مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۱-۳۴، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۸۷-۹۴

Original Article

مدل‌سازی و حل یک مسئله‌ی دوهدفه‌ی زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی و تحلیل حساسیت آن با استفاده از آزمون فرض آماری و روش‌های تاپسیس و میانگین ساده‌ی وزنی

حسن حیدری فتحیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)
سید حمیدرضا پسندیده * (دانشیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه خوارزمی

این تحقیق به ارائه‌ی مدلی دوهدفه برای بهینه‌سازی یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی می‌پردازد. این زنجیره‌ی تأمین از نوع چندمحصولی و چنددوره‌یی است و سطوح آن به‌ترتیب شامل واحدهای تولیدی، مراکز پخش و مشتریان است. اهداف این مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین و به‌طور همزمان بیشینه‌سازی میانگین سطوح موجودی اطمینان است. مسئله در ابتدا در قالب یک مدل دوهدفه‌ی غیرخطی عدد صحیح فرمول‌بندی می‌شود. سپس به‌منظور حل مدل از دو روش بیشینه ـ کمینه و معیار جامع استفاده می‌شود. مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS و در ۳۰ اندازه‌ی مختلف اجرا می‌شود. در ادامه براساس سه معیار و با استفاده از آزمون فرض آماری روش‌های پیشنهادی با یکدیگر مقایسه و از دو الگوریتم تاپسیس و مجموع ساده‌ی وزنی برای انتخاب روش برتر استفاده می‌شود. درنهایت تحلیل حساسیت بر روی چند پارامتر صورت می‌گیرد.

واژگان کلیدی: مدیریت زنجیره‌ی تأمین، بهینه‌سازی چندهدفه، تصمیم‌گیری چندمعیاره، آزمون فرض آماری.

std_fathian@khu.ac.ir
shr_pasandideh@khu.ac.ir

۱. مقدمه

زنجیره‌ی تأمین شبکه‌یی یکپارچه از تأمین‌کنندگان، واحدهای تولیدی، مراکز پخش و مشتریان است. دریافت مواد خام و تبدیل آنها به محصول نهایی، مکان‌یابی مراکز پخش و رساندن محصول به مشتری نهایی در مقدار مناسب[۱]، محل مناسب[۲] و زمان مناسب[۳] فعالیت‌هایی هستند که اجزای زنجیره‌ی تأمین برای انجام آنها سازماندهی شده‌اند.[۱] بهینه‌سازی زنجیره‌ی تأمین به معنای انتخاب منابع به نحوی است که تابع یا توابع هدف مورد نظر بهینه شوند.[۲] هدف از مدیریت زنجیره‌ی تأمین در بیشتر زنجیره‌های تأمین تک‌هدفه کمینه‌کردن هزینه یا بیشینه‌کردن سود است. اما در عمل، مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین نیازمند اهداف دیگری همچون کمینه‌سازی زمان تحویل، بیشینه‌سازی سطح خدمت‌رسانی، اثرات زیست‌محیطی[۴] و... نیز هست.[۳]

در سال ۲۰۰۶ امیری یک مدل زنجیره‌ی تأمین را به‌منظور دست‌یابی به بهترین تصمیمات راهبردی در مکان‌یابی واحدهای تولیدی و مراکز پخش برای ارسال کالا به مشتریان با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های شبکه‌ی توزیع ارائه کرد.[۴] در سال ۲۰۱۵ نوبیل و اخوان‌نیاکی یک مدل تک‌هدفه‌ی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای تصمیمات مکان‌یابی ـ تخصیص یک زنجیره‌ی تأمین چهارسطحی با هدف بیشینه‌کردن ارزش خالص فعلی جریان نقدی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین ارائه کردند.[۵] در سال ۲۰۰۹ گبنینی و همکاران یک سیستم تولید ـ توزیع سه‌سطحی را به‌منظور کمینه‌سازی هزینه‌ها ارائه کردند که در آن یک مسئله‌ی مکان‌یابی ـ تخصیص پویا با کنترل سطح خدمت‌رسانی به مشتریان و بهینه‌سازی موجودی اطمینان مدل‌سازی شد.[۶] تحقیق دیگری در همین سال توسط یاداو و همکاران صورت گرفت که هدف آن بهینه‌سازی مجموع هزینه‌های یک مدل زنجیره‌ی تأمین بود.[۷]

در اکثر موارد توابع هدف با یکدیگر در تضادند. مثلاً بیشینه‌سازی سطح خدمت‌رسانی موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود. بنابراین هدف باید یافتن راه حلی باشد که نتایج قابل قبولی برای تمام توابع هدف در حال رقابت ارائه کند. در سال ۲۰۱۰ فرانکا و همکاران، یک مدل چندهدفه‌ی تصادفی را به‌منظور ارزیابی تعادل بین هزینه و کیفیت زنجیره‌ی تأمین مدل‌سازی کردند.[۸] در سال ۲۰۱۱ میرزاپور و همکاران یک مدل زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی را در نظر گرفتند. مدل آنها دارای دو هدف بود که اولی سعی در کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره داشت و دومی مجموع بیشترین مقادیر کمبود مشتریان را کمینه می‌کرد.[۹] در سال ۲۰۱۲ چیبلس و همکاران مدل دو هدفه‌یی را پیشنهاد کردند که در آن زنجیره‌ی تأمین را هم از لحاظ اقتصادی و

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۲/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۵/۴/۱۴، پذیرش ۱۳۹۵/۵/۶.
DOI:10.24200/J65.2018.5542

هم از لحاظ زیست‌محیطی بررسی کردند. هدف آنها رسیدن به مطلوبیت اقتصادی با درنظرگرفتن ملاحظات زیست‌محیطی بود.[۱۰] در سال ۲۰۱۳ رزمی و همکاران یک مدل دوهدفه را به‌منظور طراحی مجدد یک شبکه‌ی انبار ارائه کردند. اهداف مدل ارائه‌شده، کمینه‌سازی هزینه‌ها و همچنین بیشینه‌سازی درصد پوشش تقاضای مشتری بود.[۱۱] سوسمیتا و رنجان در تحقیق دیگری در همان سال مدل دوهدفه‌یی پیشنهاد کردند که اهداف آن شامل کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های زنجیره و دیگری کمینه‌سازی اثر شلاقی در طول زنجیره‌ی تأمین بود.[۱۲] در سال ۲۰۱۴ کاردونا والدز و همکاران به توسعه مدلی برای طراحی یک زنجیره‌ی تأمین پرداختند. مدل ارائه‌شده دارای دو هدف به‌منظور کمینه‌کردن هزینه‌ها و به‌طور همزمان کمینه‌سازی زمان خدمت‌دهی بود.[۱۳] روش‌های مختلفی به‌منظور حل مسائل چندهدفه وجود دارد. در سال ۲۰۱۵ پسندیده و همکاران یک مدل دوهدفه را برای یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی ارائه و از شش روش مختلف به‌منظور حل آن استفاده کردند.[۱۴] در همین سال وحدانی و محمدی مدل دوهدفه‌یی برای طراحی یک زنجیره‌ی تأمین حلقه بسته ارائه کردند. اهداف مدل ارائه‌شده شامل کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها و همین‌طور کمینه‌سازی بیشینه‌ی زمان‌های انتظار در صف محصولات تولیدی بود.[۱۵] سلطانی و همکاران در همین سال مدل دوهدفه‌یی را ارائه کردند که به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌ها و همچنین کمینه‌سازی میزان کربن‌دی‌اکسید تولیدشده در اثر حمل‌ونقل در طول زنجیره‌ی تأمین بود.[۱۶] در سال ۲۰۱۶ فلیکس و همکاران، یک مدل دوهدفه را برای یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی پیشنهاد دادند. هدف از مدل ارائه‌شده توسط آنها، کمینه‌سازی هزینه‌ها و به‌طور همزمان کمینه‌سازی تعداد دفعاتی بود که خرده‌فروشان محصولات سفارش داده شده‌ی خود را به موقع دریافت نمی‌کردند.[۱۷] در همین سال تحقیق دیگری صورت گرفت که در آن دو هدف به‌منظور کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین و همچنین بیشینه‌سازی سطح خدمت‌دهی پیشنهاد شده بود.[۱۸]

