

تعیین تعداد بهینه گروه‌های اقلام موجود در انبار بر اساس آنالیز ABC در چارچوب یک شبکه زنجیره تامین

امید عبدالعظیمی،* مرضیه خاکستری**

تاریخ دریافت: ۹۸/۳/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۶

چکیده

طبقه‌بندی موجودی یکی از تکنیک‌های مهم در حوزه مدیریت موجودی است. یک روش شناخته‌شده، روش طبقه‌بندی بر اساس آنالیز ABC است که اقلام موجود در انبار را بر اساس ارزش و اهمیت آنها در طبقات مختلفی قرار می‌دهد. در این مقاله، یک شبکه زنجیره تامین سه سطحی برای یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه به منظور بهبود کیفیت گروه‌بندی موجودی بر اساس آنالیز ABC ارائه شده است. تابع هدف اول سود خالص اقلام موجود در انبار مرکزی (سطح ۲) و تابع هدف دوم نیز سود خالص اقلام موجود در بخش‌های مختلف (سطح ۳) را در شرایط عدم قطعیت پیشینه می‌کنند. مدل به طور همزمان تعداد گروه‌های موجودی، سطح خدمات مربوط به هر گروه و اقلام اختصاص داده شده به گروه‌ها را با توجه به محدودیت‌ها، کمبود موجودی، در نظر گرفتن هزینه‌های سفارش‌دهی و خرید بهینه می‌کند. به منظور حل مدل ارائه شده از روش‌های ابتکاری و دقیق از جمله معیار جامع و اپسیلون محدودیت اصلاح شده استفاده شده است. سپس به منظور مقایسه روش‌های ذکر شده از آزمون فرض آماری استفاده شده و نهایتاً با استفاده از روش AHP برترین و کاراترین روش حل انتخاب شده است. نتایج نشان‌دهنده برتری روش اپسیلون محدودیت بود؛ در ادامه به منظور اعتبارسنجی مدل از یک مجموعه مثال عددی استفاده شده که نشان‌دهنده بهبود و کارایی مدل ارائه شده در کنترل موجودی انبار بوده است.

کلمات کلیدی: آنالیز ABC، کنترل موجودی، بهینه‌سازی دوهدفه، زنجیره‌تأمین سه‌سطحی، روش‌های ابتکاری و دقیق.

* دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده اقتصاد، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران

** استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده اقتصاد، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران (نویسنده مسئول)

مقدمه

به منظور ایجاد یک سیستم کنترل موجودی عالی و بی نقص باید موجودی ها را بر اساس شاخص های مناسب در دسته های معنی داری طبقه بندی کرد. تاکنون مدل ها و روش های متفاوتی به منظور طبقه بندی موجودی ها ارائه شده است که در بین این ها رویکرد آنالیز *ABC* یکی از رایج ترین روش ها می باشد که به صورت وسیعی برای برنامه ریزی و کنترل موجودی ها به کار برده می شود [۹]. طبقه بندی موجودی ها بر اساس آنالیز *ABC* این توانایی را به سازمان می دهد که موجودی های خود را در دسته های معنی داری طبقه بندی کند و به طور کلی بر اساس اصل پارتو شکل گرفته است که این اصل به قانون ۸۰-۲۰ نیز معروف است. در مورد موجودی های سازمان ها این اصل به این صورت بیان می شود که تنها ۲۰ درصد موجودی ها ۸۰ درصد هزینه کل سالیانه سیستم موجودی را تشکیل می دهند و ۸۰ درصد باقی مانده تنها ۲۰ درصد هزینه ها را شامل می شوند. نتیجه چنین تجزیه و تحلیلی نشان می دهد که باید طبقه *A* بسیار، طبقه *B* کم و طبقه *C* از همه کمتر کنترل شوند.

بدیهی است که در دنیای صنعتی امروز با توجه به افزایش تنوع مشخصه های کنترل موجودی، طبقه بندی موجودی ها بر اساس رویکرد *ABC* تک شاخصه قادر به پاسخگویی تمامی نیازهای سیستم کنترل موجودی سازمان نیست و ممکن است که شاخص های دیگری در زمینه مدیریت و طبقه بندی موجودی ها وجود داشته باشد؛ معیارهایی از قبیل نرخ مصرف^۱، زمان تاخیر^۲، هزینه های مربوط به موجودی و... که احتمال دارد تعدادی از این شاخص ها اهمیت بیشتری را نسبت به دیگری داشته باشند [۲۳]. امروزه بحث مربوط به مدیریت موجودی ها و ایجاد سیستم های کنترل موجودی مناسب برای تمامی سازمان ها به چالشی بزرگ تبدیل شده است و همین امر ضرورت تحقیق در این زمینه را آشکار می کند. از طرفی دیگر، امروزه درصد زیادی از کل سرمایه سازمان ها را موجودی ها تشکیل می دهند. در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه سرمایه نگهداری شده در موجودی ها در هر مقطع از زمان بسیار زیاد است، پس نبودن کنترل و سیستم کنترل موجودی مناسب مشکلات متعددی را برای سازمان ها

1 Usage rate

2 Lead time

ایجاد می‌کند که برخی از این مشکلات عبارتند از: تمام سازمان‌ها با هزینه‌های مرتبط با موجودی‌ها مانند هزینه نگهداری، سفارش‌دهی، کمبود و... رو به رو هستند که نبود یک سیستم کنترل موجودی مناسب می‌تواند باعث افزایش هر کدام از هزینه‌های نامبرده شود. در برخی از سازمان‌ها ممکن است که کمبود موجودی باعث توقف فرآیند تولید گردد و سازمان با مشکل عدم تحویل به موقع محصول به مشتریان و در نتیجه افزایش هزینه کمبود مواجه شود. در بعضی موارد نیز سازمان ممکن است با افزایش بیش از حد موجودی روبه‌رو شود که در این مورد نیز هزینه نگهداری موجودی افزایش می‌یابد؛ پس در هر دو حالت عدم وجود سیستم کنترل موجودی مناسب اثرات منفی را در سود سازمان‌ها خواهد داشت.

با توجه به موارد ذکر شده بسیاری از مسائل محققان مدل‌های مختلفی را برای طبقه‌بندی موجودی‌ها به خصوص بر اساس آنالیز ABC ارائه و مورد بررسی قرار داده‌اند. روش گروه-بندی و کنترل موجودی بر اساس آنالیز ABC دارای معایب متعددی است: الف) طبق تحقیق تیونتر و همکاران (۲۰۱۰)^۱ [۲۶]، هیچ راهنمای مشخصی در ادبیات تحقیق برای تعیین سطح خدمات برای هر گروه وجود ندارد، ب) از آنجایی که تصمیم‌گیری گروه‌بندی، مستقل از و قبل از تصمیم‌گیری در مورد سطح خدمات است، یعنی از تعامل آنها استفاده نشده است، بنابراین هیچ‌یک از دو تصمیم نمی‌تواند بهینه باشد، ج) از آنجایی که بودجه موجود تا آخرین مرحله در نظر گرفته نشده است، هیچ تضمینی وجود ندارد که تصمیم‌گیری در مورد گروه-بندی و یا خدمات ارائه‌شده در دو مرحله اول امکان‌پذیر باشد. بنابراین شخص اغلب تا زمان دستیابی به بهینگی، باید در تصمیم‌گیری در مورد گروه‌بندی یا سطح خدمات به طور مکرر تجدیدنظر کند که وقتی تعداد اقلام موجودی زیاد باشد، می‌تواند یک روند خسته‌کننده باشد و ممکن است منجر به راه‌حل‌های غیربهینه شود. این نواقص باعث شده است تا یک روش جدید بهینه‌سازی را برای بهبود گروه‌بندی موجودی بر اساس آنالیز ABC حاضر و کنترل تصمیم‌گیری‌ها توسعه دهیم.

باقی مانده این مقاله به این صورت تنظیم شده است: در قسمت دوم به مرور ادبیات در این زمینه پرداخته شده است. قسمت سوم در مورد تشریح مدل ریاضی است. در قسمت چهارم مدل ریاضی به همراه جزئیات دقیق آن ارائه شده است. در قسمت پنجم به معرفی روشهای حل پرداخته شده است که برای حل مدل از روشهای حل دقیق و ابتکاری استفاده شده است. در قسمت ششم برای اعتبار بخشیدن به مدل مثالهای عددی مختلفی آورده شده است و همچنین انتخاب بهترین روش و آنالیز آماری و تعیین تعداد بهینه گروههای موجودی نیز در این قسمت انجام شده است. در نهایت، قسمت هفتم شامل نتیجه گیری از کارهای صورت گرفته در این مقاله و ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آتی است.

مرور ادبیات

برای اولین بار فورد هریس^۱ در سال ۱۹۱۵ از موسسه وستینگهاوس فرمول ساده اندازه انباشته را در زمینه کنترل موجودیها ارائه کرد [۱۳]. از آن به بعد همین فرمول به ظاهر مستقل توسط افراد بسیاری توسعه داده شد. این فرمول به نام فرمول ویلسن نیز شناخته می شود زیرا به عنوان بخش لازم و کاملی از طرح کنترل موجودی به وسیله آ.ا.ج. ویلسون^۲ مطرح شد. همچنین مقاله ای که به وسیله آرو همکاران (۱۹۵۱)^۳ [۶] ارائه شد یکی از مقالاتی بود که تجزیه و تحلیل قاطعی از یک مدل ساده موجودی را ارائه می کرد و به وسیله ریاضیدانانی همچون ماسارت^۴ [۱۹] (۱۹۹۰) دنبال شد. تحقیقات زیادی در زمینه طبقه بندی موجودیها بر اساس رویکرد *ABC* چندشاخصه برای بهبود کنترل موجودیهای انبار در سالهای اخیر انجام شده است. تحقیق لویز-سوتو و همکاران (۲۰۱۷)^۵ [۱۸] یکی از این موارد است. چاکراواری (۱۹۸۱)^۶ [۸] یک مدل پویا را به منظور طبقه بندی موجودیها ارائه کرد که در این مدل

