-محدودیت و تابع حددار

با توجه به معیارهای مقایسه برای دو روش حل می‌توان نتیجه گرفت روش اپسیلون محدودیت از نظر زمان حل و تعداد جواب‌های شدنی برتر از روش *BOM* است، اما روش *BOM* از نظر معیار *MSI* بهتر است. در نتیجه با توجه به مطالعه موردی واقعی در صورت استفاده از این مدل پیشنهادی و با توجه به نظر متخصصان می‌توان روشی کاراتر را برای مطالعه واقعی خاص انتخاب کرد. با توجه به نتایج، هرچه بعد مسئله افزایش یابد، به دلیل پیچیدگی مسئله زمان پردازش اهمیت می‌یابد که از این نظر روش اپسیلون محدودیت نتایج بهتری ارائه داده است. همان‌طور که از ماهیت مسئله پیشنهادی و چندهدفه‌بودن آن مشخص است، در حل مثال‌ها از میان پاسخ‌ها انتخاب پاسخی مناسب است که هم برای توابع هدف مسئله مناسب باشد و هم متغیرهای مسئله مقادیر معقول و قابل قبولی داشته باشند. با توجه به نمودارها و نتایج حاصل برای مقادیر متغیرهای مسئله می‌توان دریافت که اگرچه روش تابع حددار پاسخ‌های متنوع‌تری ارائه داده است، از نظر مقادیر توابع هدف و مقادیر حاصل برای متغیرها، روش اپسیلون محدودیت نتایج بهتری در حل مثال‌های عددی مربوط به مسئله پیشنهادی ارائه داده است.

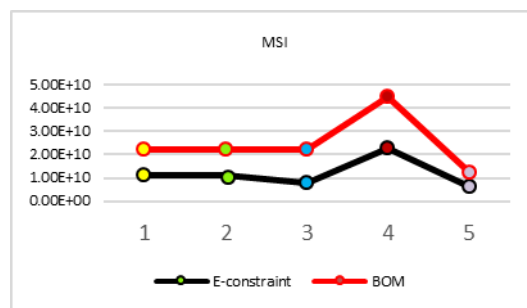
نتیجه‌گیری و پیشنهادها

همان‌گونه که فعالیت‌های بخش‌های مختلف زنجیره تأمین و عدم جزئی‌نگری در برنامه‌ریزی‌های مؤسسات و سازمان‌ها در یک زنجیره، عامل اصلی بقا در بازارهای رقابتی است. در هر

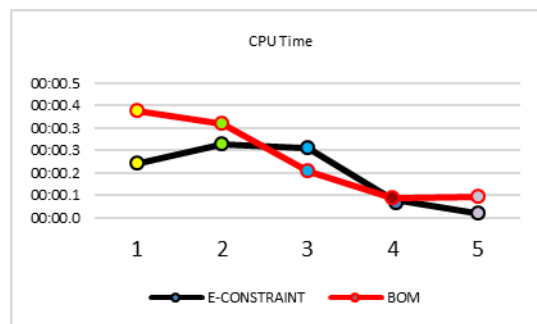
معیار *MSI* گستره جواب‌های پارتو را نشان می‌دهد. هرچه این معیار بزرگ‌تر باشد، بهتر است [۲۸]. *NOS* تعداد جواب‌های پارتو را می‌شمارد که این معیار نیز هرچه بزرگ‌تر باشد، بهتر است [۲۹]. معیار *CPU Time* زمان پردازش را نشان می‌دهد که هرچه کمتر باشد بهتر است. جدول ۵، نتایج حاصل از این رویکردها را برای مقایسه بین روش‌های حل E-محدودیت و تابع حددار نشان می‌دهد. و روند معیارها در هریک از روش‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد. براساس نمودار ۵، روش *BOM* از نظر معیار *MSI* برتر است و دامنه گسترده‌تری از پاسخ‌ها را ارائه می‌دهد.