در این مقاله یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی چنددوره‌یی شامل واحدهای تولیدی که محصولات مختلفی را تولید می‌کنند، مراکز پخش که محصولات تولیدی را به‌منظور پاسخگویی به نیازهای مشتریان ذخیره می‌کنند، و در نهایت مشتریان که سطح نهایی زنجیره‌ی تأمین هستند، درنظرگرفته شده است. قابلیت پاسخگویی بالا برای رفع نیازهای مشتری از جمله اهدافی است که در مدیریت زنجیره‌ی تأمین بسیار حائز اهمیت است. نوآوری این تحقیق که در سایر پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه مشاهده نشده است، ارائه‌ی تابعی برای بیشینه‌سازی میانگین سطوح موجودی اطمینان به‌منظور کاهش احتمال مواجه‌شدن با کمبود در هنگام تقاضای مشتری و افزایش قابلیت پاسخگویی است. عدم توانایی در برطرف ساختن نیازهای مشتری می‌تواند باعث ازدست‌دادن مشتری و اعتبار شود. می‌توان با تعیین سیاست‌هایی با این مشکل احتمالی مقابله کرد. این رویکرد می‌تواند در همه‌ی شرکت‌هایی که در آنها داشتن قابلیت پاسخگویی بالا یک امر مهم تلقی می‌شود، به‌کار گرفته شود. اهداف این مسئله تعیین تعداد و مکان بهینه‌ی مراکز پخش، تعداد بهینه‌ی محصولات تولیدی کارخانه‌ها، میزان بهینه‌ی محصولات ارسال‌شده از واحدهای تولیدی به مراکز پخش و از مراکز پخش به مشتریان، مقدار بهینه‌ی موجودی در مراکز پخش و واحدهای تولیدی، میزان بهینه‌ی موجودی اطمینان کوتاه در واحدهای تولیدی و مراکز پخش، و مقدار بهینه‌ی کمبود محصولات مشتریان است. مسئله دارای دو تابع هدف متضاد است. هدف اول کمینه‌سازی هزینه‌ی کل زنجیره‌ی تأمین و هدف دوم بیشینه‌سازی میانگین سطوح موجودی اطمینان واحدهای تولیدی و مراکز پخش است. مسئله در ابتدا در قالب یک مدل غیرخطی دوهدفه فرمول‌بندی می‌شود. روش‌های حل گوناگونی برای حل مدل‌های چندهدفه وجود دارد. در این تحقیق از دو روش حل مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه به‌منظور حل مدل ارائه‌شده استفاده می‌شود. نوآوری دیگر این تحقیق نسبت به سایر تحقیقات صورت‌گرفته، در روش حل آن است. بدین ترتیب که در هر یک از دو روش پیشنهادی به‌منظور حل مدل، مدل مسئله در ۳۰ اندازه‌ی مختلف با استفاده از نرم‌افزار GAMS اجرا و سپس از آزمون فرض آماری به‌منظور مقایسه‌ی دو روش پیشنهادی استفاده می‌شود. بدین منظور براساس سه معیار از پیش‌تعیین‌شده، میانگین نتایج ۳۰ مرتبه اجرای مدل در دو روش توسط آزمون فرض برابری میانگین‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در ادامه برای انتخاب روش برتر از الگوریتم‌های تاپسیس[۵] و مجموع ساده‌ی وزنی[۶] استفاده می‌شود. همچنین در نهایت، تحلیل حساسیت بر روی چند پارامتر مسئله صورت می‌گیرد.

در بخش دوم، مسئله و مدل ریاضی ارائه‌شده به‌طور کامل بیان می‌شود. در بخش سوم روش حل مسئله توضیح داده شده می‌شود و مثال عددی در بخش چهارم بیان خواهد شد. مسئله در بخش پنجم مورد تحلیل حساسیت واقع می‌شود و نهایتاً در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. بیان مسئله

در این بخش به توضیح مسئله پرداخته می‌شود. این مسئله دارای دو تابع هدف متضاد برای یک زنجیره‌ی تأمین سه سطحی است. تابع هدف نخست سعی در کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین دارد. تابع هدف دوم نیز به‌دنبال بیشینه‌سازی میانگین سطوح موجودی اطمینان برای افزایش قابلیت پاسخگویی تقاضای مشتری است. با توجه به این‌که افزایش سطوح موجودی باعث افزایش هزینه‌های نگه‌داری و در واقع افزایش هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین می‌شود، نمی‌توان هر دو تابع هدف را همزمان بهینه‌ی مطلق کرد و به‌عبارت دیگر دو تابع هدف با یکدیگر در تضادند. اولین سطح این زنجیره‌ی تأمین شامل کارخانه‌های تولیدی است که مواد اولیه را به محصول مورد نظر تبدیل می‌کنند. سطح دوم این زنجیره‌ی تأمین به مراکز توزیع اختصاص دارد که کالاهای نهایی را، که از کارخانه‌های تولیدی دریافت می‌کنند، در خود ذخیره می‌کند و کالاها را به سطح سوم این زنجیره‌ی تأمین، که مشتریان کالاها هستند، ارسال می‌کنند. در این مسئله تعدادی مرکز پخش به‌صورت کاندید در نظر گرفته شده‌اند که با توجه به هزینه‌ی ثابت احداث و ظرفیت مراکز پخش تعداد مناسب آنها تعیین می‌شود. همچنین مسئله در دوره‌های مختلف و با چند نوع کالای تولیدی بررسی می‌شود.