1. Ford Harris

2. R. H. Wilson

3. Arrow, et al.

4. Massart

5. Lopez-Soto, et al.

6. Chakravarty

موجودی‌ها بر اساس افزایش زمان هر واحد تقاضا و هزینه نگهداری هر واحد طبقه‌بندی شدند. از مهمترین نقاط قوت این مدل این بود که هزینه‌های کل را حداقل می‌کرد و از مهمترین نقاط ضعف آن طولانی بودن زمان اجرا بود. فلورس و وای بارک (۱۹۸۷)^۱ [۱۴] یک رویکرد ماتریسی دوشاخه را به منظور طبقه‌بندی موجودی‌ها ارائه کردند که قادر بود کنترل جامعی را برای موجودی‌ها ایجاد کند. رویکرد ارائه شده توسط آنها ارقام موجودی را بر اساس طبقه‌بندی استاندارد *ABC* بر حسب هر شاخص طبقه‌بندی کرد و سپس این دو گروه تک‌شاخه به وسیله یک ماتریس مزدوج با هم ترکیب شدند. یکی از معایب بزرگ این رویکرد این بود که بیش از دو یا سه شاخص بسیار پیچیده شدند و کاربردی نداشتند. کوهن و ارنست (۱۹۸۸)^۲ [۱۰] یک مدلی را به منظور طبقه‌بندی موجودی‌ها ارائه کردند که در این مدل تنها از یک شاخص ارزش سالیانه دلاری^۳ به منظور طبقه‌بندی موجودی‌ها استفاده شد. گوونیر و ارل (۱۹۸۸)^۴ [۱۵] یک الگوریتم ژنتیک چندشاخه را به منظور طبقه‌بندی موجودی‌ها ارائه کردند. در اصل این مدل وزنه‌های شاخص‌ها را در هنگام طبقه‌بندی موجودی‌ها تعیین می‌کرد که این مدل در مقایسه با روش ای‌اچ‌پی^۵ نتایج بهتری را نشان داد. ون ایجس و همکاران (۱۹۹۲)^۶ [۲۸] تحقیقی را در زمینه طبقه‌بندی ارقام موجودی انجام دادند. نتیجه این تحقیق بیان می‌کرد که دو نوع استراتژی طبقه‌بندی با تقاضای مشخص وجود دارد که عبارتند از: گروه‌بندی مستقیم و غیرمستقیم. در استراتژی گروه‌بندی غیرمستقیم فرض بر این است که یک فاصله سفارش پایه^۷ را در نظر گرفته و دیگر فواصل سفارش مضرب خطی از فاصله سفارش پایه در نظر گرفته می‌شود. پرتووی و بورتون (۱۹۹۳)^۸ [۲۲] از ای‌اچ‌پی به

-
1. Flores & Whybark
 2. Cohen & Ernst
 3. Annual dollar usage
 4. Guvenir & Erel
 5. Analytical hierarchy process (AHP)
 6. Van Eijs, et al.
 7. Basic order interval
 8. Partovi & Burton

منظور طبقه‌بندی موجودی‌ها استفاده کردند. این گونه طبقه‌بندی هم معیارهای کمی و هم معیارهای کیفی را مورد توجه قرار می‌داد.

ان جی (۲۰۰۷)^۱ [۲۱] مدل ساده‌ای را به منظور طبقه‌بندی چندشاخصه موجودی‌ها پیشنهاد کرد که در اصل این مدل مقیاس‌های تمامی شاخص‌های موجود را در یک مقیاس واحد پوشش می‌داد. تحقیق انجام شده در این مقاله نشان داد که با تبدیل مناسب مقیاس شاخصهای مختلف طبقه‌بندی موجودی‌ها، سازمانها می‌توانند بدون نیاز به بهینه‌سازی خطی به مقیاس‌هایی از اقلام موجودی برسند و همچنین مدل این مقاله می‌تواند به صورت گسترده‌ای توسط سازمان‌هایی با حداقل سابقه در بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. شاخصهای مورد بررسی در این مقاله عبارتند از: ارزش مصرف سالیانه، میانگین هزینه هر واحد و زمان تاخیر. ژو و فان (۲۰۰۷)^۲ [۳۰] شکل پیشرفته‌تری از مدل راماناتان (۲۰۱۰)^۳ [۲۴] را ارائه دادند. مدل راماناتان یک مدل بهینه‌سازی خطی موزون را به منظور طبقه‌بندی موجودی‌ها بر اساس رویکرد *ABC* چندشاخصه ارائه می‌کرد اما این مدل ممکن بود منجر به وضعیتی شود که تعدادی از موجودی‌ها با درجه اهمیت بسیار بالا بر اساس شاخص بی‌اهمیتی به طور نامناسب در دسته *A* طبقه‌بندی شوند. بنابراین این مقاله به منظور جلوگیری از وقوع چنین حالت‌هایی، مدلی را ارائه کرد که این مدل با استفاده از دو مجموعه از وزن‌هایی که بیشترین سازگاری و کمترین سازگاری را برای هر کدام از اقلام موجودی دارند شاخص منطقی‌تر و جامع‌تری را برای طبقه‌بندی موجودی‌ها ارائه کند.

چو و همکاران (۲۰۰۸)^۴ [۱۱] رویکرد جدیدی در زمینه کنترل موجودی ارائه دادند که این رویکرد *ABC-Fuzzy* بود. این رویکرد قادر بود متغیرهای عددی و غیر عددی را کنترل کند و به سادگی در تمامی سازمان‌ها قابل اجرا است. نتایج تحقیق به این صورت بود که از بین ۱۹۲ قلم موجودی، ۵۹ قلم به عنوان گروه بسیار مهم، ۶۹ قلم به عنوان گروه مهم و سایر اقلام

1 .Ng

2 .Zhou & Fan

3 .Ramanathan

4 .Chu, et al.

به عنوان گروه غیر مهم تعریف شدند. تسائی و وای یاه (۲۰۰۸)^۱ [۲۷] الگوریتم ازدحام ذرات^۲ چندهدفه را به منظور طبقه‌بندی موجودی‌ها ارائه دادند که در تحقیق آنها یک رویکرد بهینه‌سازی در مورد مشکلات مربوط به طبقه‌بندی موجودی‌ها در شرایطی که اقلام موجودی باید بر اساس هدف یا اهداف چندگانه‌ای از قبیل حداقل کردن هزینه‌ها، حداکثر سازی نرخ گردش موجودی و... طبقه‌بندی شوند، پیشنهاد شد. الگوریتمی که در این مقاله ارائه شد توانست به منظور ترکیب هدفهای متفاوت مورد استفاده قرار گیرد و مزیت دیگر این الگوریتم این بود که قادر بود تعداد بهینه‌ای از گروه‌های طبقه‌بندی را تعیین کند و در عین حال طبقه‌بندی موجودی‌ها را نیز تکمیل کند. همچنین دقت طبقه‌بندی موجودی‌ها بر اساس این رویکرد بسیار بالاتر از سایر روش‌ها بود. آنالیز چندمعیاره *ABC* اغلب رویکرد جبرانی را برای تجمیع معیارها لحاظ می‌کند، یعنی ضعف موجودی در یک معیار با عملکرد خوب آن در معیارهای دیگر جبران می‌شود. *ELECTRE TRI* از مدل‌های مبتنی بر روابط برتری است که این رویکرد را در محاسبات لحاظ می‌کند، ولی با توجه به پیچیدگی و هزینه بر بودن، این مدل در تعیین مقادیر ترجیحات تصمیم‌گیرندگان (پارامترها)، از اقبال خوبی برخوردار نبوده است. بدین منظور در مقاله زرین‌صدف و دانشور (۱۳۹۵) [۳] روشی ارائه شد که با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، مقادیر تمام پارامترها را از داده‌های آموزشی شامل تصمیمات قبلی تصمیم‌گیرندگان یاد می‌گیرد و در طبقه‌بندی موجودی‌های جدید به کار می‌برد.

در مقاله هادی-ونچه (۲۰۱۰)^۳ [۱۶] شکل گسترده‌تری از مدل غیر خطی (*NP*) برای طبقه‌بندی موجودی‌ها بر اساس چند شاخص متفاوت ارائه شد. مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی بود که مجموعه مشترکی از وزن‌ها را برای تمام اقلام تعیین کرد. یو (۲۰۱۱)^۴ [۲۹] تحقیقی برای مقایسه تکنیک‌های طبقه‌بندی براساس هوش مصنوعی و تکنیک‌های طبقه‌بندی سنتی^۵ انجام دادند. تکنیک‌های مبتنی بر *AI*^۱ که در این مقاله مورد استفاده

1 .Tsai & Wei Yeh

2 .Particle Swarm Optimizations (PSO)

3 .Hadi-Vencheh

4 .Yu

5 .Traditional multiple discriminant analysis

قرار گرفته‌اند عبارتند از: تکنیک SVM^2 ، BPN^3 و $K-NN^4$ که نتیجه اول نشان داد که تکنیک‌های مبتنی بر AI دقت بیشتری را در طبقه‌بندی موجودی‌ها دارند و نتیجه دوم این بود که براساس تجزیه و تحلیل‌های آماری تکنیک SVM نسبت به دو تکنیک دیگر (BPN و $K-NN$) دقت بیشتری در طبقه‌بندی داشت و در انتها این مقاله پیشنهاد می‌کند که سازمان‌ها می‌توانند در سیستم‌های برنامه‌ریزی منابع سازمان ERP^5 به منظور طبقه‌بندی موجودی‌های بر اساس رویکرد ABC چندشاخصه از تکنیک‌های AI استفاده کنند. و نهایتاً در تحقیق کعبی و همکاران (۲۰۱۵)^۶ [۱۷] از تاپسیس برای محاسبه امتیاز هر قلم موجودی و از الگوریتم $CVNS^7$ برای ایجاد معیار وزن‌ها استفاده شد و در نهایت طبقه‌بندی موجودی با توجه به معیار وزن اقلام صورت گرفت. روش مورد استفاده در این تحقیق، ALM^8 بود که بر اساس روش تاپسیس و الگوریتم $CVNS$ است.

در حوزه طبقه‌بندی ABC چند معیاره موجودی مدل‌های متعددی توسط پژوهشگران داخلی ارائه شده است. صفائی قادیکلانی و اسماعیل‌زاده (۱۳۹۰) [۴] در پژوهش خود از تکنیک‌های ادغامی جهت مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌های مختلف طبقه‌بندی ABC چندمعیاره موجودی استفاده کرده‌اند. مدل ارائه شده جهت تعیین مناسب‌ترین مدل، بسیار ساده و قابل به کارگیری جهت مقایسه هر تعداد مدل می‌باشد. ناظمی و همکاران (۱۳۹۰) [۵] در پژوهش خود ابتدا با توجه به روش ABC ، ۷۷ قلم از مواد اولیه را به سه گروه تقسیم بندی کردند. در این تحقیق رویکردی تلفیقی از الگوهای فازی و ABC مورد استفاده قرار گرفت که دستاورد قابل توجهی در جهت روشن سازی کار با متغیر اسمی و غیراسمی ارائه کرد. از آنجا که کمبود یا در مواردی نبودن مواد اولیه در بازار سبب ایجاد مشکلاتی برای واحدهای تولیدی

-
1. Artificial intelligence
 2. Support vector machines
 3. Back propagation networks
 4. K-nearest neighbor
 5. Enterprise resource planning
 6. Kaabi, et al.
 7. Continuous valued number system
 8. Automatic learning method

می‌شود، تشخیص دقیق کالاها در سه گروه مذکور با در نظر گرفتن معیارهای کیفی می‌تواند به برنامه‌ریزی در خرید و سیستم کنترل موجودی شرکت‌ها کمک شایانی نماید. اسماعیل‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) [۲] با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه^۱ که نوعی الگوریتم تکاملی و همگراست، به دنبال تعیین تعداد طبقات موجودی بودند. در این راستا با توجه به اهداف حداقل کردن هزینه‌های انبار و سفارش‌دهی و افزایش نرخ گردش موجودی، تعداد طبقات تعیین می‌شود. در این پژوهش نخست اینکه محدودیتی در تعداد طبقات وجود نداشت زیرا روش ارائه شده پس از تجزیه و تحلیل داده‌ها تعداد طبقه‌ها را تعیین می‌کند، در صورتی- که در روش‌های ارائه شده قبلی ارقام باید در سه طبقه گروه‌بندی می‌شدند. دوم اینکه هدف اصلی روش ارائه شده در این پژوهش تعیین نوع طبقه نیست بلکه فقط تعداد طبقه‌ها را بدست می‌آورد. سوم اینکه یکی از مهمترین اهداف مدیران موجودی (حداقل کردن مجموع هزینه‌های سفارش‌دهی و نگهداری) در این پژوهش برآورده می‌شود. فرض یکسان بودن سطح اهمیت ارقام در طبقه‌بندی آنها می‌تواند اشتباه باشد. اسماعیل‌زاده و الفت (۱۳۹۵) [۱] سه رویکرد جدید جهت تعیین سطح اهمیت ارقام موجودی پیشنهاد دادند. این رویکردها می‌توانند هزینه‌های کنترل موجودی را کاهش دهند. نتایج نشان می‌دهند که تعداد ارقام با اهمیت بالا کاهش و تعداد ارقام با اهمیت پایین افزایش می‌یابند. با توجه به اینکه سیاست‌های کنترلی ارقام کم اهمیت نیاز به هزینه‌های کمتری دارند، می‌توان گفت این نتایج هزینه‌های کنترل موجودی را کاهش خواهند داد. هدف اصلی این پژوهش دقیق تر شدن مدیران در طبقه‌بندی و کاهش هزینه‌های کنترل موجودی بود.

