

ارائه یک مدل چند هدفه برای مسئله مکان یابی - مسیریابی با در نظر گرفتن حداقل ریسک و حداکثر پوشش تقاضا

علیرضا علی نژاد^{*}، ابوالفضل کاظمی^{**}، مرضیه کریمی^{***}

تاریخ دریافت: ۹۷/۸/۱ - تاریخ پذیرش: ۹۹/۲/۱۶

چکیده

تصمیمات مکان‌یابی، مسیریابی و تخصیص در زنجیره تأمین بی‌تردید یکی از مباحث بسیار مهم این فلسفه مدیریتی محسوب می‌شوند که تاثیر فراوانی بر کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین و رضایت مشتریان دارد. این تحقیق به ارائه یک رویکرد یکپارچه از شبکه‌های توزیع پرداخته است. توابع هدف در مدل ریاضی پیشنهادی شامل حداقل کردن مجموع هزینه‌های مرتبط با وسایل حمل و نقل، هزینه اجاره انبارها و حداقل کردن ریسک سیستم می‌باشد. مدل پیشنهادی دارای پیچیدگی محاسباتی زیادی می‌باشد و حل آن با روش‌های دقیق در زمان معقول امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین یک الگوریتم فرا ابتکاری چندهدفه جدید به نام الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه ارائه شده است. به منظور اثبات اثربخشی و کارایی الگوریتم در حل مدل پیشنهادی، ابتدا با استفاده از روش تاگوچی پارامترهای الگوریتم در بهترین سطوح ممکن تنظیم می‌شوند. سپس مسائل نمونه تصادفی تولید و عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب ارزیابی می‌شود.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی، مسیریابی، مدل برنامه‌ریزی ریاضی، الگوریتم فراابتکاری چندهدفه، روش تاگوچی

^{*} دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، قزوین

^{**} دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، قزوین، (نویسنده مسئول)

abkaazemi@qiau.ac.ir

^{***} دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد

مقدمه

زنجیره‌ی تأمین شبکه‌ای از تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان است که بر اساس جریان اطلاعات و مواد برای تأمین محصولات با کیفیت و ارائه خدمات مناسب به مشتریان نهایی در اقتصادی‌ترین وضع موجود به هم مرتبط شده‌اند. یکی از کاربردی‌ترین مسائل نهفته در زنجیره تأمین برنامه‌ریزی توزیع کالا و خدمات در سطح شهرها می‌باشد. توزیع فیزیکی محصولات یکی از کلیدی‌ترین فعالیت شرکت‌های تولیدی می‌باشد، زیرا به‌طور متوسط بیش از ۲۰٪ قیمت تمام شده محصولات، صرف توزیع فیزیکی آن‌ها می‌شود (سرویستاوا و بنتون^۱، ۱۹۹۰). با توجه به تحقیقات پیشین درباره سیستم‌های سرویس‌دهی، متوجه می‌شویم مکان توزیع‌کننده‌ها (انبارها) و نحوه حرکت در مسیرها به منظور خدمت‌دهی تاثیر مستقیم بر هزینه‌های زنجیره و به ویژه هزینه‌های حمل و نقل کالا دارد. این مکان‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که جابجایی‌های لازم از تأمین‌کننده به انبار و از انبار به مشتریان را حداقل کنند. از طرف دیگر انتخاب مکان‌های مناسب جهت استقرار مراکز توزیع کالا در سطح یک شهر می‌تواند کمک بزرگی به شهروندان جهت دسترسی راحت و سریع به این کالاها باشد.

با توجه به دیدگاه بیان شده درباره سیستم‌های سرویس‌دهی، متوجه می‌شویم مکان انبارها و نحوه حرکت در مسیرها به منظور تحویل کالا، نقش مهمی را در عملکرد سیستم‌های خدمت-رسان بازی می‌کند. بنابراین در این تحقیق مسئله مکان‌یابی - مسیریابی^۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد و تلاش می‌شود تا با توسعه یک الگوریتم فراابتکاری کارا، تصمیمات بهینه را در این زمینه اتخاذ کرد.