زنجیره‌ی تأمین این مسئله دارای یک محیط قابل تشخیص است که در آن تمام پارامترهای ورودی مانند تقاضا، زمان‌های تولید، زمان‌های راه‌اندازی و هزینه‌های مختلف زنجیره مشخص است. کارخانه‌های تولیدی دارای محدودیت در تولید و ذخیره‌ی محصولات در یک دوره‌اند. همچنین مراکز پخش نیز دارای حجم محدود به‌منظور ذخیره‌ی محصولات یک دوره هستند. هدف مسئله تشخیص موارد زیر است:

- نوع و تعداد محصولاتی که باید در یک دوره توسط کارخانه‌ها تولید شوند؛
- جریان محصولات بین واحدهای تولیدی و مراکز پخش انتخاب شده؛
- تخصیص مشتریان به مراکز پخش انتخاب شده؛
- تعداد و محل مراکز پخش؛
- موجودی واحدهای تولیدی و مراکز پخش در پایان دوره؛
- میزان کمبود تقاضای مشتری؛
- میزان موجودی اطمینان کوتاه.

به‌طوری‌که:

۱. مجموع هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین شامل هزینه‌ی تولید، حمل‌ونقل، توزیع، اجرا، احداث مراکز پخش، کمبود و هزینه‌های موجودی واحدهای تولیدی و مراکز پخش کمینه شود.

۲. میانگین سطوح موجودی اطمینان برای واحدهای تولیدی و مراکز پخش بیشینه شود.

۳. مدل‌سازی مسئله

در این بخش یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح دوهدفه برای مسئله ارائه می‌شود. نمادهای مدل مسئله در ادامه تعریف می‌شوند.

۱.۳. مجموعه‌ها

M: تعداد تأمین‌کنندگان $(m = ۱, ۲, ..., M)$؛

J: تعداد محل‌های کاندید مراکز پخش $(j = ۱, ۲, ..., J)$؛

I: تعداد مشتریان $(i = ۱, ۲, ..., I)$؛

K: انواع محصولات تولیدشده $(k = ۱, ۲, ..., K)$؛

T: تعداد دوره‌های زمانی $(t = ۱, ۲, ..., T)$.

۲.۳. پارامترها

c^k_{mt}: هزینه‌ی تولید هر واحد محصول نوع k توسط کارخانه‌ی m در دوره‌ی زمانی t؛

d^k_{jmt}: هزینه‌ی ارسال هر واحد محصول نوع k از کارخانه‌ی m به مرکز پخش j در دوره‌ی زمانی t؛

d^k_{ijt}: هزینه‌ی ارسال هر واحد محصول نوع k از مرکز پخش j به مشتری i در دوره‌ی زمانی t؛

CA^k_{mt}: هزینه‌ی راه‌اندازی تولید محصول نوع k توسط کارخانه‌ی m در دوره‌ی زمانی t؛

HD^k_{jt}: هزینه‌ی نگه‌داری هر واحد محصول نوع k توسط مرکز پخش j در دوره‌ی زمانی t؛

HP^k_{mt}: هزینه‌ی نگه‌داری هر واحد محصول نوع k توسط کارخانه‌ی m در دوره‌ی زمانی t؛

CS^K_{it}: هزینه‌ی کمبود هر واحد محصول نوع k مورد تقاضای مشتری i در دوره‌ی زمانی t؛

f_j: هزینه‌ی ثابت انتخاب یک مکان به‌عنوان مرکز پخش؛

PT^k_m: زمان مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول نوع k توسط کارخانه‌ی m در هر دوره‌ی زمانی $(\mathrm{h/unit})$؛

A^k_m: زمان راه‌اندازی برای تولید محصول نوع k توسط کارخانه‌ی m در هر دوره‌ی زمانی؛

TT_{mt}: مجموع زمان تولید در دسترس کارخانه m به‌منظور تولید محصولات در دوره‌ی زمانی t؛

W_j: مجموع ظرفیت در دسترس مرکز پخش j برای ذخیره‌ی محصولات در هر دوره‌ی زمانی $(\mathrm{m^3})$؛

W_m: مجموع ظرفیت در دسترس کارخانه‌ی m برای ذخیره‌ی محصولات در هر دوره‌ی زمانی $(\mathrm{m^3})$؛

R^k_m: مجموع ظرفیت ارسال در دسترس کارخانه‌ی m برای ارسال محصول نوع k در هر دوره‌ی زمانی؛

DC^k_{it}: میزان تقاضای مشتری i از محصول نوع k در دوره‌ی زمانی t؛

V_k: حجم هر واحد محصول نوع k، $(\mathrm{m^3})$؛

SI^k_j: میزان موجودی اطمینان محصول k در مرکز پخش j در هر دوره‌ی زمانی؛

SI^k_m: میزان موجودی اطمینان محصول k در کارخانه‌ی m در هر دوره‌ی زمانی.

۳.۳. متغیرها

Z^k_{mt}: متغیر دودویی تولید محصول؛ که اگر کارخانه m محصول k را در دوره‌ی t تولید کند مقدار ۱، و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد؛

Y_j: متغیر دودویی احداث مرکز پخش؛ که اگر مرکز پخش j احداث شود مقدار ۱، و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد؛

Q^k_{mt}: میزانی از محصول نوع k که توسط کارخانه‌ی m در دوره‌ی زمانی t تولید می‌شود؛

U^k_{jmt}: میزانی از محصول نوع k که توسط کارخانه‌ی m در دوره‌ی زمانی t به مرکز پخش j ارسال می‌شود؛

X^k_{ijt}: میزانی از محصول نوع k که توسط مرکز پخش j در دوره‌ی زمانی t به مشتری i ارسال می‌شود؛

S^k_{it}: میزان کمبود محصول نوع k مربوط به تقاضای مشتری نوع i در دوره‌ی زمانی t؛

I^k_{mt}: میزان موجودی محصول نوع k در کارخانه‌ی m در پایان دوره‌ی t؛

I^k_{jt}: میزان موجودی محصول نوع k در مرکز پخش j در پایان دوره‌ی t؛

SH^k_{jt}: میزان سطح موجودی اطمینان کوتاه محصول نوع k در مرکز پخش j در پایان دوره‌ی t؛

SH^k_{mt}: میزان سطح موجودی اطمینان کوتاه محصول نوع k در کارخانه‌ی m در پایان دوره‌ی t.