براساس نمودار ۶، زمان پردازش در بیشتر مسائل در روش اپسیلون محدودیت کمتر از زمان پردازش مربوط به روش *BOM* است.

همچنین از نظر تعداد جواب‌های شدنی نیز روش اپسیلون محدودیت از روش *BOM* برتری دارد که این نتیجه در نمودار ۷ قابل مشاهده است.



نمودار ۵. معیار *MSI* در سنجش مقادیر توابع هدف روش‌های E-محدودیت و تابع حددار



نمودار ۶. معیار *CPU Time* در سنجش مقادیر زمان حل روش‌های E-محدودیت و تابع حددار

زنجیره تأمین هدف اصلی مدیریت، کنترل و برنامه‌ریزی برای جریان محصولات به‌منظور برآورده کردن تقاضای عنصر کلیدی زنجیره یعنی مشتریان است. در این پژوهش، مدل چهارهدفه چندمحصولی پویا برای زنجیره‌های تأمین چهارسطحی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. هدف و تمرکز اصلی این مدل حداکثرکردن محصولات ارسالی به مشتریان در کنار حداقل کردن هزینه‌ها و سرمایه درگیر در بخش موجودی‌های انبار توزیع‌کنندگان است.

مدل ارائه‌شده در سطح راهبردی قابلیت انتخاب توزیع‌کننده‌ها و مکان انبار توزیع‌کننده‌ها را دارد. در نتیجه در سطح تاکتیکی تعیین می‌کند کدام مواد خام و محصولات به چه میزانی به کانال‌های توزیع تخصیص یابند. میزان ارسال ماده خام از هر تأمین‌کننده به کارخانه‌ها، مقدار محصولی که در هر کارخانه در هر دوره تولید می‌شود، موجودی محصولات در مراکز توزیع و کارخانه‌ها و مقدار کمبود (کالاها می‌یوب) مراکز توزیع در همه دوره‌ها از جمله تصمیم‌هایی است که با حل این مدل مشخص می‌شود. به‌منظور نزدیک کردن مدل به واقعیت فرض می‌شود زمان میان هر دو مرتبه متوالی که انبار توزیع‌کنندگان با مشکل در ارسال تقاضای مشتریان مواجه می‌شود، توزیع نمایی دارد. در نهایت مدل ایجادشده در قالب چند مثال عددی در نرم‌افزار GAMS به کمک

روش E -محدودیت و تابع حددار حل شده است. براساس نتایج، مدل برنامه‌ریزی در بعد کوچک و متوسط به کمک روش‌های دقیق حل‌شدنی است. همچنین به‌منظور مقایسه روش‌های حل پیشنهادی، نتایج حاصل به کمک رویکردهای MSI ، NOS و $CPU Time$ بررسی شدند. به دلیل پیچیدگی مدل برای مسائلی با ابعاد بزرگ پیشنهاد می‌شود از روش‌های حل فراابتکاری استفاده شود.

به‌منظور توسعه آتی می‌توان حل مدل را به کمک سایر روش‌های دقیق ریاضی مانند $EBOM$ ، $LP-metric$ و... و مقایسه نتایج حاصل به‌منظور یافتن روش‌های حل کارا و مناسب را در نظر گرفت. همچنین طرح مثال در بعد بزرگ و بررسی روش‌های حل دقیق و فراابتکاری برای مدل ارائه شده پیشنهاد می‌شود. می‌توان از پارامترهای غیرقطعی برای نزدیک‌تر کردن مدل به دنیای واقعی با استفاده از بررسی شکاف‌های پژوهشی در پژوهش اردکانی و همکاران [۳۰] استفاده کرد. همچنین به‌منظور محاسبه واقع‌بینانه هزینه‌ها می‌توان از تکنیک‌های اقتصاد مهندسی مانند ارزش زمانی پول، نرخ تورم و نرخ بهره در محاسبه برخی پارامترهای کلیدی هزینه بهره برد. در مدل پیشنهادی می‌توان از تابع سود به جای تابع هزینه به‌منظور توجه به درآمد و ماکزیم کردن سود حاصل در کنار سایر اهداف استفاده کرد.