مروری بر ادبیات موضوع

مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش با هدف حداقل نمودن هزینه‌های احداث مراکز خدمت‌دهندگان اولین بار در سال ۱۹۷۴ مطرح گردید. متداول‌ترین هدف در مسائل مکان‌یابی -

مسیریابی کمینه‌سازی هزینه کل می‌باشد که این خود شامل هزینه‌های انبار و هزینه‌های حمل و نقل می‌گردد. گیانی و لاپورت^۱ ساختاری را بررسی کردند که در آن وسایل حمل مسیر را از انبار شروع کرده و در بین رئوس (مشتریان) مختلف حرکت کرده، محصولات را به مشتریان تحویل می‌دهد و پس از اتمام موجودی به همان انبار باز می‌گردد (گیانی و لاپورت، ۱۹۹۹). آن و راماکریشنا^۲ کاربرد الگوریتم‌های ژنتیکی را برای حل مسئله کوتاه‌ترین مسیر پیشنهاد کردند. شبیه‌سازی رایانه‌ای توسط آن‌ها نشان داد الگوریتم‌های پیشنهادی از نقطه نظر همگرایی بهتر از دیگر الگوریتم‌های مرسوم عمل می‌کند (آن و راماکریشنا، ۲۰۰۲). تایهسی^۳ و همکارانش به مکان‌یابی انبارها پرداخته و تعداد کامیون‌های در اختیار را بدون محدودیت در نظر گرفته‌اند. بدین منظور مدلی ابتکاری ارائه داده و فقط هزینه‌های عمومی مسئله حمل و نقل در مدل دیده شده است (تایهسی و همکارانش، ۲۰۰۱). باراهونا و جنسن^۴ برای تعیین مکان انبارها و تخصیص مشتریان ارائه نمودند که در آن علاوه بر در نظر گرفتن هزینه‌های نگهداری موجودی در انبارها، محدودیت مربوط به سطح سرویس‌دهی نیز در نظر گرفته شده بود (باراهونا و جنسن، ۱۹۹۸). بارتو^۵ و همکاران از یک روش ابتکاری مبتنی بر دسته‌بندی مشتری‌ها برای حل مسئله مکان‌یابی مسیریابی استفاده کردند. آن‌ها از چند روش سلسله مراتبی و غیر سلسله مراتبی برای دسته‌بندی استفاده کردند (بارتو و همکاران). یو^۶ و همکاران از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ابتکاری برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی استفاده کرده‌اند. آن‌ها برای بهبود عملکرد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید از سه ساختار همسایگی استفاده کردند (یو و همکاران، ۲۰۱۰). یائو^۷ و همکاران با ارائه یک مدل ترکیبی غیرخطی، مسائل مکان‌یابی، تخصیص و موجودی را ترکیب کردند (یائو و همکاران، ۲۰۱۰).

-
1. Ghiani and Laporte
 2. Ahn and Ramakrishna
 3. Tai-Hsi
 4. Barahona and Jensen
 5. Barreto
 6. Yu
 7. Yao