برخلاف سایر مدل‌های گروه‌بندی موجودی، مدل این مقاله بر بهینه‌سازی روابط بین درآمد، سطح خدمات، سهام موجودی و هزینه‌های مدیریت برای به حداکثر رساندن سود تأکید می‌کند. جدول (۱) به بررسی مروریاتی از نظر ویژگی‌های کلیدی مدل‌سازی می‌پردازد که عبارتند از: تابع هدف، معیارهای عملکرد (یک یا چندمعیاره)، نوع مدل (خطی یا غیرخطی)، در نظر گرفتن محدودیت بودجه موجودی، بهینه‌سازی تعداد گروه‌های موجودی، در نظر

گرفتن هزینه مدیریت بالاسری برای گروه‌های موجودی و طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین. بدیهی است که مدل این مقاله با ارائه ترکیبی از ویژگی‌های مدل‌سازی جدید، به ادبیات تحقیق موجود کمک می‌کند. همچنین باعث می‌شود که مدیران موجودی و خرید تصمیم‌گیری در مورد گروه‌بندی موجودی و سطح خدمات را با توجه به بودجه محدود موجودی انجام دهند. این مدل همچنین به طور همزمان روابط تجاری موجود بین درآمد، سرمایه‌گذاری در موجودی و رضایت مشتری (از طریق سطح خدمات) را بهینه می‌کند و بودجه یک شرکت را برای هزینه‌های موجودی به صورت بهینه تخصیص می‌دهد. علاوه بر موارد فوق، با استفاده از مفهوم زنجیره‌تأمین، یک شبکه پیکره‌بندی زنجیره‌تأمین برای مدل این مقاله طراحی شده است و یک تابع هدف دیگر (دوم) نیز به مسئله اضافه شده است. پس به طور کلی در این مقاله یک شبکه زنجیره‌تأمین روبه جلوی سه سطحی دوهدفه با یک تابع هدف مربوط به سود خالص انبار مرکزی (سطح ۲) و یک تابع هدف مربوط به سود خالص بخش‌های مختلف (سطح ۳) در نظر گرفته شده است. همچنین در این مقاله، در نظر گرفتن محصولات در بسته‌های مختلف، سیاست‌های کنترل موجودی مانند کمبود موجودی، محدودیت فضای سطوح زنجیره‌تأمین و هزینه‌های نگهداری و سفارش‌دهی نیز لحاظ گردیده و از این جهت مدل به واقعیت بیشتر نزدیک شده است.

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های مدل‌های مختلف گروه‌بندی موجودی

شماره منبع	تابع هدف	معیار	نوع مدل	محدودیت بودجه	بهینه‌سازی گروه‌ها	مدیریت هزینه	طراحی زنجیره-تأمین
فقط بهینه‌سازی طبقه‌بندی موجودی							
[۱۰]	حداقل کردن تعداد گروه‌ها	چندمعیاره	خطی	خیر	بله	خیر	خیر
[۱۵]	حداقل کردن فاصله رتبه‌بندی کارشناسی شده	چندمعیاره	غیرخطی	خیر	خیر	خیر	خیر

خیر	خیر	خیر	خیر	غیر خطی	چندمعیاره	حداقل کردن فاصله رتبه بندی کارشناسی شده	[۲۳]
خیر	خیر	خیر	خیر	خطی	چندمعیاره	حداکثر کردن امتیازات عملکردی	[۲۴]
خیر	خیر	خیر	خیر	خطی	چندمعیاره	حداقل کردن فاصله از نقطه ایده آل	[۷]
خیر	خیر	خیر	خیر	خطی	چندمعیاره	حداکثر کردن امتیازات عملکردی	[۲۱]
خیر	خیر	خیر	خیر	غیر خطی	چندمعیاره	حداکثر کردن امتیازات عملکردی	[۱۶]
خیر	خیر	خیر	خیر	خطی	چندمعیاره	حداکثر کردن امتیازات عملکردی	[۱۱]
خیر	خیر	بله	خیر	خطی	چندمعیاره	حداقل کردن فاصله	[۹]
خیر	خیر	بله	خیر	غیر خطی	چندمعیاره	حداکثر کردن امتیازات عملکردی	[۲۷]
بهینه سازی گروه بندی موجودی و کنترل اقلام							
خیر	خیر	خیر	خیر	غیر خطی	تک معیاره	حداقل کردن هزینه	[۱۹]
خیر	خیر	بله	خیر	خطی	تک معیاره	حداقل کردن هزینه	[۸]
خیر	خیر	بله	خیر	خطی	تک معیاره	حداقل کردن هزینه	[۱۸]
خیر	خیر	خیر	خیر	غیر خطی	تک معیاره	حداقل کردن بودجه موجودی	[۶]
خیر	خیر	خیر	خیر	غیر خطی	تک معیاره	حداقل کردن هزینه	[۲۶]
بله	بله	بله	بله	خطی	تک معیاره و چندمعیاره	حداکثر کردن سود	این مقاله

تشریح مدل ریاضی

در این قسمت به توسعه مدل ریاضی پرداخته شده است. برای این کار از رویکرد زنجیره تامین استفاده شده است. مسئله با دو نوع از عوامل مدلسازی شده است: یک انبار مرکزی و U بخش مختلف یا انبارهای محلی. در مدل ما انبار مرکزی و بخش‌های مختلف دارای تقاضاهایی هستند و انبار مرکزی تصمیم می‌گیرد چقدر از هر قلم کالا به چه بخشی ارسال شود و همچنین ما فرض کرده‌ایم هم انبار مرکزی و هم انبارهای محلی دچار کمبود می‌شوند، پس برای آن هزینه‌ای در نظر گرفته شده است. هزینه خرید اقلام از تامین کنندگان و هزینه سفارش دهی نیز برای هر بار سفارش در نظر گرفته شده است. همچنین سطح موجودی نیز برای انبار مرکزی و برای هر بخش در نظر گرفته شده است. پس با توجه موارد ذکر شده مدل ریاضی به یک مدل دوهدفه توسعه یافته است که تابع هدف اول آن مربوط به سود ناخالص و هزینه‌های انبار مرکزی و تابع هدف دوم آن نیز مربوط به سود ناخالص و هزینه‌های بخش‌های مختلف می‌باشد. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، زنجیره تامین پیشنهادی از سه سطح تشکیل شده است. اولین سطح، شامل تامین کنندگان می‌شود. دومین سطح، شامل یک انبار مرکزی است و آخرین سطح هم شامل انبارهای محلی می‌باشد که کالاهای مورد نیاز آنها از انبار مرکزی تامین می‌شود. ما برای هر سطح یک ظرفیتی را مشخص کردیم که مشخص کننده مقدار مجاز اقلامی است که می‌تواند درون همان سطح قرار بگیرد پس محدودیت ظرفیت نیز یکی دیگر از عواملی است که برای توسعه مدل از آن استفاده شده است. همچنین این زنجیره تامین چند دوره‌ای می‌باشد که در دوره‌های مختلف برخی از پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل مقادیر مختلفی را به خود اختصاص می‌دهند. در مدل سازی مسئله انبار مرکزی می‌تواند اقلام مورد نیاز خود را از چندین تامین کننده مختلف خریداری کند و به چندین انبار محلی (بخش‌های مختلف) تحویل دهد اما بخش‌های مختلف نمی‌توانند به صورت مستقیم از تامین کنندگان اقلام مورد نیاز خود را خریداری کنند.

برای هر تحویل (از تامین کننده به انبار مرکزی یا از انبار مرکزی به بخش‌ها) یک هزینه ثابت وجود دارد (هزینه سفارش دهی) که به مواردی از قبیل: فاصله، منابع مورد نیاز انسانی، زمان

مورد نیاز و... بستگی دارد. در انبار مرکزی اقلام موجود به گروه‌های مختلفی دسته بندی شده اند تا مدیریت اقلام بهتر باشد و این گروه بندی بر اساس آنالیز ABC صورت گرفته است بنابراین امکان ارسال دسته ای و گروهی اقلام از انبار مرکزی به بخش ها نیز وجود دارد. به طور کلی خروجی های این مدل عبارتند از:

✓ مقدار اقلام خریداری شده توسط انبار مرکزی در هر دوره و توسط هر تامین کننده

✓ مقدار اقلامی که در انبار مرکزی ذخیره می شوند

✓ مقدار اقلامی که (چه به صورت دسته ای یا تکی) به هر بخش در هر دوره تحویل داده

می شود

✓ مقدار اقلامی که در هر بخش ذخیره می شوند

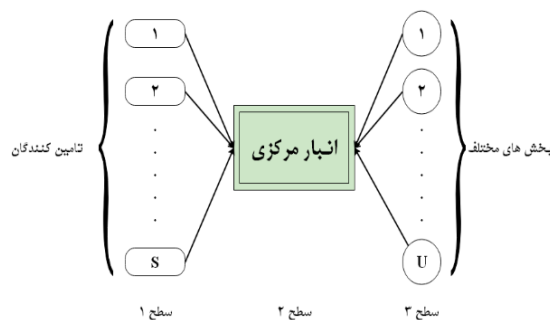
مقدار اقلامی که در هر دوره به هر بخش تحویل داده می شود با یک پارامتری به نام f که نشان دهنده تعداد اقلام موجود در دسته های سفارش داده شده است، مشخص می شوند. در ادامه به تشریح سطح موجودی انبار مرکزی و بخش های مختلف پرداخته می شود.