منابع

- Clark, A., and Scarf, H. (1960). "Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem", Management Sciences, Vol. 6, No. 4, PP. 475-490.
- Hsiao, J. M., Lin, C., (2005). "A Buyer-Vendor EOQ Model with Changeable Lead Time in Supply Chain", International Journal of Advanced Manufacturing and Technology, Vol. 26, No. 7-8, PP. 917-921.
- Joglekar, P., and Tharthare, S., (1990). "The Individually Responsible and Rational Decision Approach to Economic Lot Sizes for One Vendor and Many Purchasers", Decision Sciences, Vol. 21, No. 3, PP. 492-506.
- Banerjee, A., J. Burton, S., (1994). "Coordinated Vs. Independent Inventory Replenishment Policies for a Vendor and Multiple Buyers", International Journal of Production Economics, Vol. 35, No. 1-3, PP. 215-222.
- Ben Daya, M., and Hariga, M., (2004). "Integrated Single Vendor Single Buyer Model with Stochastic Demand and Variable Lead Time", International Journal of Production Economics, Vol. 92, No. 1, PP. 75-80.
- Siajaji, H., Ibrahim, R. N., and Lochert, P. B., (2006). "Joint Economic Lot Size in Distribution System with Multiple Shipment Policy", International Journal of Production Economics, Vol. 102, No. 2, PP. 302-316.

7. Hoque, M. A., (2008). "Synchronization in the Single-Manufacturer Multi-Buyer Integrated Inventory Supply Chain", *European Journal of Operational Research*, Vol. 188, No. 3, PP. 811–825.
8. Taleizadeh, A. A., Niaki, S. T. A., and Barzinpour, F., (2011). "Multiple-Buyer Multiple-Vendor Multi-Product Multi-Constraint Supply Chain Problem with Stochastic Demand and Variable Lead-Time: A Harmony Search Algorithm", *Applied Mathematics and Computers*, Vol. 217, No. 22, PP. 9234-9253.
9. Routroy, S., and Kodali, R., (2005). "Differential Evolution Algorithm for Supply Chain Inventory Planning", *Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 16, No. 1, PP. 7–17.
10. Azaron, A. et al (2008). "A Multi-Objective Stochastic Programming Approach for Supply Chain Design Considering Risk", *International Journal of Production Economics*, Vol. 116, No. 1, PP. 129–138.
11. El Sayed, M., Afia, N., and El Kharbotly, A., (2010). "A Stochastic Model for Forward Reverse Logistics Network Design Under Risk", *Computer and Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, PP. 423–431.
12. Zhou, W. Q., Chen, L., and Ge, H. M., (2013). "A Multi-Product Multi-Echelon Inventory Control Model with Joint Replenishment Strategy", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, No. 14, PP. 2039-2050.
13. Altıparmak, M. et al. (2006), "A Genetic Algorithm Approach for Multi-Objective Optimization of the Supply Chain", *Networking, Computing and Engineering*, Vol. 51, No. 1, PP. 197-216
14. Jafari, A., Sharif Yazdi, M., and Jafarian, M., (2010). "A New Multi-Objective Approach in Distribution Centers Location Problem in Fuzzy Environment", *Journal of Uncertain Systems*, Vol. 4, No. 2, PP. 133-146.
15. Yazdian, A., and Shahanaghi, K., (2011). "A Multi-Objective Possibilistic Programming Approach for Locating Distribution Centers and Allocating Customers' Demands in Supply Chains", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 2, No. 1, PP. 193-202.
16. Pourroosta, A., Tavakoli Moghadam, R., and Ebrahimnezhad, S., (2011), "Multi-Product Multi-Period Manufacturing-Distribution Programming Model with Considering Fuzzy Parameters", *Journal of Industrial Engineering*, Vol. 46, No. 2, PP. 147-158.
17. Razmi, J., Zahedi Anaraki, A., and Zakerinia, M., (2013). "A Bi-Objective Stochastic Optimization Model for Reliable Warehouse Network Redesign", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 58, No. 11-12, PP. 1804–1813.
18. Arabzad, S. M., Ghorbani, M., and Tavakkoli Moghaddam, R., (2014). "An Evolutionary Algorithm for a New Multi Objective Location-Inventory Model in a Distribution Network with Transportation Modes and Third-Party Logistics Providers", *International Journal of Production Research*, Vol. 53, No. 4, PP. 1038-1050.
19. Jiang, L., and Cui, Y., (2014). "Study on Multi-Resolution and Multi-Objective Site Selection Model for Logistics Distribution Centre", *Proceedings of the 17th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate*, Springer, PP. 869-876.
20. Ahmadi Javid, A., and Hoseinpour, P., (2015). "Incorporating Location, Inventory and Price Decisions Into a Supply Chain Distribution Network Design Problem", *Computers and Operations Research*, Vol. 56, PP. 110–119.
21. Mortezaei, N., Zulkifli, N., and Nilashi, M., (2015). "Trade-Off Analysis for Multi-Objective Aggregate Production Planning", *Journal of Soft Computing and Decision Support System*, Vol. 2, No. 2, PP. 1-4.
22. Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A., and Asadi, K., (2015). "Optimizing a Bi-Objective Multi-Product Multi-Period Three Echelon Supply Chain Network with Warehouse Reliability", *Expert Systems with Applications* Vol. 42, No. 5, PP. 2615-2623.
23. Yu, M. C., and Goh, M., (2014). "A Multi-Objective Approach to Supply Chain Visibility and Risk", *European Journal of Operational Research*, Vol. 233, No. 1, PP. 125-130.