احمدی و آزاد^۱ یک مدل یکپارچه برای طراحی شبکه‌های توزیع در حالت احتمالی ارائه کردند، که تصمیم‌های مکان‌یابی، موجودی و مسیریابی را به‌طور همزمان در نظر می‌گرفت (احمدی و آزاد، ۲۰۱۰). لوپز^۲ و همکاران یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی پیشنهاد داده‌اند. الگوریتم پیشنهادی شامل ساختار استاندارد الگوریتم ژنتیک با استفاده از شیوه جستجوی محلی در فاز جهش می‌باشد (لوپز و همکاران، ۲۰۱۶). تورو^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷، یک مسئله مکان‌یابی - مسیریابی دو هدفه شامل کمینه کردن هزینه‌های عملیاتی و اثرات محیطی ارائه کرده‌اند و با روش محدودیت اسپیلون حل نموده‌اند (تورو و همکاران، ۲۰۱۷). اعتباری و ترابی یک مسئله مکان‌یابی - مسیریابی ظرفیت دار پویا را در نظر گرفته‌اند که در آن تعدادی سایت بالقوه بعنوان دپو و تعدادی مشتری با تقاضا و مکان معین و همچنین تعدادی وسیله نقلیه با ظرفیت معین وجود دارند و تصمیم‌گیری در مورد مکان‌های مجاز تنها در اولین دوره از افق برنامه ریزی صورت می‌گیرد، اما تصمیم‌گیری مسیریابی ممکن است در هر دوره زمانی تغییر کند. در این تحقیق تقاضای مشتریان وابسته به قیمت در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مدل ریاضی ارائه شده روشی ترکیبی (ترکیب الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری)، بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات پیشنهاد شده است (اعتباری و ترابی، ۱۳۹۸). ربانی و همکاران، یک مسئله جدید مسیریابی مکان‌یابی زباله‌های خطرناک صنعتی با تأکید بر برخی جنبه‌های جدید در فرمول بندی آن، از جمله محدودیت در مورد ناسازگاری بین برخی از انواع زباله‌ها و ترکیب تصمیمات مسیریابی در مدل، ارائه داده‌اند. هدف مدل، به حداقل رساندن سه معیار مهم به‌طور همزمان، از جمله هزینه کل، ریسک حمل و نقل کل پسماندهای خطرناک مربوط به قرار گرفتن در معرض جمعیت و ریسک سایت است. برای حل مدل چندهدفه، دو الگوریتم تکاملی چندهدفه‌ی ازدحام ذرات و ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب به کار گرفته شده است (ربانی و همکاران، ۲۰۱۸).

1. Ahmadi and Azad

2. Lopes

3. Toro

درویش و همکاران، یک مسئله مسیریابی یکپارچه که در آن یک تأمین کننده کالا از طریق یک شبکه تأمین دو مرحله ای کالا را به مشتریان خود تحویل می دهد، ارائه داده اند. در طول یک افق برنامه ریزی، ابتدا کالا از یک انبار واحد به مجموعه ای مراکز توزیع ارسال می شود. سپس، از مراکز توزیع، به مشتریان تحویل داده می شود. دو منبع انعطاف پذیری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است: انعطاف پذیری در طراحی شبکه و انعطاف پذیری در زمان تحویل. هدف مدل، به حداقل رساندن هزینه کل متشکل از مجموع هزینه حمل و نقل از انبار به مراکز توزیع، هزینه سفر از مراکز توزیع به مشتریان، هزینه اجاره مراکز توزیع و هزینه جریمه عدم تحویل به موقع می باشد. یک روش دقیق برای حل ارائه شده است که بر اساس تعامل بین دو الگوریتم شاخه و کران است (درویش و همکاران، ۲۰۱۹). داکانسی و همکاران، در پژوهش خود به معرفی مسئله مکان یابی-مسیریابی سبز^۱، ترکیبی از مسئله کلاسیک مکان یابی-مسیریابی^۲ و مسئله آلودگی-مسیریابی^۳ پرداخته اند. هدف مدل، به حداقل رساندن یک تابع هزینه شامل هزینه های بهره برداری انبارها و همچنین هزینه های سوخت و انتشار کربن دی-اکسید است. میزان مصرف سوخت و تولید گازهای گلخانه ای با استفاده از یک مدل انتشار معین جامع، اندازه گیری می شود. دو رویکرد حل؛ یک الگوریتم مبتنی بر برنامه ریزی عدد صحیح و یک الگوریتم جستجوی محلی تکراری برای حل مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده است (داکانسی و همکاران، ۲۰۱۹). شیفر و همکاران به بررسی ادبیات مسائل مسیریابی وسایل نقلیه و مسائل مسیریابی مکانیابی با توقف های میانی پرداخته اند. انتشارات بر اساس دو دیدگاه کاربردی و روش شناختی به گروه های مختلف طبقه بندی شده اند. علاوه بر این، مقالات با توجه به الگوریتم ها و نمونه های معیار به کار برده شده در آن، تجزیه و تحلیل شده اند (شیفر و همکاران، ۲۰۱۹). المحانا و همکاران، در مقاله خود به مساله مسیریابی-مکانیابی با فاصله محدود^۴ پرداخته اند، که یک توسعه از مسئله مسیریابی-مکانیابی