N قلم کالا را در نظر بگیرید. هر قلم کالا یک تقاضای متوسط ماهانه d و انحراف معیار σ دارد. تقاضا برای هر SKU از توزیع $N(d, \sigma)$ پیروی می کند. زمان تحویل هر قلم موجودی برابر با h است و π درآمد ناخالص هر قلم کالا است. برای ساده کردن فرآیند مدیریت موجودی و کاهش هزینه های سربار، مدیر موجودی وظیفه دارد که کالاها را به گروه های مختلفی طبقه بندی کند، سپس یک سطح خدمت را برای هر گروه تنظیم کند. پس، هر گروه موجودی در انبار مرکزی دارای یک سطح خدمت β_{ji} است. هزینه نگهداری موجودی برای هر SKU برابر e است. مدل مسئله همچنین دارای بودجه کل ثابت و محدود D برای انبار کردن محصولات در انبار مرکزی و بخش های مختلف است. هنگامی که تقاضا به طور نرمال توزیع می شود، سطح موجودی هر SKU در انبار مرکزی برای رسیدن به β_{ji} (در گروه j) می تواند به روش استاندارد محاسبه شود که به صورت معادله (۱) است. [۲۰]

$$\delta_{ijt}^2 = d_{it}^2 h_{it}^2 + Z_j \sigma_i \sqrt{h_{it}^2} \quad (1)$$

که مقدار Z_j مقدار Z مربوط به β_{jt} در توزیع نرمال استاندارد است. به طور کلی سطح موجودی در معادله (۱) می‌تواند منفی شود اگر: الف) Z_j منفی شود (β_{jt} کمتر از ۵۰ درصد باشد)، ب) انحراف معیار بزرگ باشد (تغییرات زیادی در تقاضا باشد) و ج) زمان تحویل طولانی باشد. [۲۰]

از دیدگاه مدیریت هزینه θ_j برای نگهداری و مدیریت هر گروه موجودی وجود دارد. این هزینه ممکن است شامل هزینه‌های خرید و هزینه‌های اداری برای هر گروه نیز باشد. در این مقاله فرض شده که θ_j متغیر است و تابعی از تعداد گروه‌های موجودی است.



شکل (۱): شبکه زنجیره تامین پیشنهادی

مدل ریاضی

با در نظر گرفتن موارد قسمت قبل، یک مدل ریاضی ارائه شده که از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۱ می‌باشد. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی به صورت زیر هستند:

مجموعه‌ها

1. Mix integer linear programming

i	مجموعه اقلام موجودی (SKUs)
j	مجموعه گروه‌های موجودی
s	مجموعه تامین کنندگان
u	مجموعه بخش (انبار)های مختلف
t	مجموعه افق برنامه ریزی

پارامترها

$it^2 d$	میانگین تقاضای ماهیانه قلم موجودی i در دوره t و در سطح ۲
$jut^3 d$	میانگین تقاضای ماهیانه گروه موجودی j در بخش u و در دوره t و در سطح ۳
$i^2 \sigma$	انحراف معیار تقاضای ماهیانه موجودی i در سطح ۲
$it^2 h$	زمان تحویل موجودی i در سطح ۲
$it^2 \pi$	سود ناخالص موجودی i در دوره t در سطح ۲
$jut^3 \pi$	سود ناخالص گروه موجودی j در دوره t در سطح ۳
$it^2 e$	هزینه نگهداری موجودی i در دوره t در سطح ۲
$jut^3 e$	هزینه نگهداری گروه موجودی j در بخش u در دوره t در سطح ۳
$j\theta$	هزینه متغیر مدیریت بالاسری برای گروه موجودی j
N	تعداد کل اقلام موجودی (SKUs)
M	عدد تصادفی بزرگ
D	بودجه کل موجودی
β_{jt}	سطح سرویس مربوط به گروه موجودی j در دوره t
Z_j	مقدار Z تابع نرمال استاندارد مربوط به سطح سرویس α از گروه موجودی j
CO_{ist}	هزینه خرید موجودی i بوسیله انبار مرکزی از تامین کننده s در دوره t
$ist^2 O$	هزینه ثابت سفارش دهی موجودی i بوسیله انبار مرکزی از تامین کننده s در دوره t در سطح ۲

هزینه ثابت سفارش دهی گروه موجودی زیوسيله بخش u از انبار مرکزی در دوره t	O_{jut}^r
در سطح ۳	
هزینه ثابت کمبود موجودی i در گروه موجودی z در دوره t در سطح ۲	CL_{ijt}^r
هزینه ثابت کمبود گروه موجودی z در بخش u در دوره t در سطح ۳	CL_{jut}^r
ظرفیت تامین کننده S برای موجودی i در دوره t در سطح ۱	CP_{ist}^r
ظرفیت انبار مرکزی برای موجودی i در دوره t در سطح ۲	CP_{it}^r
ظرفیت بخش u برای موجودی i در دوره t در سطح ۳	CP_{jut}^r
مقدار موجودی i در گروه موجودی z در دوره t	f_{ijt}

متغیرهای تصمیم

سطح موجودی قلم i در انبار مرکزی در دوره t در سطح ۲	V_{it}^r
سطح موجودی قلم i در گروه z در بخش u در دوره t در سطح ۳	Q_{jut}^r
مقدار موجودی i تحویل داده شده از تامین کننده S در دوره t	q_{ist}
تعداد گروه موجودی سفارش داده شده از طرف بخش u در دوره t	Z_{jut}
مقدار کمبود موجودی i در گروه z در دوره t در سطح ۲	La_{ijt}^r
مقدار کمبود گروه موجودی z در بخش u در دوره t در سطح ۳	La_{jut}^r
۱: اگر موجودی i به گروه z در دوره t اختصاص یابد، در غیر اینصورت: ۰	X_{ijt}
۱: اگر گروه موجودی z در بخش u در دوره t انتخاب شود، در غیر اینصورت: ۰	Y_{jut}
۱: اگر تامین کننده S موجودی i در دوره t تحویل دهد، در غیر اینصورت: ۰	U_{ist}

$$Max Z_1 = \sum_i \sum_j \sum_t \pi_{it}^2 d_{it}^2 \beta_{jt} X_{ijt} - \sum_j \sum_u \sum_t \theta_j Y_{jut} - \sum_i \sum_s \sum_t CO_{ist} Q_{ist}^1 - \sum_i \sum_s \sum_t O_{ist}^2 U_{ist} - \sum_i \sum_j \sum_t CL_{ijt}^2 La_{ijt}^2 \quad (2)$$

$$Max Z_2 = \sum_i \sum_j \sum_u \sum_t \pi_{jut}^3 d_{jut}^3 \beta_{jt} Y_{jut} - \sum_j \sum_u \sum_t O_{jut}^3 Y_{jut} - \sum_j \sum_u \sum_t CL_{jut}^3 La_{jut}^3 \quad (3)$$

Subject to:

$$\sum_j X_{ijt} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (4)$$

$$\sum_i X_{ijt} \leq N \times Y_{jut} \quad \forall j, u, t \quad (5)$$

$$M \times U_{ist} \geq Q_{ist}^1 \quad \forall i, s, t \quad (6)$$

$$M \times Y_{jut} \geq Z_{jut} \quad \forall j, u, t \quad (7)$$

$$CP_{ist}^1 \geq Q_{ist}^1 \quad \forall i, s, t \quad (8)$$

$$CP_{it}^2 \geq V_{it}^2 + \sum_s Q_{ist}^1 \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$\sum_j CP_{jut}^3 \geq \sum_j f_{ijt} Z_{jut} + Q_{jut}^3 \quad \forall u, t \quad (10)$$

$$V_{it}^2 + La_{ijt}^2 = \sum_j d_{it}^2 h_{it}^2 X_{ijt} + \sum_j Z_j \sigma_i \sqrt{h_{it}^2} X_{ijt} + V_{it-1}^2 + La_{ijt-1}^2 \quad \forall i, t \quad (11)$$

$$Q_{jut}^3 + La_{jut}^3 = \sum_i f_{ijt} Z_{jut} - d_{jut}^3 + Q_{jut-1}^3 + La_{jut-1}^3 \quad \forall j, u, t \quad (12)$$

$$\sum_i e_{it}^2 V_{it}^2 + \sum_j \sum_u e_{jut}^3 Q_{jut}^3 \leq D \quad \forall t \quad (13)$$

$$Q_{ist}^1, V_{it}^2, Q_{jut}^3, Z_{jut}, La_{ijt}^2, La_{jut}^3 \geq 0 \quad (14)$$

$$X_{ijt}, Y_{jut}, U_{ist} \in [0, 1] \quad (15)$$

تابع هدف (۲) حداکثر کل سود خالص انبار مرکزی را محاسبه می کند که هزینه‌ها از آن کم شده است. در اینجا، سطح خدمت یک نرخ ثابت در واحد زمان برای محاسبه مقدار تقاضا

است. اگر کالای i در گروه موجودی j با سطح خدمت β_{jt} قرار گیرد، $d_{it}^2 \beta_{jt}$ متوسط تقاضای قابل انتظار انبار مرکزی است که می تواند بوسیله هر SKU تکمیل شود. عبارت اول در تابع هدف (۲) کل سود ناخالص همه SKU هاست. عبارت دوم هزینه متغیر مدیریت بالاسری گروه‌های موجودی در انبار مرکزی است. عبارت سوم هزینه خرید $SKUs$ از تامین کنندگان است. عبارت چهارم هزینه سفارش‌دهی اقلام مختلف از تامین کنندگان و نهایتاً

عبارت پنجم هزینه کمبود موجودی در پایان هر دوره است اگر انبار مرکزی با کمبود مواجه شود.

تابع هدف (۳) نیز حداکثر کل سود خالص انبارهای محلی را محاسبه می‌کند که هزینه‌های آنها از آن کم شده‌است. عبارت اول در تابع هدف (۳) سود ناخالص همه گروه‌های موجودی است که کالاها در آنها قرار گرفته‌اند. عبارت دوم، هزینه سفارش‌دهی گروه‌های موجودی از انبار مرکزی است و بالاخره عبارت سوم هزینه کمبود موجودی در پایان هر دوره است اگر بخش‌ها با کمبود مواجه شوند.