۴.۳. مدل مسئله

$$\begin{aligned}\text{Min } Z_۱ = &\sum_{j=۱}^{J} f_j Y_j + \sum_{t=۱}^{T}\sum_{m=۱}^{M}\sum_{k=۱}^{K}\sum_{j=۱}^{J} d^k_{jmt} U^k_{jmt} \\ &+ \sum_{m=۱}^{M}\sum_{t=۱}^{T}\sum_{k=۱}^{K} CA^k_{mt} Z^k_{mt} + \sum_{j=۱}^{J}\sum_{t=۱}^{T}\sum_{k=۱}^{K} HD^k_{jt} I^k_{jt} \\ &+ \sum_{t=۱}^{T}\sum_{i=۱}^{I}\sum_{k=۱}^{K}\sum_{j=۱}^{J} d^k_{ijt} X^k_{ijt} + \sum_{i=۱}^{I}\sum_{t=۱}^{T}\sum_{k=۱}^{K} CS^k_{it} S^k_{it} \\ &+ \sum_{m=۱}^{M}\sum_{t=۱}^{T}\sum_{k=۱}^{K} C^k_{mt} Q^k_{mt} + \sum_{m=۱}^{M}\sum_{t=۱}^{T}\sum_{k=۱}^{K} HP^k_{mt} I^k_{mt}\end{aligned} \quad (۱)$$

$$\text{Max } Z_۲ = \sum_{m=۱}^{M}\sum_{t=۱}^{T}\sum_{k=۱}^{K}\left(۱ - \frac{SH^k_{mt}}{SI^k_m}\right) + \sum_{j=۱}^{J}\sum_{t=۱}^{T}\sum_{k=۱}^{K} Y_j\left(۱ - \frac{SH^k_{jt}}{SI^k_j}\right) \quad (۲)$$

Subject to

$$\sum_{k=1}^{K} PT_m^k.Q_{mt}^k + \sum_{k=1}^{K} A_m^k.Z_{mt}^k \le TT_{mt} \quad \forall m,t \tag{۳}$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M} V_k.U_{jmt}^k \le W_j Y_j \quad \forall j,t \tag{۴}$$

$$\sum_{j=1}^{J} X_{ijt}^k \le DC_{it}^k \quad \forall i,t,k \tag{۵}$$

$$\sum_{k=1}^{K} V_k.I_{jt}^k \le W_j Y_j \quad \forall j,t \tag{۶}$$

$$\sum_{j=1}^{J} U_{jmt}^k \le R_m^k Z_{mt}^k \quad \forall k,t,m \tag{۷}$$

$$\sum_{k=1}^{K} V_k.Q_{mt}^k \le W_m \quad \forall m,t \tag{۸}$$

$$\sum_{k=1}^{K} V_k.I_{mt}^k \le W_m \quad \forall m,t \tag{۹}$$

$$I_{jt}^k = I_{jt-1}^k + \sum_{m=1}^{M} U_{jmt}^k - \sum_{i=1}^{I} X_{ijt}^k \quad \forall j,k,t \tag{۱۰}$$

$$I_{mt}^k = I_{mt-1}^k + Q_{mt}^k - \sum_{j=1}^{J} U_{jmt}^k \quad \forall m,k,t \tag{۱۱}$$

$$S_{it}^k = S_{it-1}^k + DC_{it}^k - \sum_{j=1}^{J} X_{ijt}^k \quad \forall i,k,t \tag{۱۲}$$

$$SH_{mt}^k = \begin{cases} SI_m^k - I_{mt}^k & SI_m^k \ge I_{mt}^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall m,k,t \tag{۱۳}$$

$$SH_{jt}^k = \begin{cases} SI_j^k - I_{jt}^k & SI_j^k \ge I_{jt}^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall j,k,t \tag{۱۴}$$

$$Y_j, Z_{mt}^k \in \{0,1\} \quad \forall m,j,k,t \tag{۱۵}$$

$$\begin{pmatrix} Q_{mt}^k, I_{mt}^k, S_{it}^k, X_{ijt}^k, \\ U_{jmt}^k, I_{jt}^k, SH_{mt}^k, SH_{jt}^k \end{pmatrix} \ge 0 \quad \forall m,j,i,k,t \tag{۱۶}$$

رابطه‌ی ۱ نشان‌دهنده‌ی تابع هدف اول است که هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین می‌باشد. این هزینه‌ها به‌ترتیب شامل هزینه‌ی ثابت احداث مرکز پخش، هزینه‌ی ارسال محصولات از کارخانه‌ها به مراکز پخش، هزینه‌ی راه اندازی تولید، هزینه‌ی نگه‌داری محصولات در مراکز پخش، هزینه‌ی ارسال محصولات از مراکز پخش به مشتریان، هزینه‌ی کمبود تقاضای مشتریان، هزینه‌ی تولید محصولات در کارخانه‌ها و هزینه‌ی نگه‌داری محصولات در کارخانه‌ها هستند. تابع هدف دوم نشان‌داده‌شده در رابطه‌ی ۲ سعی در بیشینه‌سازی میانگین سطوح موجودی اطمینان کارخانه‌های تولیدی و مراکز پخش دارد. رابطه‌ی ۳ بیشینه‌ی زمان در دسترس برای تولید محصولات را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۴ نشان‌گر آن است که بیشینه‌ی مقدارکالای ارسالی به مراکز پخش نباید از ظرفیت آنها بیشتر باشد. رابطه‌ی ۵ اعلام می‌کند که مقدارکالای ارسالی هر نوع محصول به مشتری در یک دوره نباید از تقاضای مشتری بیشتر شود. ظرفیت نگه‌داری موجودی مراکز پخش در پایان هر دوره در رابطه‌ی ۶ نشان داده شده است. رابطه‌ی ۷ مشخص می‌کند که میزان کالای ارسال‌شده از یک کارخانه نمی‌تواند از ظرفیت ارسال آن کارخانه بیشتر شود. رابطه‌ی ۸ بیشینه‌ی مقدار ممکن تولید محصول درکارخانه‌ها را با توجه به ظرفیت ذخیره‌ی هرکارخانه مشخص می‌کند. رابطه‌ی ۹ نشان‌گر بیشینه‌ی موجودی قابل نگه‌داری هرکارخانه در پایان هر دوره‌ی زمانی است. رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ به‌ترتیب مشخص‌کننده‌ی میزان موجودی اطمینان مراکز پخش و کارخانه‌ها در پایان هر دوره‌ی زمانی‌اند. رابطه‌ی ۱۲ میزان کمبود تقاضای مشتری را نشان می‌دهد. رابطه‌ی دو ضابطه‌یی ۱۳ میزان موجودی اطمینان کوتاه محصولات را درکارخانه‌ها در پایان هر دوره‌ی زمانی نشان می‌دهد. هنگامی که میزان موجودی اطمینان از موجودی محصول در پایان دوره‌ی زمانی بیشتر باشد مقدار موجودی اطمینان کوتاه برابر با اختلاف بین موجودی اطمینان و موجودی محصول در پایان دوره است و در غیر این صورت این مقدار صفر می‌شود. به‌طور مشابه رابطه‌ی ۱۴ میزان موجودی اطمینان کوتاه محصولات را در مراکز پخش در پایان هر دوره‌ی زمانی نشان می‌دهد. رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ نیز نوع متغیرهای مسئله و مقادیر ممکن آنها را نشان می‌دهند.