-
1. GLRP
 2. LRP
 3. PRP
 4. LRPCD

هنگام استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی^۱ است. یک روش ابتکاری سریع چند مرحله‌ای و یک روش فراابتکاری برای حل مدل پیشنهاد شده است (المحانا و همکاران، ۲۰۲۰). عزیزی و هو، یک مدل تصمیم‌گیری که مکان‌یابی مراکز توزیع، مسیریابی وسیله نقلیه و حمل مستقیم را به طور همزمان در نظر می‌گیرد، ارائه داده‌اند. هدف مدل، حداقل‌سازی کل هزینه‌ها می‌باشد. دو نوع حالت تحویل در نظر گرفته شده است. در نوع اول، هر وسیله نقلیه یک نوع کالا را بار می‌کند و در نوع دوم، هر وسیله نقلیه مجاز است انواع مختلفی از محصولات را بارگیری کند. یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط یکپارچه برای هر نوع تحویل فرموله شده است. برای حل مدل، سه روش: حالت قطعی، حالت فرصت طلبانه و الگوریتم تجزیه‌ی بندرز مورد بررسی قرار گرفته است (عزیزی و هو، ۲۰۲۰).

بیان مسئله

در این تحقیق یک سیستم زنجیره تأمین سه سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. سطح اول شامل چندین کارخانه یا تأمین‌کننده که هر یک چندین محصول مختلف عرضه می‌نمایند. سطح دوم شامل I انبار بالقوه بوده که دارای ظرفیت مشخص‌اند و صرفاً به منظور انبارش موقت محصولات در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین هزینه انبارداری در این انبارها لحاظ نگردیده است. در هر یک از انبارهای فعال V وسیله حمل وجود دارد که کالاها را به مشتریان حمل می‌کنند. هدف مسئله مورد بررسی حداقل کردن پوشش مشتریان و در عین حال حداقل کردن هزینه‌های تحمیلی به زنجیره از قبیل هزینه احداث انبارها، هزینه‌های حمل از تأمین‌کننده به انبارها و از انبار به مشتری را می‌باشد. به منظور دستیابی به اهداف فوق، می‌بایست در مورد محل ایجاد انبارها و مسیر حرکت وسایل حمل تصمیم‌گیری شود.

فرضیات در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی به قرار زیر است:

- مکان استقرار انبارها شامل تعداد مشخصی از نقاط از پیش تعیین شده و با هزینه استقرار ثابت می‌باشد.

- تقاضای هر یک از مشتریان قطعی و از پیش تعیین شده است.
- فاصله بین تأمین کننده، انبار و مشتریان ثابت و مشخص است.
- ظرفیت وسایل حمل قطعی و به ازای محصولات مختلف متفاوت است.

مجموعه اندیس‌ها

| | |
|--|-------|
| مجموعه انبارهای بالقوه ($i=1, \dots, m$) | I |
| مجموعه مشتریان ($j=1, \dots, n$) | J |
| مجموعه وسایل حمل و نقل ($v=1, \dots, p$) | V |
| مجموعه محصولات ($p=1, \dots, q$) | P |
| مجموعه سطوح ممکن برای ایجاد انبار در گره | N_i |

پارامترهای مسئله

| | |
|--|--------------|
| ظرفیت انبار i که در سطح n ساخته شده است برای محصول p | CAP_i^{np} |
| ظرفیت وسیله v برای محصول p | Q_v^p |
| تقاضای مشتری j از محصول p | d_j^p |
| هزینه ساختن یک انبار در سطح n در گره i . | $COST_i^n$ |
| بودجه در دسترس برای ایجاد انبارها | B |
| میزان تولید محصول p | $prod^p$ |
| فاصله بین گره i و گره j | $d_{i,j}$ |
| فاصله بین گره i و محل تولید محصول p | $d_{i,p}$ |
| هزینه عملیاتی وسیله v به ازای هر واحد | c_v |

متغیرهای تصمیم

در این قسمت، چهار گروه متغیر صفر و یک معرفی می‌گردند که عبارتند از:

$X_{(i,j,v)}^p$: اگر گره i قبل از گره j در مسیر وسیله v حامل محصول p قرار داشته باشد، مقدار 1 و در غیر این صورت برابر صفر است.