محدودیت (۴) یک SKU را به حداکثر یک گروه اختصاص می‌دهد. این امکان وجود ندارد که هر کالایی به هر گروهی تخصیص یابد چون برای هر SKU_i و گروه z ، اگر $\delta_{ijt} > 0$ ، کالای i نمی‌تواند به گروه z اختصاص داده شود، یعنی $X_{ijt} = 0$. محدودیت (۵) برای این است که یک گروه باید انتخاب شود تا هر SKU به گروهی اختصاص یابد. به عبارت دیگر، اگر گروه z انتخاب نشده باشد، هیچ SKU را نمی‌توان به گروه z اختصاص داد. محدودیت (۶) و (۷) برای ارتباط بین متغیرهای باینری و متغیرهای مثبت مدل است. محدودیت (۸) ظرفیت محصول تامین‌کننده را مشخص می‌کند و محدودیت (۹) و (۱۰) نیز به ترتیب ظرفیت انبار مرکزی و بخش‌های مختلف را مشخص می‌کنند. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) میزان موجودی در انبار مرکزی براساس معادله (۱) و میزان موجودی در هر بخش را محاسبه می‌کنند که کمبود نیز به آنها اضافه شده است. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که هزینه نگهداری موجودی در انبار مرکزی و همچنین بخش‌ها از بودجه ثابت کل بیشتر نشود. محدودیت (۱۴) بیانگر مثبت بودن پارامترهای مدل و محدودیت (۱۵) متغیرهای باینری مدل را مشخص می‌کند. مدل این مقاله از نوع $NP-hard$ است به طوری که هیچ الگوریتم چند جمله‌ای برای حل و بهینه‌سازی آن وجود ندارد. [۲۰]

روش‌های حل پیشنهادی

مسئله بهینه‌سازی چندهدفه

یک مسئله بهینه‌سازی دارای چند تابع هدف است که بایستی کمینه یا بیشینه شوند و همانند مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه، معمولاً دارای تعدادی محدودیت است که هر جواب‌شدنی (شامل جواب‌های بهینه) بایستی این محدودیت‌ها را ارضا کند. به دلیل اینکه بجای یک هدف در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، یک بردار هدف وجود دارد به مسائل بهینه‌سازی چندهدفه گاهی بهینه‌سازی برداری نیز گفته می‌شود. روش‌ها و الگوریتم‌های حل مختلفی برای این گونه مسائل وجود دارد که چند مورد از آنها در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند و عبارتند از:

روش معیار جامع^۱

روش معیار جامع جزء اولین دسته از مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه^۲ است و به خصوص در مواردی که تصمیم‌گیرنده همه اطلاعات مورد نیاز قبل از حل مسئله را فراهم می‌کند. روش معیار جامع به منظور حداقل کردن انحرافات توابع هدف موجود در یک مدل چندهدفه نسبت به حل ایده‌آل آنها است. به عبارت دیگر روش معیار جامع به منظور سنجش نزدیکی یک راه حل ایده‌آل مورد استفاده قرار می‌گیرد که رابطه آن به صورت زیر است:

$$\max \left[\sum_i \left(w_i \left| \frac{f_i^* - f_i}{f_i^*} \right| \right)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (16)$$

که w_i بیانگر درجه اهمیت (وزن) برای هدف i ام است. $1 \leq P \leq \infty$ بیانگر پارامترهای مشخص‌کننده خانواده LP است. ارزش P مشخص‌کننده درجه تأکید بر انحرافات موجود است به گونه‌ای که هر چقدر P بزرگتر باشد تأکید بیشتری بر بزرگترین انحراف خواهد بود و اگر $P = \infty$ شود بدان مفهوم است که بزرگترین انحراف از انحراف‌های موجود برای بهینه‌سازی مدنظر واقع گردد. در این مقاله در فرآیند تک‌هدفه‌سازی به روش معیار جامع

1. LP-metric

2. Multi-objective decision making (MODM)

مقدار $P = 1$ در نظر گرفته شده است تا همانطور که گفته شد هر یک از انحرافات وزنی متناسب با خود را داشته باشند. همچنین مقدار W_i برای هر یک از توابع هدف نیز برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

روش اپسیلون محدودیت اصلاح شده^۱

این روش یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است که با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت، به حل این نوع مسائل می-پردازد [۷]. مرز پارتو نیز می تواند با روش اپسیلون محدودیت^۲ ایجاد شود. [۱۲]

$$\begin{aligned} \min f_1(x) \\ x \in X \\ f_2(x) \leq \varepsilon_2 \\ \dots \\ f_n(x) \leq \varepsilon_n \end{aligned} \quad (17)$$

گامهای روش اپسیلون محدودیت به صورت زیر است:

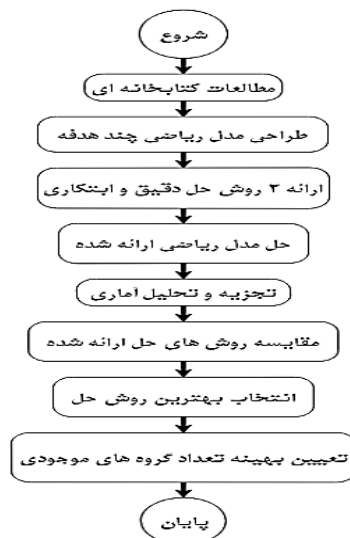
۱. انتخاب یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی
۲. هر بار حل مسئله با توجه به یکی از توابع هدف F و تعیین مقادیر بهینه هر تابع هدف
۳. تقسیم بندی بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی به تعداد از قبل مشخص شده و بدست آوردن یک جدول مقادیر برای $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$
۴. حل مسئله هر بار با تابع هدف اصلی و با هر یک از مقادیر $\varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$
۵. گزارش جوابهای پارتویی یافته شده

1 ..Modified ε -constraint

2 . ε -constraint

نتایج محاسباتی

هدف از این بخش، اعتبارسنجی روش‌های حل ارائه شده جهت حل مدل ریاضی پیشنهادی می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، در این مقاله یک مدل ریاضی به منظور تعیین تعداد بهینه گروه‌های موجودی در انبار ارائه گردیده است. دو روش قطعی و ابتکاری شامل روش‌های معیار جامع و اسپیلون محدودیت اصلاح شده ارائه شده است. این روش‌ها برای حل مدل به کار گرفته شده‌اند. به منظور اعتبارسنجی این دو روش پیشنهادی و مقایسه آنها در پاسخ‌های تولیدی، مدل ریاضی به ازای هر روش در ۱۵ مثال عددی مختلف اجرا شده است. سپس با استفاده از آزمون فرض آماری نتایج این روش‌ها در تمامی مثال‌های عددی با بهره‌گیری از آزمون t با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین از روش AHP به منظور انتخاب روش برتر استفاده شده است. در نهایت با مشخص شدن روش حل برتر، بوسیله آن روش، تعداد بهینه گروه‌های موجودی برای انبار مرکزی و بخش‌های مختلف در ابعاد کوچک مشخص شده است. لازم به ذکر است این مقاله از نوع توسعه‌ای-کاربردی است و داده‌های پژوهش به صورت آزمایشی تولید شده‌اند. خلاصه این قسمت در شکل (۲) آمده است.



شکل (۲): شمای کلی گام‌های قسمت ششم مقاله

مثال عددی

در این قسمت به منظور ارزیابی مدل ریاضی پیشنهادی برای این شبکه زنجیره تامین و روش - های حل ارائه شده برای آن، در ابتدا اقدام به تعریف شاخص هایی می گردد. بدین صورت که سه شاخص شامل مقدار توابع هدف محاسبه شده با اجرای مدل توسط هر روش پیشنهادی و همچنین مدت زمان سپری شده توسط آن روش، تعیین شده و با ایجاد مثال های عددی مختلف که در جدول (۲) نشان داده شده، روش های پیشنهادی با یکدیگر مقایسه می شوند.

جدول (۲): مثال های عددی تولید شده برای مدل ریاضی

t	u	s	j	i	مثال های عددی
۹	۸	۱۰	۷	۳۰	۱
۱۱	۶	۷	۵	۴۰	۲
۱۰	۷	۸	۸	۳۵	۳
۵	۱۱	۱۲	۳	۵۰	۴
۷	۹	۱۵	۱۰	۶۰	۵
۸	۱۲	۵	۱۵	۲۰	۶
۳	۵	۹	۶	۳۵	۷
۴	۱۰	۱۴	۴	۲۵	۸
۱۶	۱۳	۴	۱۲	۴۵	۹
۱۳	۱۵	۶	۱۱	۴۲	۱۰
۵	۴	۳	۱۴	۳۲	۱۱
۱۲	۱۵	۱۱	۲۰	۵۰	۱۲
۸	۶	۸	۹	۴۴	۱۳
۶	۸	۷	۱۶	۴۰	۱۴
۷	۹	۱۰	۱۷	۶۰	۱۵

دیگر مقادیر پارامترهای مورد استفاده در این مثال عددی در جدول (۳) نمایش داده شده‌اند که تمامی آنها بر اساس توزیع یکنواخت می‌باشند. در مورد θ_j که متغیر است و تابعی از تعداد گروه‌هاست به این صورت مقدار دهی شده که اگر تعداد گروه‌ها بیشتر از ۵ باشد مقدار یکنواخت (۱۲۰ و ۲۰۰) و در غیر این صورت مقدار یکنواخت (۱۰۰ و ۵۰) را می‌گیرد.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مثال عددی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$it^r d$	یکنواخت (۴۰۰۰ و ۲۰۰۰)	β_{jt}	یکنواخت (۰,۹۵ و ۰,۵۰)
$jut^r d$	یکنواخت (۸۰۰ و ۴۰۰)	Z_j	یکنواخت (۱,۸۰ و ۱,۳۰)
$i^r \sigma$	یکنواخت (۰,۹۵ و ۰,۷۵)	CO_{ist}	یکنواخت (۵۰ و ۳۰)
$it^r h$	یکنواخت (۱۲ و ۷)	$ist^r O$	یکنواخت (۸۰۰ و ۵۰۰)
$it^r \pi$	یکنواخت (۹۰۰ و ۵۰۰)	$jut^r O$	یکنواخت (۴۰۰ و ۱۰۰)
$jut^r \pi$	یکنواخت (۶۰۰ و ۳۰۰)	$ijt^r CL$	یکنواخت (۱۴ و ۷)
$it^r e$	یکنواخت (۹ و ۶)	$jut^r CL$	یکنواخت (۱۰ و ۵)
$jut^r e$	یکنواخت (۱۰ و ۵)	$ist^r CP$	یکنواخت (۵۵۰۰۰ و ۵۰۰۰۰)
θ_j	یکنواخت (۱۵۰ و ۵۰) یکنواخت (۲۰۰ و ۱۲۰)	$it^r CP$	یکنواخت (۱۵۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰)
M	۵۰۰۰۰۰	$jut^r CP$	یکنواخت (۶۵۰۰۰ و ۵۰۰۰۰)
D	۵۰۰۰۰۰۰	f_{ijt}	یکنواخت (۲۵ و ۱۰)

برای حل مدل ریاضی توسط روش‌های ابتکاری ذکر شده از نرم‌افزار گمز نسخه ۲۴,۱,۳ و سالور CPLEX و در سیستمی با مشخصات CPU=Cori7 6700 HQ و RAM=16 DDR4 GIG استفاده شده‌است که نتایج حاصل از اجرای روش‌های معیار جامع و اپسیلون محدودیت بر روی مثال‌های عددی تولید شده در جداول (۴) و (۵) گردآوری شده‌اند.