۴. حل مدل پیشنهادی

روش‌های مختلفی برای حل مدل‌های چندهدفه وجود دارد. این روش‌ها به چهار طبقه‌ی کلی تقسیم شده‌اند. اولین گروه روش‌هایی هستند که فرایند حل آنها بدون کسب اطلاعات اولیه از تصمیم‌گیرنده صورت می‌پذیرد. روش‌های گروه دوم با کسب اطلاعات اولیه از تصمیم‌گیرنده عمل می‌کنند. گروه سوم شامل روش‌هایی است که در حین حل از تصمیم‌گیرنده اطلاعات دریافت می‌کنند و روش‌های گروه چهارم روش‌هایی هستند که براساس دیدگاه تصمیم‌گیرنده در پایان حل عمل می‌کنند.

روش‌های معیار جامع[۷] و بیشینه ـ کمینه[۸] از جمله روش‌های گروه اول هستند که در فرایند حل خود اطلاعات اولیه‌یی از تصمیم‌گیرنده دریافت نمی‌کنند.[۱۹] در این تحقیق در ابتدا از این دو روش به‌منظور حل مدل ارائه‌شده بهره گرفته شده است. سپس به‌منظور مقایسه‌ی این دو روش از آزمون فرض برابری میانگین‌ها و برای انتخاب بهترین گزینه از بین دو روش، از الگوریتم‌های تاپسیس و مجموع ساده‌ی وزنی استفاده شده است. در ادامه روش‌های حل انتخاب شده به‌طور مختصر بیان شده است.

۱.۴. روش معیار جامع

هدف این روش محاسبه‌ی جواب به‌گونه‌یی است که میزان اختلاف بین p تابع هدف $(f_j; j = 1, 2, ..., p)$ و مقادیر جواب ایده‌آل آنها که از روش بهینه‌سازی انفرادی محاسبه شده است، $(f_j^*; j = 1, 2, ..., p)$ کمترین مقدار را داشته باشد. به‌عبارت دیگر هنگامی که تمام توابع هدف از نوع بیشینه‌سازی هستند (توابع کمینه‌سازی باید به بیشینه‌سازی تبدیل شوند)، این روش بر مبنای کمینه‌سازی مقدار D به‌صورت زیر عمل می‌کند:

$$\text{Min } D = \left(\sum_{j=1}^{p} \left(\frac{f_j^* - f_j}{f_j^*} \right)^r \right)^{1/r} \tag{۱۷}$$

در این تحقیق مقدار r برابر با ۲ در نظرگرفته شده است.

۲.۴. روش بیشینه ـ کمینه

این روش بر روی ضعیف‌ترین هدف تمرکز می‌کند. هدف این روش بیشینه‌سازی کمترین مقداری است که از تقسیم مقادیر توابع هدف بر روی مقادیر جواب ایده‌آل

آنها محاسبه شده است. که در قالب ریاضی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Max}\left(\text{Min}\left(\frac{f_1}{f_1^*}, \frac{f_2}{f_2^*}, ..., \frac{f_3}{f_3^*}\right)\right) \quad (18)$$

۳.۴. مثال عددی

به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدل و مقایسه‌ی دو روش حل پیشنهادشده براساس سه معیار مقدار تابع هدف اول، مقدار تابع هدف دوم و زمان اجرای مورد نیاز مدل مسئله در ۳۰ اندازه‌ی مختلف و با روش‌های بیشینه ـ کمینه و معیار جامع در رایانه‌یی با مشخصات Intel®Core™ i5-5200U CPU @ 2/20GHz با استفاده از نرم‌افزار GAMS اجرا شد. تمام پارامترهای مدل مسئله براساس توزیع یکنواخت و با فاصله‌های از پیش‌تعیین‌شده در نظر گرفته شده‌اند که در جدول ۱ آمده‌اند.

۴.۴. مقایسه‌ی آماری

به‌منظور مقایسه‌ی آماری روش‌های پیشنهادی، میانگین نتایج ۳۰ بار اجرای مدل براساس آزمون فرض برابری میانگین‌ها و برای هر ۳ معیار مورد نظر با یکدیگر مقایسه شد. آزمون فرض برابری میانگین‌ها روشی مناسب برای مقایسه‌ی نتایج دو نمونه است.[20] فرض صفر نشان‌دهنده‌ی برابری میانگین‌های دو روش بیشینه ـ کمینه و معیار جامع و فرض یک مخالف‌بودن میانگین‌های آنهاست.

$$\begin{cases} \text{H}_0: & \mu_{\text{globalcriteria}} = \mu_{\text{MaxiMin}} \\ \text{H}_1: & \mu_{\text{globalcriteria}} \neq \mu_{\text{MaxiMin}} \end{cases} \qquad \forall Z_1,\ Z_2,\ \text{CPU Time} \quad (19)$$

این آزمون فرض با سطح اطمینان ۹۵ درصد و با استفاده از نرم‌افزار Minitab۱۶ اجرا شد که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. بر این اساس، فرض صفر درخصوص معیارهای مقدار تابع هدف اول و زمان اجرای مدل پذیرفته می‌شود. بدین معنی که با سطح اطمینان ۹۵ درصد، اختلاف معنی‌داری بین میانگین مقادیر تابع هدف اول و زمان اجرای مدل در دو روش پیشنهادی مشاهده نمی‌شود. این فرض در خصوص معیار مقدار تابع هدف دوم رد می‌شود. بدین معنی که با سطح اطمینان ۹۵ درصد، میانگین مقدار تابع هدف دوم در دو روش پیشنهادی با یکدیگر اختلاف دارد.

۵.۴. رتبه‌بندی روش‌های پیشنهادی از طریق الگوریتم تاپسیس

در ادامه از الگوریتم تاپسیس به‌منظور رتبه‌بندی و انتخاب بهترین روش از بین دو روش موجود استفاده می‌شود. الگوریتم تاپسیس یکی از روش‌های مفید تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی چند گزینه است.[21] مراحل الگوریتم تاپسیس به‌شرح زیر است:

گام ۱. تشکیل ماتریس تصمیم X به‌وسیله‌ی m گزینه‌ی مورد نظر و n معیار ارزیابی:

$$X = [x_{ij}] \quad i = 1, ..., m \quad j = 1, ..., n \quad (20)$$

گام ۲. تشکیل ماتریس بی‌مقیاس‌شده (R):

$$R = [r_{ij}] \quad i = 1, ..., m \quad j = 1, ..., n \quad (21)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad (22)$$

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مسئله.

پارامتر	مقادیر	پارامتر	مقادیر
c_{mt}^k	$[1, 6]$	PT_m^k	$[0/1, 0/9]$
d_{jmt}^k	$[10, 24]$	A_m^k	$[10, 35]$
d_{ijt}^k	$[3, 10]$	TT_{mt}	$[45, 210]$
CA_{mt}^k	$[100, 350]$	W_j	$[50, 400]$
H_{jt}^k	$[2, 5]$	W_m	$[500, 1200]$
H_{mt}^k	$[4, 9]$	R_m^k	$[45, 80]$
CS_{it}^k	$[10, 50]$	DC_{it}^k	$[15, 60]$
f_j	$[4000, 10000]$	V_k	$[0/8, 1/5]$
SI_j^k	$[6, 50]$	SI_m^k	$[62, 150]$

جدول ۲. نتایج آزمون فرض آماری.