Y_i^n : اگر در مکان گره i یک انبار با سطح ظرفیت n ایجاد شود، مقدار 1 و در غیر این صورت برابر صفر است.

$Z_{i,j}^p$: اگر مشتری j محصول p خود را از انبار i دریافت کند، مقدار 1 و در غیر این صورت برابر صفر است.

$H_{i,v}^p$: اگر محصول p توسط وسیله v به انبار i منتقل شود کند، مقدار 1 و در غیر این صورت برابر صفر است.

بر اساس تعاریف انجام شده، مدل پیشنهادی به صورت زیر به دست می‌آید:

توابع هدف و محدودیت‌ها

$$\min OF_1 = \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} H_{i,v}^p \times c_v \times d_{i,p} + \sum_{i \in (I \cup J)} \sum_{j \in (I \cup J)} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} X_{i,j,v}^p \times c_v \times d \quad (1)$$

$$\min OF_2 = \sum_{n \in N_i} \sum_{i \in I} Y_i^n \text{COST}_i^n \quad (2)$$

$$\min OF_3 = 1 - \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} Z_{i,j}^p \times d_j^p}{\sum_{j \in J} \sum_{p \in P} d_j^p} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in (I \cup J)} \sum_{v \in V} X_{i,j,v}^p \leq 1 \quad \forall j \in J, p \in P \quad (4)$$

$$\sum_{i \in (I \cup J)} X_{i,j,v}^p - \sum_{i \in (I \cup J)} X_{j,i,v}^p = 0 \quad j \in I \cup J, v \in V, p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in (I \cup J)} X_{i,j,v}^p \leq 1 \quad \forall v \in V, p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{v \in V} H_{i,v}^p \times Q_v^p \leq CAP_i^{np} \times Y_i^n \quad \forall i \in I, p \in P, n \in N_i \quad (7)$$

$$\sum_{i \in (I \cup J)} \sum_{j \in J} X_{i,j,v}^p \times d_j^p \leq Q_v^p \quad \forall v \in V, p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} Z_{i,j}^p \times d_j^p \leq \sum_{v \in V} H_{i,v}^p \times Q_v^p \quad \forall i \in I, p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{u \in (I \cup J)} X_{i,u,v}^p + \sum_{u \in (I \cup J)} X_{u,j,v}^p - Z_{i,j}^p \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, v \in V \quad (10)$$

$$\sum_{n \in N_i} Y_i^n \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$\sum_{n \in N_i} \sum_{i \in I} Y_i^n COST_i^n \leq B \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{v \in V} H_{i,v}^p \times Q_v^p \leq prod^p \quad \forall i \in I, p \in P \quad (13)$$

$$M_{i,v}^p - M_{j,v}^p + NX_{i,j,v}^p \leq N - 1 \quad \forall i, j \in J, p \in P, v \in V \quad (14)$$

$$X_{i,j,v}^p \in \{0,1\} \quad \forall i \in (I \cup J), j \in (I \cup J) \quad (15)$$

$$Y_i^n \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, n \in N_i \quad (16)$$

$$Z_{i,j}^p \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P \quad (17)$$

$$H_{i,v}^p \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, v \in V, p \in P \quad (18)$$

$$M_{i,v}^p \geq 0 \quad \forall i \in J, v \in V, p \in P \quad (19)$$

تابع هدف اول (۱) شامل دو بخش است. قسمت اول سعی در حداقل نمودن هزینه‌های حمل از تأمین کننده به انبارها دارد. قسمت دوم هزینه‌های حمل از انبار به مشتری را حداقل می کند. تابع هدف دوم (۲) سعی در حداقل نمودن کل هزینه احداث انبارها را دارد. تابع هدف سوم درصد مقدار تقاضای پاسخ داده نشده را حداقل می کند و یا کل پوشش جمعیتی را حداکثر می کند. به تابع هدف سوم می توان به عنوان ریسک سیستم نیز نگریست. مجموعه محدودیت-