جدول (۴): نتایج حاصل از اجرای مثال‌های عددی به روش معیار جامع

مدت زمان اجرا	معیار جامع		مثال‌های عددی
	Z_2	Z_1	
۰۷۴/۱	۵۰۹۴۹۴/۳E۹+	۲۳۳۹۹۲/۴E۸+	۱
۳۴۹/۱	۰۷۸۲۰۴/۳E۹+	۰۴۸۹۴/۶E۸+	۲
۱۳۱/۱	۵۶۲۹۵۸/۴E۹+	۳۲۰۳۰۰/۵E۸+	۳
۷۲۲/۰	۹۲۴۸۲۱/۱E۹+	۵۵۱۹۵۱/۴E۸+	۴
۳۴۱/۱	۹۲۶۰۷۴/۸E۹+	۲۴۱۹۶۹/۷E۸+	۵
۹۷۳/۰	۸۳۰۳۲۹/۶E۹+	۷۴۵۲۴۱/۲E۸+	۶
۵۸۷/۰	۰۳۴۳۳۳/۷E۸+	۹۴۹۷۹۱/۱E۸+	۷
۵۹۵/۰	۱۶۴۶۵۰/۹E۸+	۸۲۴۲۷۵/۱E۸+	۸
۰۱۸/۱۷	۶۶۲۵۸/۲E۱۰+	۱۲۴۴۲۳/۸E۸+	۹
۱۴۸/۱	۵,۱۸۹۸۲۵E۹+	۸۴۱۰۳۱/۱E۸+	۱۰
۶۰۴/۰	۰۹۶۳۵۹/۲E۹+	۰۰۰۲۴۵/۳E۸+	۱۱
۳۵۵/۵۷	۲۴۶۲۲/۴E۱۰+	۰۴۶۳۴۸/۹E۸+	۱۲
۱۱۵/۱	۴۳۴۸۴۰/۴E۹+	۹۹۷۸۲۸/۵E۸+	۱۳
۱۸۸/۱	۱۴۴۵۴۰/۷E۹+	۴۷۹۲۸۶/۴E۸+	۱۴
۰۱۳/۲	۵۳۱۱۶۷/۱E۱۰+	۳۲۲۷۱۹/۷E۸+	۱۵

جدول (۵): نتایج حاصل از اجرای مثال‌های عددی به روش اسپیلون محدودیت

مدت زمان اجرا	اسپیلون محدودیت		مثال‌های عددی
	Z_2	Z_1	
۲۰۳/۳۲	۲۴۲۵۳۲/۱E۹+	۲۰۴۸۰۲/۴E۸+	۱
۵۳۳/۳۵	۰۶۸۸۱۸/۸E۸+	۰۴۵۷۲۰/۶E۸+	۲
۴۱۹/۳۴	۳۷۹۷۱۷/۹E۸+	۳۱۸۸۵۱/۵E۸+	۳
۹۱۶/۲۱	۷۱۵۲۹۰/۸E۸+	۵۵۵۹۵۱/۴E۸+	۴
۸۹۴/۹۶	۰۲۷۲۷۱/۲E۹+	۲۴۱۹۶۹/۷E۸+	۵

۲۸۶/۴۰	۱۹۷۶۳۱/۱E۹+	۷۴۵۲۴۱/۲E۸+	۶
۷۵۲/۱۲	۹۷۰۹۳۷/۲E۸+	۹۴۹۷۹۱/۱E۸+	۷
۷۲۷/۱۲	۰۲۴۲۰۱/۴E۸+	۸۲۴۲۷۵/۱E۸+	۸
۹۹۶/۱۷۶	۶۴۹۹۷۳/۳E۹+	۰۹۵۲۲۴/۸E۸+	۹
۷۳۷/۷۶	۱۲۹۳۸۰/۳E۹+	۷۲۳۰۵۱/۶E۸+	۱۰
۲۱۷/۱۸	۴۶۶۸۱۵/۵E۸+	۰۰۰۲۴۵/۳E۸+	۱۱
۴۷۸/۳۸۴	۷۷۷۵۴۷/۴E۹+	۰۳۵۳۲۲/۹E۸+	۱۲
۴۶۸/۴۲	۳۸۴۲۵۳/۹E۸+	۹۹۷۸۲۸/۵E۸+	۱۳
۸۰۷/۴۴	۱۵۱۱۹۷۸/۱E۹+	۴۷۹۲۸۶/۴E۸+	۱۴
۵۷۹/۸۳	۸۳۳۵۲۶/۲E۹+	۳۲۲۷۱۹/۷E۸+	۱۵

تحلیل آماری نتایج

به منظور تحلیل نتایج حاصل از دو روش پیشنهادی جهت حل مدل ریاضی و مقایسه آنها با یکدیگر، از آزمون t بهره گرفته شده است. با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵ درصد، آزمون مقایسه آماری میانگین‌های نتایج دو روش پیشنهادی برای هر سه شاخص ارزیابی تعریف شده، انجام می‌گیرد به طوری که در هر مقایسه، فرض صفر (H_0) برابر با مساوی بودن میانگین‌های نتایج حاصل از دو روش پیشنهادی و فرض مقابل (H_1) به دنبال رد این فرض می‌باشد. این آزمون فرض برای هر سه شاخص تعیین شده یعنی مقادیر توابع هدف و مدت زمان اجرای مدل صورت گرفته است. نتایج حاصل از این آزمون که با استفاده از مینی تب^۱ نسخه ۱۷ صورت گرفته در جداول (۶) تا (۸) و شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج همانطور که در جداول (۵) تا (۷) نمایش داده شده، با توجه به اینکه مقادیر P -value برای شاخص تابع هدف اول بیشتر از سطح معنی داری می‌باشد پس فرض صفر در خصوص شاخص اول پذیرفته می‌شود. بدین معنی که بر اساس سطح اطمینان ۹۵ درصد، اختلاف معنی داری بین پاسخ‌های حاصل از دو روش حل پیشنهادی از نظر شاخص مقدار تابع هدف اول وجود ندارد. فرض

1. MiniTab

صفر در خصوص شاخص‌های مقدار تابع هدف دوم و مدت زمان اجرای مدل رد می‌شود چون مقدار P -value آن کمتر از ۰,۰۵ است.

جدول (۶): نتایج آزمون فرض آماری برای تابع هدف اول

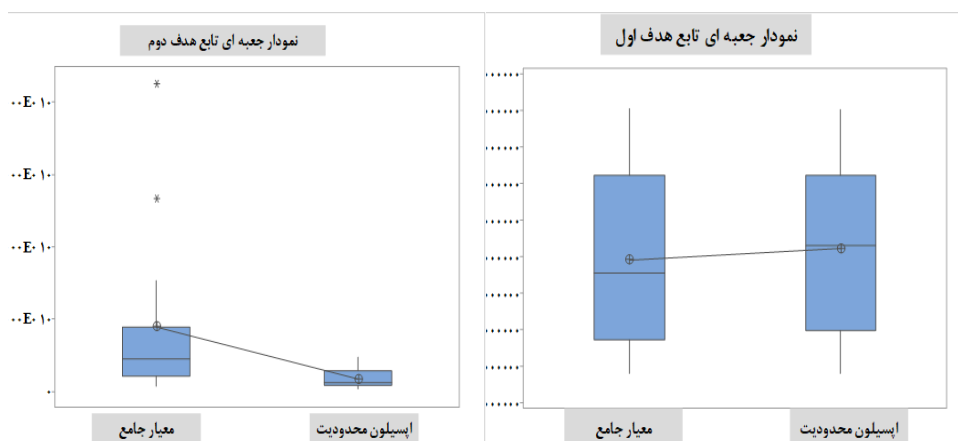
تابع هدف اول	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطای استاندارد	P -Value
معیار جامع	۴۹۱۵۴۸۹۸۰	۲۳۶۲۷۱۵۶۵	۶۱۰۰۵۰۵۶	۷۰۶/۰
اپسیلون محدودیت	۵۲۳۶۰۱۸۳۳	۲۲۳۸۹۸۰۹۶	۵۷۸۱۰۲۴۰	

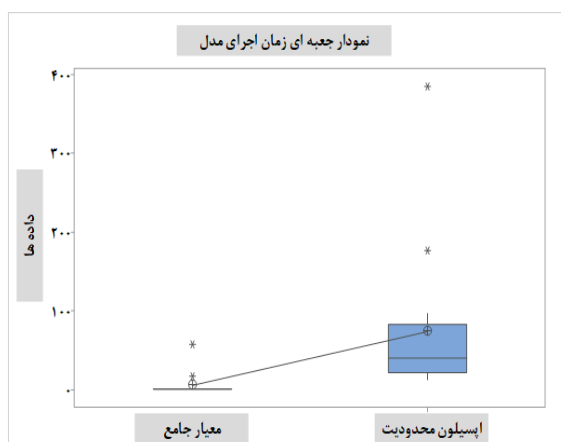
جدول (۷): نتایج آزمون فرض آماری برای تابع هدف دوم

تابع هدف دوم	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطای استاندارد	P -Value
معیار جامع	۸۹۱۴۸۰۲۸۲۰	۱۱۴۳۴۵۶۱۹۶۷	۲۹۵۲۳۹۱۲۰۵	۰۲۹/۰
اپسیلون محدودیت	۱۶۸۱۰۵۶۰۷۳	۱۳۳۶۴۳۰۷۲۰	۳۴۵۰۶۴۹۲۸	

جدول (۸): نتایج آزمون فرض آماری برای مدت زمان اجرا

مدت زمان اجرا	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطای استاندارد	P -Value
معیار جامع	۹/۵	۸/۱۴	۸/۳	۰۱۷/۰
اپسیلون محدودیت	۱/۷۴	۹۶	۲۵	





شکل (۳): نمودارهای جعبه‌ای توابع هدف و مدت زمان اجرای مدل

بهترین روش حل پیشنهادی

در ادامه و به منظور انتخاب بهترین روش در بین دو روش حل پیشنهادی، از تکنیک *AHP* استفاده شده است. *AHP* یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری چندشاخصه است که توسط ال‌ساعتی^۱ در دهه ۱۹۷۰ ابداع شد [۲۵]. این روش هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه و شاخص تصمیم‌گیری روبرو است، می‌تواند مفید باشد. شاخص‌ها نیز می‌توانند کیفی باشند. اساس این روش بر مقایسات زوجی است. فرآیند رتبه‌بندی و اولویت‌بندی گزینه‌ها در روش *AHP* دربرگیرنده مراحل زیر می‌باشد:

فرض کنید n گزینه و m سنجه برای ارزیابی آنها داشته باشیم. گام‌های این روش به شرح زیر است:

گام ۱. تعیین سنجه‌ها

گام ۲. مقایسه جفتی هر دو رقیب ($\frac{n(n-1)}{2}$ مقایسه) برای هر سنجه و تشکیل ماتریس $n \times n$ رقبا که درایه‌های آن اعدادی در فاصله‌ای مشخص‌اند و برتری نسبی یکی را بر دیگری بیان می‌کنند.

گام ۳. بدست آوردن وزن هر رقیب برای این سنجه (یعنی یک بردار $1 \times n$ که این کار با انجام یک سری عملیات سطری - ستونی بر روی ماتریس گام قبل و استفاده از روش ویژه - بردار (*eigenvector*) انجام می شود و برداری بدست می آید که جمع عناصر آن یک و مقدار عنصر نام آن وزن رقیب نام را برای این سنجه نشان می دهد.

گام ۴. گامهای ۱ تا ۳ برای تمام سنجه ها انجام می گیرد تا در نهایت m بردار n تایی بدست آید و با در کنارهم قراردادن آنها یک ماتریس $m \times n$ تشکیل شود.