روش	مقدار Z_1	مقدار Z_2	زمان اجرا
معیار جامع	۱۰۶۳۰۰/۴	۴۲/۱۵۴۶۷	۶۰/۸۵
بیشینه ـ کمینه	۱۲۵۲۶۹	۶۰/۳۴۴۶۶۷	۲۸/۴۰
	پذیرش فرض صفر	رد فرض صفر	پذیرش فرض صفر

گام ۳. محاسبه‌ی ماتریس بی‌مقیاس وزن‌داده‌شده (V):

$$V = [v_{ij}] \quad i = 1, ..., m \quad j = 1, ..., n \quad (23)$$

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (24)$$

که در آن w_j وزن معیار jام است و $\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$.

در این مسئله مقادیر وزن‌های هر ۳ معیار برابر با $\frac{1}{3}$ در نظر گرفته شده است.

گام ۴. تعیین گزینه‌ی ایده‌آل مثبت (A^+) و گزینه‌ی ایده‌آل منفی (A^-):

$$A^+ = \left\{\left(\max v_{ij} | j \in J^+\right), \left(\min v_{ij} | j \in J^-\right) | i = 1, 2, ..., m\right\} = \left\{v_1^+, v_2^+, ..., v_n^+\right\} \quad (25)$$

$$A^- = \left\{\left(\min v_{ij} | j \in J^+\right), \left(\max v_{ij} | j \in J^-\right) | i = 1, 2, ..., m\right\} = \left\{v_1^-, v_2^-, ..., v_n^-\right\} \quad (26)$$

گام ۵. محاسبه‌ی میزان فاصله‌ی هرگزینه از ایده‌آل مثبت (d_i^+) و ایده‌آل منفی (d_i^-):

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_i^+\right)^2} \quad i = 1, ..., m \quad (27)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_i^-\right)^2} \quad i = 1, ..., m \quad (28)$$

گام ۶. تعیین ضریب نزدیکی هر گزینه به گزینه‌ی ایده‌آل (CL_i^*) و رتبه‌بندی گزینه‌ها به‌ترتیب نزولی مقادیر ضریب نزدیکی:

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad i = 1, ..., m \quad (29)$$

جدول ۳. نتایج الگوریتم تاپسیس.

روش	CL_i^*	رتبه
معیار جامع	۰/۱۷۵۴۰۸	۲
بیشینه ـ کمینه	۰/۸۲۴۵۹۲	۱

نتایج حاصل از به‌کارگیری روش تاپسیس در جدول ۳ قابل‌مشاهده است که با توجه به این‌که مقدار ضریب نزدیکی روش بیشینه ـ کمینه بیشتر است، این روش به‌عنوان روش برتر انتخاب می‌شود.

۶.۴. رتبه‌بندی روش‌های پیشنهادی از طریق روش مجموع ساده‌ی وزنی

به‌منظور رتبه‌بندی روش‌های حل، از الگوریتم دیگری نیز به نام مجموع ساده‌ی وزنی استفاده شد.[۲۱] گام‌های این الگوریتم به شرح زیر است:

گام ۱. تشکیل ماتریس تصمیم X به‌وسیله‌ی m گزینه‌ی مورد نظر و n معیار ارزیابی:

$$X = [x_{ij}] \quad i = ۱, ..., m \quad j = ۱, ..., n \qquad (۳۰)$$

گام ۲. تشکیل ماتریس بی‌مقیاس شده (R):

$$R = [r_{ij}] \quad i = ۱, ..., m \quad j = ۱, ..., n \qquad (۳۱)$$

برای معیارهای زمان اجرا و مقدار $Z_۱$ که کم‌بودن آنها مطلوب است:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{\max}} \qquad (۳۲)$$

برای معیار مقدار $Z_۲$ که زیاد بودن آن مطلوب است:

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\min}}{x_{ij}} \qquad (۳۳)$$

گام ۳. محاسبه‌ی ماتریس بی‌مقیاس وزن داده شده (V):

$$V = [v_{ij}] \quad i = ۱, ..., m \quad j = ۱, ..., n \qquad (۳۴)$$

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \qquad (۳۵)$$

که در آن w_j وزن معیار jام است و $\sum_{j=۱}^{n} w_j = ۱$.

در این مسئله مقادیر وزن‌های هر ۳ معیار برابر با $\frac{۱}{۳}$ در نظرگرفته شده است.

گام ۴. محاسبه‌ی A_i و رتبه‌بندی گزینه‌ها به‌ترتیب نزولی مقادیر A_i:

$$A_i = \sum_{j=۱}^{n} v_{ij} \qquad (۳۶)$$

نتایج حاصل از به‌کارگیری روش مجموع ساده‌ی وزنی در جدول ۴ آمده است که روش بیشینه ـ کمینه به‌عنوان روش برتر انتخاب می‌شود.

مشاهده می‌شود که نتایج هر دو الگوریتم ارائه‌شده یکسان است و روش بیشینه ـ کمینه در هر دو الگوریتم به‌عنوان روش برتر انتخاب می‌شود.

جدول ۴. نتایج الگوریتم مجموع ساده‌ی وزنی.

روش	A_i	رتبه
معیار جامع	۷۲.۰	۲
بیشینه ـ کمینه	۰/۹۴	۱

۵. تحلیل حساسیت

در این بخش به‌منظور ارزیابی اثر تغییرات پارامترهای مدل بر روی نتیجه‌ی توابع هدف، از تحلیل حساسیت استفاده شده است. بدین‌منظور پارامترهای هزینه‌ی نگه‌داری موجودی در کارخانه و مرکز پخش برای بررسی تغییرات بر روی میزان تابع هدف اول و پارامترهای موجودی اطمینان در کارخانه و مرکز پخش برای بررسی تغییرات بر روی میزان تابع هدف دوم انتخاب شده‌اند. به‌طور مشابه می‌توان این تحلیل را برای پارامترهای دیگر مسئله نیز انجام داد. نحوه‌ی انجام تحلیل حساسیت بدین صورت است که تمام پارامترهای مسئله به‌جز پارامتر مورد بررسی ثابت باقی می‌مانند و با ایجاد تغییرات در مقادیر پارامتری که برای انجام تحلیل حساسیت انتخاب شده است نتایج این تحلیل بررسی می‌شود. نتایج این تحلیل حساسیت در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

- هزینه‌های نگه‌داری موجودی در کارخانه و در مرکز پخش:

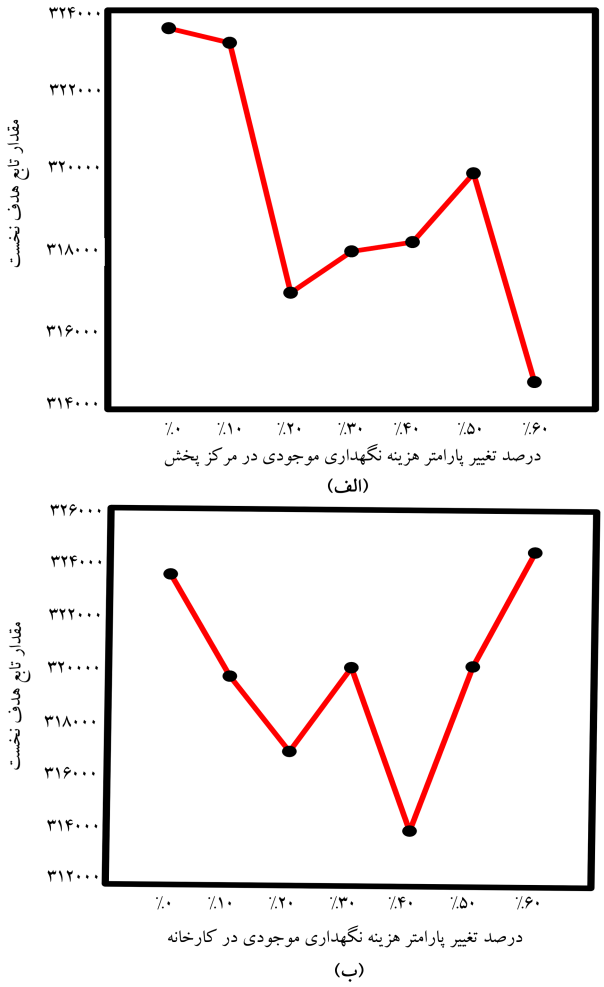
شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی میزان تغییرات تابع هدف اول به‌ازای درصدهای مختلف تغییر در پارامتر هزینه‌ی نگه‌داری موجودی در مرکز پخش و همچنین پارامتر هزینه‌ی نگه‌داری موجودی در کارخانه است. در شکل ۱الف ملاحظه می‌شود که با افزایش پارامتر هزینه‌ی نگه‌داری در مرکز پخش تا ۲۰ درصد میزان اولیه، مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد و سپس از این نقطه به بعد افزایش در تابع هزینه مشاهده می‌شود. کمترین مقدار هزینه نیز در ۶۰ درصد افزایش رخ داده است.

میزان تغییرات تابع هدف اول به‌ازای درصدهای مختلف افزایش در پارامتر هزینه‌ی نگه‌داری موجودی در کارخانه در شکل ۱ب نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، تغییرات پارامتر باعث ایجاد روند منظمی در تغییر تابع هدف نمی‌شود و کمترین میزان هزینه هنگام ۴۰ درصد افزایش پارامتر هزینه‌ی نگه‌داری و بیشترین مقدار آن هنگام افزایش ۶۰ درصدی پارامتر مشاهده می‌شود.

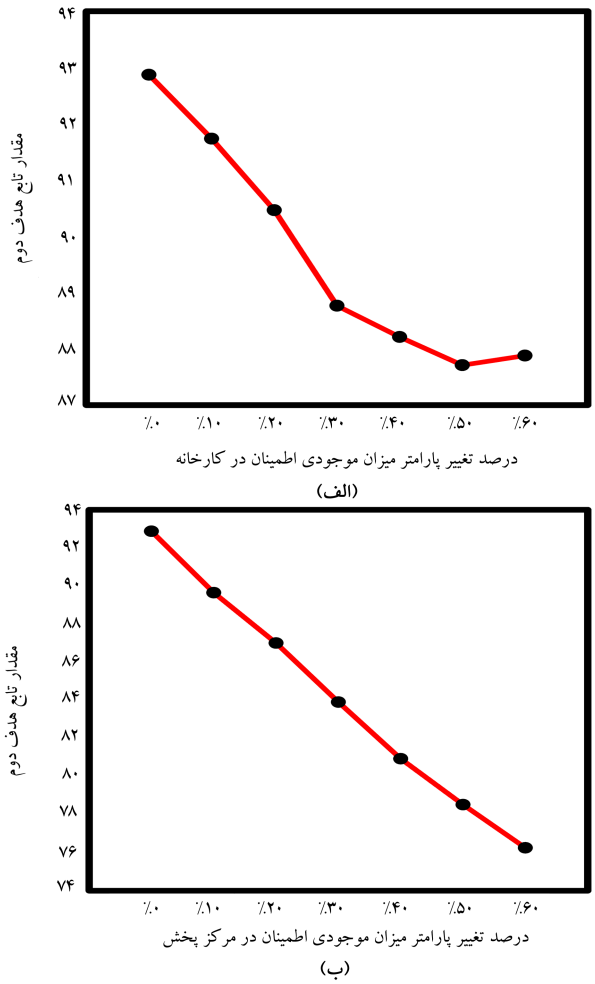
- موجودی اطمینان محصولات در کارخانه و در مرکز پخش:

تحلیل حساسیت بعدی مربوط به تغییرات موجودی اطمینان و تأثیر آن در تابع هدف دوم است که نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲الف مشاهده می‌شود که افزایش میزان موجودی اطمینان کارخانه‌ها باعث کاهش میزان تابع هدف دوم شده است و فقط هنگام افزایش ۶۰ درصدی پارامتر موجودی اطمینان این مقدار کمی از افزایش ۵۰ درصدی آن بیشتر است. دلیل این موضوع وابستگی متغیر موجودی اطمینان کوتاه به پارامتر موجودی اطمینان است که باعث شده با وجود افزایش موجودی اطمینان میزان تابع هدف دوم کاهش یابد.

شکل ۲ب نیز مربوط به بررسی تغییرات موجودی اطمینان مرکز پخش و تابع هدف دوم است که همان‌طور که مشخص است، در این جا نیز افزایش موجودی اطمینان مرکز پخش موجب کاهش تابع هدف دوم شده است.



شکل ۱. مقدار تغییر در تابع هدف نخست به‌ازای درصدهای مختلف تغییر در پارامترهای هزینه‌ی نگه‌داری موجودی در مرکز پخش و کارخانه.



شکل ۲. مقدار تغییر در تابع هدف دوم به‌ازای درصدهای مختلف تغییر در پارامترهای موجودی اطمینان مرکز پخش و کارخانه.