های (۴) تضمین می‌کند که هر مشتری به ازای هر محصول حداکثر یک بار سرویس داده شود. مجموعه محدودیت‌های (۵) تضمین می‌کند که اگر یک وسیله وارد یک گره شود، حتماً از آن خارج شود. مجموعه محدودیت‌های (۶) تضمین می‌کند که یک وسیله حرکت خود را فقط از یک انبار آغاز کند. با توجه به محدودیت (۵) که تعادل را در ورود و خروج به گره‌ها برقرار می‌کند و با در نظر گرفتن محدودیت (۶)، می‌توان نتیجه گرفت که هر وسیله مسیر خود را از انبار آغاز می‌کند و در انبار به پایان می‌رساند. مجموعه محدودیت‌های (۷) تضمین می‌کند که میزان ورودی به هر انبار که شامل کلیه بارهای وسایل حمل و نقل به آن انبار است، از ظرفیت انبار بیشتر نباشد. مجموعه محدودیت‌های (۸) تضمین می‌کند که میزان ورودی از هر محصول به هر وسیله نقلیه باید کمتر یا برابر ظرفیت آن وسیله نقلیه باشد. مجموعه محدودیت‌های (۹) یک محدودیت کنترلی است که میزان ورود هر محصول به انبار را با میزان خروج آن از انبار کنترل می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۱۰) ارتباط بین تخصیص و مسیریابی را در مدل برقرار می‌کند: مشتری J به انبار i تخصیص پیدا می‌کند فقط اگر وسیله v که از گره مربوط به مشتری J عبور می‌کند سفر خود را از انبار i آغاز کرده باشد. مجموعه محدودیت‌های (۱۱) تضمین می‌کند که هر انبار را می‌توان فقط در یک سطح ظرفیت ایجاد کرد. مجموعه محدودیت‌های (۱۲) بودجه کل را کنترل می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۱۳) تضمین می‌کند که محصول حمل شده نوع p به انبارها از میزان تولید آن بیشتر نشود. مجموعه محدودیت‌های (۱۴) از ایجاد زیرتور در مسیر وسیله v که محصول p را حمل می‌کند جلوگیری می‌کند. مجموعه محدودیت‌های (۱۵) تا (۱۹) مقادیر متغیرها را کنترل می‌کند. از آنجا که هر یک از مسائل مکان‌یابی و مسیریابی خود جزء مسائل بسیار پیچیده^۱ می‌باشند (اُون و داسکین^۲، ۱۹۹۸). مسئله مکان‌یابی - مسیریابی نیز یک مسئله NP-Hard محسوب می‌گردد، بنابراین برای حل این مسائل می‌بایست از الگوریتم‌های فراابتکاری بهره برد.

1. NP-Hard

2. Owen and Daskin

روش حل

در چهار دهه گذشته الگوریتم‌های زیادی برای حل کردن مسائل بهینه‌سازی مهندسی ارائه شده‌اند که بیشتر آن‌ها بر اساس روش‌های برنامه‌ریزی عددی خطی و غیرخطی هستند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی در یافتن جواب بهینه سراسری در مدل‌های ساده و ایده‌آل مفیدند اما در مواجهه با مسائل بهینه‌سازی واقعی و پیچیده محدودیت‌هایی داشته و کارآیی لازم را ندارند. مشکلات محاسباتی موجود در مسائل بهینه‌سازی مهندسی، محققین را وادار به استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر شبیه‌سازی جهت حل مسائل بهینه‌سازی نمود. فاکتور کلی الگوریتم‌های فرا ابتکاری ترکیب قواعد و احتمالات جهت پیروی از پدیده‌های طبیعی است. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی مورچگان، الگوریتم زنبور عسل، الگوریتم تکامل تصادفی جوامع و الگوریتم جستجوی ممنوعه اشاره کرد. اخیراً الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی هارمونی^۱، توسط گیم^۲ و همکاران (۲۰۰۱) ارائه شده است که برای حل مسائل بهینه‌سازی از پدیده موسیقی الهام گرفته شده است. در فرآیند نواختن موسیقی، یک حالت خارق‌العاده از هارمونی جستجو می‌شود که بر اساس استانداردهای زیباشناسی برآورد می‌گردد، همین‌طور در فرآیند بهینه‌سازی نیز جواب بهینه سراسری که توسط تابع هدف ارزیابی می‌شود مورد جستجو قرار می‌گیرد. این عمده تشابه بین پدیده موسیقی و بهینه‌سازی در الگوریتم جستجوی هارمونی است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۸).