گام ۵. مقایسه جفت جفت خود سنجه ها و بدست آوردن وزن هر یک از آنها از روی ماتریس سنجه ها که برتری سنجه ها را نسبت به هم نشان می دهد. (یک بردار $1 \times m$)

۱-۵- ضرب بردار وزن سنجه ها در ماتریس $m \times n$ و در نهایت بدست آوردن وزن نهایی هر رقیب.

۲-۵- آزمون سازگاری برای نبود تناقض در تخصیص اعداد برتری طرحها در مقایسه با سنجه ها.

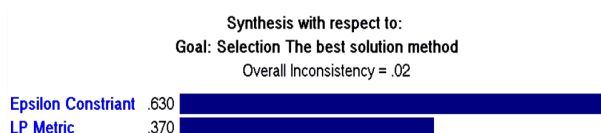
در این قسمت برای استفاده از روش *AHP* ابتدا باید درخت سلسله مراتبی تشکیل شود که این درخت متشکل از سه قسمت مجزا می باشد: گزینه ها، شاخص ها و هدف اصلی. در قسمت گزینه ها دو روش حل معیار جامع و اپسیلون محدودیت قرار می گیرند. شاخص های مورد نظر این درخت و همچنین این مقاله شامل مقادیر تابع هدف اول، مقادیر تابع هدف دوم و مدت - زمان حل مدل توسط نرم افزار گمز می باشد و نهایتا هدف اصلی هم، انتخاب بهترین روش حل است. در مرحله بعد ماتریس مقایسات زوجی تشکیل شده و به مقایسه اهمیت، ارجحیت یا درستیابی دو عنصر نسبت به عنصر سطح بالاتر پرداخته می شود. شاخص ها با توجه درجه اهمیت آنها با هم مقایسه شده اند که برای تعیین میزان اهمیت های مختلف نیز از جدول (۹) استفاده شده است. در این مقاله، تابع هدف اول دارای بالاترین اهمیت، با توجه به اهمیت بیشتر انبار مرکزی نسبت به سایر انبارها، و تابع هدف دوم و مدت زمان حل مدل نیز به ترتیب دارای اولویت های بعدی از لحاظ اهمیت هستند. در قسمت بعد برای اطمینان از درستی اهمیت های

در نظر گرفته شده برای شاخص‌ها به نرخ ناسازگاری باید توجه شود که اگر این نرخ از ۰,۱ کمتر باشد بیانگر معتبر بودن این اهمیت‌ها است. در این مقاله بعد از تعیین اهمیت‌ها به شاخص‌ها، نرخ ناسازگاری برابر ۰,۰۲ شد که بیانگر درست بودن تخصیص اهمیت‌ها به شاخص‌ها بود. سپس در مرحله بعد شاخص‌ها با گزینه‌ها مقایسه می‌شوند و به آنها نیز یک عدد به عنوان اهمیت اطلاق می‌شود. برای بررسی اعتبار مقادیر داده داده شده برای این قسمت نیز مجدداً نرخ ناسازگاری بررسی شد که مقدار آن صفر بود، پس تخصیص مقادیر اهمیت درست بودند. در مرحله آخر هم با توجه به مقایسات زوجی انجام شده، بهترین گزینه انتخاب می‌شود.

جدول (۹): میزان اهمیت برای مقایسات زوجی

اهمیت مطلق	اهمیت خیلی زیاد	اهمیت زیاد	اهمیت ضعیف	اهمیت یکسان
۹	۷	۵	۳	۱
مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ مقادیر بینابین هستند.				

با بهره‌گیری از نتایج مثال عددی به منظور اجرای روش *AHP*، روش اسیلون محدودیت به عنوان بهترین روش در بین دو روش حل پیشنهادی انتخاب گردید. شکل (۴) نتایج نهایی حاصل از روش *AHP* را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که روش *AHP* در نرم افزار اکسپرت چویس^۱ نسخه ۱۱ اجرا شده است.

شکل (۴): نتیجه روش *AHP* برای انتخاب بهترین روش حل پیشنهادی

تعیین تعداد بهینه گروه‌های موجودی

با توجه به اینکه بر اساس تکنیک *AHP*، روش اپسیلون محدودیت به عنوان روش برتر انتخاب شد، لذا بوسیله این روش به تعیین تعداد گروه‌های بهینه می‌پردازیم. نتایج حاصل از این قسمت در جدول (۱۰) و شکل (۵) نمایش داده شده است.

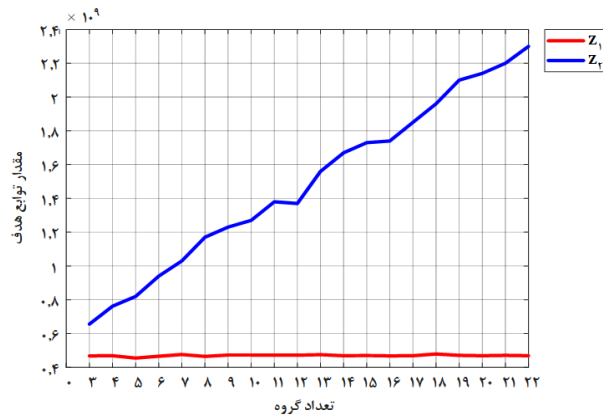
برای تعیین تعداد گروه‌های بهینه برای انبار مرکزی، اثر تغییر در توابع هدف با ایجاد تغییر در گروه‌های موجودی بررسی شده است بدین صورت که تمام پارامترها و مقادیر مدل ثابت در نظر گرفته شده‌اند (مقادیر در جدول (۲) قبلاً نمایش داده شده‌است) و مقادیر $t=50$ ، $s=10$ ، $t=8$ و $t=5$ هستند و فقط تعداد گروه‌های موجودی (j) از ۳ تا ۲۲ گروه و در ۲۰ نرخ تغییر می‌کند. بر اساس این تغییر، نتایج زیر حاصل شده‌است.

با توجه به جدول (۱۰) و شکل (۵)، افزایش در تعداد گروه‌ها منجر به افزایش میزان تابع هدف دوم می‌شود. بدین معنی که هرچه تعداد گروه‌ها بیشتر باشد، سود خالص بخش‌های مختلف نیز افزایش می‌یابد و مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار تابع هدف دوم مربوط به $j=22$ است و این یعنی اینکه اگر تعداد گروه‌های موجود در انبار که بر اساس آنالیز *ABC* گروه‌بندی شده‌اند ۲۲ گروه باشد، بیشترین سود خالص را برای بخش‌ها به همراه دارد. همچنین با توجه به جدول (۱۰) و شکل (۵)، با افزایش تعداد گروه‌ها میزان تابع هدف اول به صورت خیلی ناچیزی افزایش می‌یابد و این بدین معنی است که افزایش تعداد گروه‌ها باعث افزایش جزئی در مقدار تابع هدف اول می‌شود. بیشترین مقدار تابع هدف اول نیز زمانی است که تعداد گروه‌ها ۱۸ باشد.

جدول (۱۰): اثر تعداد گروه‌های موجودی بر روی مقادیر تابع هدف

Z_2	Z_1	تعداد گروه
۵۶۰۱۴۱/۶E۸+	۶۷۶۵۸۲/۴E۸+	۳
۶۱۸۹۰۹/۷E۸+	۶۸۹۶۱۱/۴E۸+	۴
۲۰۱۵۴۹/۸E۸+	۵۴۸۶۵۹/۴E۸+	۵
۴۰۰۷۶۰/۹E۸+	۶۵۷۱۲۰/۴E۸+	۶
۰۲۹۲۶۲/۱E۹+	۷۶۲۱۷۵/۴E۸+	۷

۱۷۱۱۳۸/۱E۹+	۶۵۴۴۸۴/۴E۸+	۸
۲۳۰۵۵۶/۱E۹+	۷۳۴۵۵۴/۴E۸+	۹
۲۷۲۹۹۱/۱E۹+	۷۲۷۴۴۹/۴E۸+	۱۰
۳۷۹۶۹۴/۱E۹+	۷۱۵۳۲۴/۴E۸+	۱۱
۳۶۹۰۳۱/۱E۹+	۷۱۵۸۳۶/۴E۸+	۱۲
۵۵۶۸۶۳/۱E۹+	۷۴۹۴۴۱/۴E۸+	۱۳
۶۶۵۲۰۳/۱E۹+	۶۹۰۱۲۰/۴E۸+	۱۴
۷۳۳۱۶۷/۱E۹+	۷۰۲۴۵۰/۴E۸+	۱۵
۷۳۶۸۹۳/۱E۹+	۶۵۴۸۸۰/۴E۸+	۱۶
۸۵۲۱۱۴/۱E۹+	۶۸۷۷۱۶/۴E۸+	۱۷
۹۶۱۶۸۷/۱E۹+	۷۸۹۰۰۴/۴E۸+	۱۸
۱۰۳۷۲۵/۲E۹+	۷۱۴۲۲۵/۴E۸+	۱۹
۱۳۸۰۹۴/۲E۹+	۶۹۲۳۶۳/۴E۸+	۲۰
۲۰۳۶۲۶/۲E۹+	۷۰۸۷۱۷/۴E۸+	۲۱
۲۹۷۹۸۲/۲E۹+	۶۹۳۶۷۹/۴E۸+	۲۲



شکل (۵): اثر تعداد گروه‌های موجودی بر روی مقادیر توابع هدف

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

امروزه بحث مربوط به مدیریت موجودی‌ها و ایجاد سیستم‌های کنترل موجودی مناسب برای تمامی سازمان‌ها به چالشی بزرگ تبدیل شده‌است و همین امر ضرورت تحقیق در این زمینه را آشکار می‌کند. در این مقاله، ما یک مدل بهینه‌سازی را برای تعیین همزمان گروه‌های موجودی، سطح خدمات مربوط به آنها و اختصاص اقلام به گروه‌ها ایجاد کردیم. این روش با ارائه راه‌حل‌های یکپارچه، خودکار و بهینه‌سازی، رویکرد گروه‌بندی موجودی بر اساس آنالیز *ABC* را بهبود می‌بخشد. مدل این مقاله با سایر مدل‌های بهینه‌سازی موجود با دو ویژگی متمایز، متفاوت است. الف) به جای به حداقل رساندن هزینه‌های موجودی، مدل ما سودآوری یک شرکت را به حداکثر می‌رساند. ب) این مدل، مبادله بین هزینه موجودی و درآمد را بهینه می‌کند و بودجه موجودی را به صورت بهینه به اقلام موجودی اختصاص می‌دهد. این مدل همچنین ممکن است به عنوان یک ابزار منطقی برای کمک به مدیران موجودی باشد که تصمیم بگیرند که کدامیک از اقلام بهتر است در انبار موجود باشند یا برعکس. در تحقیق حاضر به منظور بهبود یک طبقه‌بندی مناسب، یک مدل ریاضی توسعه داده شد. یک زنجیره-تامین سه‌سطحی شامل تامین‌کنندگان، انبار مرکزی و بخش‌های مختلف برای مدل ریاضی طراحی شد. این زنجیره‌تامین دارای دو تابع هدف به منظور بیشینه کردن سود خالص اقلام موجود در انبار مرکزی و همچنین در بخش‌های مختلف بود. محدودیت‌هایی مثل بودجه و ظرفیت برای هر سطح از زنجیره‌تامین در نظر گرفته شد و همچنین کمبود موجودی نیز مدنظر قرار گرفت. به منظور حل مدل، از روش‌های معیار جامع و اپسیلون محدودیت اصلاح شده استفاده شد. جهت ارزیابی روش‌های حل ارائه شده، سه شاخص شامل مقدار تابع هدف اول و دوم و مدت زمان اجرای مدل تعیین و مدل ریاضی در ۱۵ مثال عددی مختلف اجرا شد. برای مقایسه آماری نتایج دو روش حل پیشنهادی، از آزمون *t* استفاده شد. در ادامه به منظور انتخاب روش برتر از تکنیک *AHP* استفاده شد که بر این اساس روش اپسیلون محدودیت به عنوان روش برتر انتخاب شد. در نهایت به منظور تعیین تعداد بهینه گروه‌های موجودی، از روش اپسیلون-

محدودیت استفاده شد که تعداد بهینه گروه‌ها برای انبار مرکزی ۱۸ و برای بخش‌های مختلف ۲۲ بود.