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار یک مدل دو هدفه‌ی غیرخطی برای یک زنجیره‌ی تأمین سه‌سطحی شامل تولیدکنندگان، مراکز پخش و مشتریان در حالت چنددوره‌یی و چندمحصولی با محدودیت‌های زمان تولید، ظرفیت انبار و ظرفیت تولید ارائه شد. اهداف مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین و بیشینه‌سازی میانگین سطوح موجودی اطمینان کارخانه‌ها و مراکز پخش بود. برای حل مدل ارائه‌شده از دو روش از روش‌های حل مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه به نام‌های معیار جامع و بیشینه ـ کمینه استفاده شد. مدل مسئله به صورت جداگانه با هر یک از دو روش ارائه و با استفاده از نرم‌افزار GAMS در ۳۰ اندازه‌ی مختلف اجرا شد. سپس میانگین نتایج ۳۰ بار اجرای مدل در هر یک از روش‌ها با استفاده از آزمون فرض برابری میانگین‌ها مقایسه شد. برای این کار ۳ معیار کیفیت تابع هدف نخست، کیفیت تابع هدف دوم و زمان اجرای مدل در نظر گرفته شد. بر این اساس، در سطح اطمینان ۹۵ درصد، فرض برابری میانگین‌های دو روش در مقابل فرض عدم برابری میانگین‌های آن‌ها براساس معیارهای کیفیت تابع هدف نخست و زمان اجرای مدل پذیرفته شد. اما این فرض در خصوص کیفیت تابع هدف دوم رد شد که نشان‌دهنده‌ی عدم برابری میانگین‌های دو روش براساس این معیار بود. در ادامه برای اولویت‌بندی روش‌های معیار جامع و بیشینه ـ کمینه و انتخاب روش بهتر از دو الگوریتم تاپسیس و مجموع ساده‌ی وزنی استفاده شد. نتایج هر دو الگوریتم نشان‌دهنده‌ی اولویت روش بیشینه ـ کمینه بر روش معیار جامع بود. در نهایت تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای هزینه‌ی نگه‌داری موجودی در کارخانه‌ها و مراکز پخش، برای بررسی تأثیر تغییرات آن‌ها بر روی تابع هدف نخست صورت پذیرفت. تحلیل‌ها نشان داد که وابستگی منظمی بین افزایش این پارامترها و مقدار تابع هدف اول وجود ندارد و بر حسب میزان افزایش پارامترها، میزان تابع هدف ممکن است کاهش یا افزایش داشته باشد. همچنین پارامترهای موجودی اطمینان کارخانه‌ها و مراکز پخش برای بررسی تأثیر تغییرات آنها بر روی تابع هدف دوم انتخاب شدند. نتایج این تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش پارامترهای انتخاب‌شده تابع هدف دوم کاهش پیدا می‌کند.

برای تحقیقات آتی می‌توان پارامترهای مسئله را به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفت. همچنین می‌توان از روش‌های دیگر بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور حل مدل استفاده کرد. استفاده از روش‌های دیگر تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌منظور رتبه‌بندی نهایی می‌تواند قابل بررسی باشد. با توجه به این‌که با گسترش ابعاد مسئله، زمان حل مدل به‌میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، استفاده از روش‌های ابتکاری یا فرااابتکاری می‌تواند در تحقیقات آتی مورد استفاده قرار گیرد.

پانوشت‌ها

1. right quantity
2. right location
3. right time
4. environmental impact
5. Topsis
6. simple additive weighting (SAW)
7. global Criteria
8. max-min

منابع (References)

1. Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. and Simchi-Levi, E. *Designing and Managing the Supply Chain*, New York: Irwin McGraw-Hill (2000).
2. Roy, B. "Problems and methods with multiple objective functions", *Mathematical Programming*, **1**(1) , pp. 239-266 (1971).
3. Voudouris, V.T. "Mathematical programming techniques to debottleneck the supply chain of fine chemical industries", *Computers and Chemical Engineering*, **20**, pp. 1269-1274 (1996).
4. Amiri, A. "Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure", *European Journal of Operational Research,* **171**, pp. 567-576 (2006).
5. Nobil, AH., and Niaki STA. "Location-allocation decisions in a multi-echelon supply chain network with net present value," *Sharif Journal of Industrial Engineering and Management*, **31**, pp. 107-112, (In Persian) (2015).
6. Gebennini, E., Gamberini, R. and Manzini, R. "An integrated production—distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization", *International Journal of Production Economics*, **122**, pp. 286-304 (2009).
7. Yadav, S.R., Muddada, R.R., Tiwari, M.K. and Shankar, R. "An algorithm portfolio based solution methodology to solve a supply chain optimization problem", *Expert Systems with Applications,* **36**, pp. 8407-8420 (2009).
8. Franca, R., Jones, E., Richards, C. and Carlson, J. "Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality", *International Journal of Production Economics*, **127**, pp. 292-299 (2010).
9. Mirzapour Al-e-Hashem, S.M.J., Malekly, H. and Aryanezhad, M.B. "A multiobjective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty", *International Journal of Production Economics*, **134**, pp. 28-42 (2011).
10. Chibeles-Martins, N., Pinto-Varela, T., Barbósa-Póvoa, A. and Novais, A.Q. "A simulated annealing algorithm for the design and planning of supply chains with economic and environmental objectives", *Computer Aided Chemical Engineering,* **30**, pp. 21-25 (2012).
11. Cardona-Valdés, Y., Álvarez, A. and Pacheco, J. "Metaheuristic procedure for a bi-objective supply chain design problem with uncertainty", *Transportation Research PartB: Methodological*, **60**, pp. 66-84 (2014).
12. Razmi, J., Zahedi-Anarak, A.H. and Zakerinia, M.S. "A bi-objective stochastic optimization model for reliable warehouse network redesign", *Mathematical and Computer Modelling*, **58**, pp. 1804-1813 (2013).
13. Bandyopadhya, S. and Bhattacharya, R. "Applying modified NSGA-II for bi-objective supply chain problem", *Journal of Intelligent Manufacturing,* **24**, pp. 707-716 (2013).
14. Pasandideh. S,H,R,, Akhavan Niaki, S.T. and Asadi, K , "Optimizing a bi-objective multi-product multi-period three echelon supply chain network with warehouse reliability", *Expert Systems with Applications,* **42**, pp. 2615-2623 (2015).
15. Vahdani, B. and Mohammadi, M. "A bi-objective interval-stochastic robust optimization model for designing closed loop supply chain network with multi-priority queuing system", *International Journal of Production Economics*, **170**, pp. 67-87 (2015).
16. Soltani Tehrani, M., Hassan Pour, H.A. and Ramezani, S. "Optimization of a bi- objective closed loop supply chain consisting cost and carbon dioxide ", *Management Research in Iran* ,**19**, pp.169-189, (In Persian) (2015).
17. Chan, F.T.S, Jha, A. and Tiwari, M.K. "Bi-objective optimization of three echelon supply chain involving truck selection and loading using NSGA-II with heuristics algorithm", *Applied Soft Computing*, **38**, pp. 978-987 (2016).
18. Alegoz, M. and Ozturk, Z.K. "A multi objective multi echelon supply chain network model for a household goods company", *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences,* **359**, pp. 307-318 (2016).
19. Hwang, C.-L. and Masud, A.S.M., *Multiple Objective Decision Making, Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey*, Berlin: Springer-Verlag (1979).
20. Wellek, S., *Testing Statistical Hypotheses of Equivalence and Noninferiority*, Second Edition, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC (2010).
21. Hwang, C.L and Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey*, Berlin: Springer-Verlag (1981).