در این مقاله جهت حل مدل پیشنهادی به ارائه الگوریتم چند هدفه مبتنی بر پارتو به نام الگوریتم جستجوی هارمونی چندهدفه، می‌پردازیم و در نهایت جهت اعتبارسنجی روش حل، دو الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب‌ها^۳ و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب‌ها^۴ نیز ارائه می‌گردند و نتایج حاصل از این سه الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

-
1. Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm
 2. Geem
 3. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
 4. Non-dominated Ranking Genetic Algorithm (NRGA)

الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هارمونی یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر عملکرد سازهای موسیقی است که اولین بار توسط گیم^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۰۱ معرفی شد. این الگوریتم با مفهومی ساده و تعداد پارامترهای کم، بر مبنای علم آمار و ریاضیات است (گیم و کیم^۱، ۲۰۰۱). این الگوریتم از آلات موسیقی الهام گرفته و از بداهه‌سرایی سرایندگان تقلید می‌نماید. تابع هدف HS تخمین و اندازه‌گیری هارمونی و اثری است که آن موسیقی در فرد می‌گذارد تا حالت مناسبی از هارمونی در شخص ایجاد شود. هنگامی که یک سراینده یک آلت موسیقی را می‌نوازد با سه حالت روبرو است: (۱) نواختن بر اساس حافظه اش؛ (۲) نواختن بر اساس تنظیم کوک و (۳) نواختن تصادفی. این سه حالت در واقع سه عملگر کیفی مدنظر در HS می‌باشد که به ترتیب عملگر حافظه هارمونی، تنظیم کوک و نواختن تصادفی است. قدم‌های اصلی پیاده‌سازی HS در زیر بخش‌های ذیل ارائه می‌شود (لی و گیم^۲، ۲۰۰۴).

بردار هارمونی و فرآیند رمزگشایی

بردار هارمونی همان نحوه نمایش جواب می‌باشد که از جمله تأثیرگذارترین بخش‌ها برای افزایش کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیباتی است. موجه بودن جواب‌ها منجر می‌شود تا فرایند بهینه‌سازی در نواحی قابل قبول مسئله به جستجوی جواب بهینه پردازند. در این تحقیق به منظور نمایش جواب‌های موجه ابتدا یک ساختار p بعدی معرفی می‌شود که p نشان دهنده تعداد محصولات است. هر یک از ابعاد p از یک ماتریس با تعداد سطر و ستون‌های متغیر تشکیل شده است. ستون اول نشان دهنده وسایل حمل برای انتقال محصولات به انبار و ستون دوم نشان دهنده وسایل حمل برای انتقال محصولات از انبار به مشتریان است. ستون سوم انبار را مشخص می‌کند و ستون‌های چهارم تا آخر نشان دهنده مشتریان است. ساختار جواب پیشنهادی بر اساس گام‌های زیر تشکیل می‌شود.

1. Geem and Kim

2. Lee and Geem

گام اول: محصول اول را در نظر بگیرید.

گام دوم: مشتریانی که قرار است محصول یک را دریافت کنند به شکل تصادفی انتخاب می شوند.

گام سوم: تعدادی نقطه شکست در میان مشتریان ایجاد شده و مشتریان به تعداد گروه خاصی تقسیم می شوند.