از طریق یک آزمایش جامع محاسباتی، چندین بینش مدیریتی در مورد گروه‌بندی بهینه موجودی و استراتژی کنترل اقلام به دست آمد. الف) هنگامی که هزینه مدیریت در هر گروه کاهش می‌یابد (هزینه مدیریت بالاسری)، بهتر است سطح خدمات اقلام موجودی، با طبقه‌بندی آنها به گروه‌های کوچکتر، تمایز داده شود. ب) مدل پیشنهادی نشان‌دهنده‌ی کاهش هزینه‌های موجودی است و می‌تواند به یک شرکت از طریق افزایش بودجه موجودی آن کمک کند. ج) وقتی بودجه محدود باشد، احتمال بیشتری برای افزایش تعداد گروه‌های طبقه‌بندی موجودی وجود دارد در حالی که وقتی بودجه زیادی در دسترس است، ممکن است طبقه‌بندی اقلام به تعداد گروه‌های کمتر قابل قبول باشد که این همان رویکرد سنتی *ABC* است. این مدل همچنین به مدیران موجودی و عملیاتی کمک می‌کند تا چندمورد را به صورت همزمان بهینه کنند که عبارتند از: الف) تعداد گروه‌های طبقه‌بندی برای اقلام مختلف، ب) تخصیص بهینه هر قلم موجودی به هر گروه، ج) سطح خدمات هدف برای هر گروه و د) تخصیص بهینه بودجه محدود موجودی به هر گروه. این تصمیمات برای به حداکثر رساندن کل سود خالص، با توجه به محدودیت‌های بودجه موجودی گرفته می‌شود. و نهایتاً، با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی برخی پارامترهای مدل پیشنهادی، مدیران موجودی این امکان را خواهند داشت تا تأثیر هزینه‌های موجودی و هزینه‌های مدیریت گروه موجودی را در تصمیم‌گیری بهینه و گروه‌بندی اقلام تعیین کنند. مواردی که می‌تواند به عنوان پیشنهادات آینده برای این مقاله در نظر گرفته شوند، عبارتند از:

➤ در نظر گرفتن برخی از پارامترهای مدل مثل تقاضا و هزینه‌ها به عنوان پارامترهای غیر-قطعی.

➤ پیاده‌سازی مدل ریاضی پیشنهادی در یک مطالعه موردی واقعی و بررسی انعطاف-پذیری آن.

➤ استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری و روش‌های ابتکاری برای حل مدل.

- اضافه کردن سطوح دیگر به زنجیره تامین این مقاله مانند مرکز توزیع، مرکز جمع-آوری، مرکز بازیافت و ...
- در نظر گرفتن محصولات در بسته‌های مختلف در برخی موارد باعث افزایش هزینه نگهداری می‌شود، در حالی که هزینه سفارش‌دهی کاهش می‌یابد، که مدیران موجودی با تجزیه و تحلیل حساسیت دقیق‌تر و تجزیه و تحلیل سناریویی و بر اساس نیازهای مختلف این می‌توانند این مشکل را برطرف نمایند.

منابع

- [۱] اسماعیل زاده، م.، الفت، ل. . (۱۳۹۵)، ارائه سه مدل جدید برای سطح اهمیت اقلام طبقه ABC با هدف کاهش هزینه‌های موجودی، فصلنامه علمی-ترویجی مدیریت زنجیره تامین، سال نوزدهم شماره ۵۵ بهار ۱۳۹۶، صفحات ۸۰-۱۰۰.
- [۲] اسماعیل زاده، م.، حسین پور، ا.، نامدار، م.ر. . (۱۳۹۲)، طبقه‌بندی موجودی با استفاده از بهینه-سازی جمعی راه‌حل‌های چندهدفه، مطالعات مدیریت صنعتی، سال یازدهم شماره ۳۰ پاییز ۱۳۹۲، صفحات ۲۳-۵۶.
- [۳] زرین صدف، م.، دانشور، ا. (۱۳۹۵)، روش کارای یادگیری ترجیحات مبتنی بر مدل $ELECTRE TRI$ به منظور طبقه‌بندی چندمعیاره موجودی، مدیریت صنعتی (دانش مدیریت)، دوره ۸ شماره ۲ تابستان ۱۳۹۵، صفحات ۱۹۱-۲۱۶.
- [۴] صفایی قادیکلانی، ع.، اسماعیل زاده، م. . (۱۳۹۰)، ارائه رهیافتی جدید برای مقایسه نتایج به کارگیری مدل‌های طبقه‌بندی ABC چندمعیاره موجودی (مطالعه موردی: شرکت سایپا)، دوماهنامه علمی-پژوهشی دانشگاه شاهد، سال هجدهم-دوره جدید شماره ۲-۴۷ تیر ۱۳۹۰، صفحات ۲۰۷-۲۲۴.
- [۵] ناظمی، ش.، شمس الدینی، ر. . (۱۳۹۰)، ارائه مدلی برای طبقه‌بندی اقلام مواد و موجودی‌ها با استفاده از روش $ABC-FUZZY$ چشم‌انداز مدیریت صنعتی، شماره ۳ پاییز ۱۳۹۰، صفحات ۸۳-۹۸.
- [۶] Arrow, K. J., T. Harris and J. Marschak (1951). "Optimal inventory policy". *Econometrica: Journal of the Econometric Society*: 250-272.
- [۷] Bérubé, J.-F., M. Gendreau and J.-Y. Potvin (2009). "An exact ϵ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the Traveling Salesman Problem with Profits". *European journal of operational research* 194(1): 39-50.
- [۸] Chakravarty, A. (1981). "Multi-item inventory aggregation into groups". *Journal of the Operational Research Society* 32:(1) 19-26.

[۹] Chen, Y., K. W. Li, D. M. Kilgour and K. W. Hipel (2008) ".(A case-based distance model for multiple criteria ABC analysis ". *Computers & Operations Research* 35(3): 776-796.

[۱۰] Cohen, M. A. and R. Ernst (1988) ".(Multi-Item Classification and Generic Inventory Stock Contr ". *Production and Inventory Management Journal* 29(3): 6.

[۱۱] Chu, C.-W., G.-S. Liang and C.-T. Liao (2008) ".(Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification ". *Computers & Industrial Engineering*. ۸۵(۱-۸۴۱): (۴)۵۵

[۱۲] Ehrgott, M. and X. Gandibleux (2003). *Multiobjective combinatorial optimization—theory, methodology, and applications. Multiple criteria optimization: State of the art annotated bibliographic surveys*, Springer: 369-444.

[۱۳] Erlenkotter, D" (۱۹۸۹). *Note—An Early Classic Misplaced: Ford W. Harris's Economic Order Quantity Model of 1915* ". *Management Science* 35(7): 898-900.

[۱۴] Flores, B. E. and D. C. Whybark (1987) ".(Implementing multiple criteria ABC analysis ". *Journal of Operations Management* 7(1-2): 79-85.

[۱۵] Guvenir, H. A. and E. Erel (1998) ".(Multicriteria inventory classification using a genetic algorithm ". *European journal of operational research* 105(1): 29-37.

[۱۶] Hadi-Vencheh, A. (2010) ".(An improvement to multiple criteria ABC inventory classification ". *European Journal of Operational Research* 201(3): 962-965.

[۱۷] Kaabi, H., K. Jabeur and L. Enneifar (2015) ".(Learning criteria weights with TOPSIS method and continuous VNS for multi-criteria inventory classification ". *Electronic Notes in Discrete Mathematics* 47 : ۲۰۴-۱۹۷

[۱۸] López-Soto, D., Angel-Bello, F., Yacout, S., Alvarez, A. (۲۰۱۷) ". *A multi-start algorithm to design a multi-class classifier for a multi-criteria ABC inventory classification problem* ". *Expert Systems with Applications* 81(Supplement C): 12-21.

[۱۹] Massart, P" (۱۹۹۰) .The tight constant in the Dvoretzky-Kiefer-Wolfowitz inequality ".The annals of Probability: 1269-1283.

[۲۰] Millstein, M. A., L. Yang and H. Li (2014" .(Optimizing ABC inventory grouping decisions ".International Journal of Production Economics 148: 71-80.

[۲۱] Ng, W. L" (۲۰۰۷) .A simple classifier for multiple criteria ABC analysis ".European Journal of Operational Research 177(1): 344-353.

[۲۲] Partovi, F. Y. and J. Burton (1993" .(Using the analytic hierarchy process for ABC analysis ".International Journal of Operations & Production Management 13(9): 29-44.

[۲۳] Partovi, F. Y. and M. Anandarajan (2002" .(Classifying inventory using an artificial neural network approach ".Computers & Industrial Engineering 41(4): 389-404.

[۲۴] Ramanathan, R. (2006" .(ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization ".Computers & Operations Research 33(3): 695-700.

[۲۵] Saaty, T. L. (1991" .(Response to Holder's comments on the analytic hierarchy process ".Journal of the Operational Research Society 42(10): 909-914.

[۲۶] Teunter, R. H., Babai, M. Z & Syntetos, A. A. (2010). ABC classification :service levels and inventory costs. Production and Operations Management. ۳۰۲-۳۴۳, (۳) ۱۹,

[۲۷] Tsai, C.-Y. and S.-W. Yeh (2008" .(A multiple objective particle swarm optimization approach for inventory classification ".International journal of production Economics 114(2): 656-666.

[۲۸] Van Eijs, M., R. M. J. Heuts and J. P. C .Kleijnen (1992 .("Analysis and comparison of two strategies for multi-item inventory systems with joint replenishment costs ".European Journal of Operational Research 59(3): 405-412.

[۲۹] Yu, M.-C. (2011" .(Multi-criteria ABC analysis using artificial-intelligence-based classification techniques ".Expert Systems with Applications 38(4): 3416-3421.

[۳۰] Zhou, P. and L. Fan (2007) ".(A note on multi-criteria ABC inventory classification using weighted linear optimization ".*European journal of operational research* 18:(3) 1488-1491.