24. Kamali, A., Fatemi Ghomi, S. M. T., and Jolai, F., (2011). "A Multi-Objective Quantity Discount and Joint Optimization Model for Coordination of a Single-Buyer Multi-Vendor Supply Chain", Computers and Mathematics with Applications, Vol. 62, No. 8, PP. 3251-3262.
25. Ozgen, D., and Gulsun, B., (2014). "Combining Possibilistic Linear Programming and Fuzzy AHP for Solving the Multi-Objective Capacitated Multi-Facility Location Problem", Information Science, Vol. 268, No. 1, PP. 185-201
26. Sarrafha, K. et al. (2015). "Bi-Objective Integrated Procurement, Production and Distribution Problem of a Multi-Echelon Supply Chain Network Design: A New Tuned MOEA", Computers and Operations Research, Vol. 54, PP. 35-51.
27. Sadeghi, J., and Niaki, S. T. A., (2015). "Two Parameter Tuned Multi-Objective Evolutionary Algorithms for a Bi-Objective Vendor Managed Inventory Model with Trapezoidal Fuzzy Demand", Applied Soft Computing, Vol. 30, PP. 567-576.
28. Zitzler, E., and Thiele, L., (1998). "Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms- A Comparative Case Study", Parallel Problem Solving from Nature, Germany, vol 1498. Springer, PP. 292-301.
29. Zitzler, E., Laumanns, M., and Thiele, L., (2001). "SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, Evolutionary Methods for Design", Optimization and Control with Applications to Industrial Problems, Greece, PP. 95-100 (2001).
30. Kahafi Ardakani, A., Seyedhosseini, S. M., and Tavakoli Moghadam, R., (2016). "Location-Routing Problems: An Overview on Concepts, Models, Solving Methods, Applications and Research Gaps", Journal of Industrial Engineering, Vol. 51, No. 2, PP. 223-250.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Clark
2. Hsiao
3. Lin
4. Joglekar
5. Tharthare
6. Banerjee
7. Burton
8. Ben-Daya
9. Hariga
10. Siajadi
11. Hoque
12. Routroy
13. Kodali
14. Azaron
15. El-Sayed
16. Zhou
17. Altiparmak
18. Jiang
19. Ozgen
20. Gulsun