گام چهارم: به هر یک از گروه‌های تشکیل شده یک انبار و یک وسیله تخصیص داده می شود تا از آن انبار محصول یک را دریافت کنند. به این ترتیب این محدودیت که هر مشتری محصول خود را حداکثر از یک انبار دریافت کند، رعایت می شود. همچنین با توجه به اینکه وسایل حمل انتخابی در هر مرحله، از لیست وسایل موجود حذف می شوند در نتیجه محدودیت انتخاب یک وسیله برای حمل هر محصول رعایت می شود.

گام پنجم: به هر انبار تعدادی وسیله تخصیص داده می شود تا محصول یک را به آن انبار حمل کنند. گام ششم: تمامی مراحل بالا را برای محصول دوم تکرار می کنیم.

گام هفتم: مجموع محصولاتی که وارد هر یک از انبارها می شود محاسبه شده و سطح ظرفیتی انبار تعیین می شود. اگر محصولات ورودی به حدی زیاد بود که حتی از بالاترین سطح ظرفیتی انبار هم فراتر می رفت و یا بودجه لازم برای ایجاد انبار در آن سطح ظرفیتی وجود نداشت، تا جای ممکن انبار با ظرفیت بالا ایجاد می کنیم و متناسب با میزان تخلف از ظرفیت انبار، جواب جریمه می شود.

شکل (۱) نشان دهنده نحوه نمایش جواب (بردار هارمونی) برای یک زنجیره تأمین است که در آن ۲ محصول، ۵ انبار بالقوه، ۲۰ وسیله حمل بالقوه و ۱۰ مشتری وجود دارد. این بردار هارمونی نشان می دهد که مشتریان ۳، ۱، ۵، ۲، ۷، ۸، ۱، ۳ و ۹ محصول یک را دریافت کرده اند. به این ترتیب که ابتدا محصول ۱ توسط وسایل ۵ و ۸ به انبار ۳ آورده شده است و توسط وسیله ۱۲ از انبار ۳ به ترتیب به مشتریان ۳، ۱، ۵، ۸ و ۲ برده شده است. همچنین محصول ۱ توسط وسایل ۱۴ و ۱۹ به انبار ۵ آورده شده است و توسط وسیله ۱۷ از انبار ۵ به ترتیب به مشتریان ۷ و ۹ برده شده است. و به همین ترتیب برای محصول دوم. ساختار طراحی شده تمامی

متغیرهای تصمیم را در بر دارد. مثلاً ژن‌های مرتبط با بعد اول نشان می‌دهد که برای محصول اول مشتریان ۳، ۱، ۸، ۵ و ۲ به انبار ۳ تخصیص داده شده‌اند که این همان متغیر $Z_{i,j}^p$ و Y_i^n است. همچنین محصول اول از انبار توسط وسیله ۱۲ حمل می‌شود و مسیر عبور آن به ترتیب از انبار ۳ به مشتری ۳، از مشتری ۳ به مشتری ۱، از مشتری ۱ به مشتری ۸، از مشتری ۸ به مشتری ۵، از مشتری ۵ به مشتری ۲، در نهایت از مشتری ۲ به انبار ۳ است که این روند نشان دهنده متغیر تصمیم $X_{i,j,v}^p$ است. متغیر تصمیم $H_{i,v}^p$ نیز در ستون اول قرار دارد به این مفهوم که محصول ۱ توسط وسایل ۵ و ۸ به انبار ۳ آورده می‌شوند.

| | |
|-------------------------|-------------------------|
| بعد اول (p=1) | بعد دوم (p=2) |
| الگوی جابجایی محصول اول | الگوی جابجایی محصول دوم |

| حمل کننده | انبار | مشتری | | | | | |
|-----------|-------|-------|---|---|---|---|---|
| [۵،۸] | ۱۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۸ | ۵ | ۲ |
| [۱۴،۱۹] | ۱۷ | ۵ | ۷ | ۹ | | | |

| حمل کننده | انبار | مشتری | | | |
|-----------|-------|-------|---|---|---|
| [۲،۴،۵] | ۱۲ | ۲ | ۵ | ۲ | ۴ |

شکل (۱): نحوه نمایش جواب (بردار هارمونی)

فرآیند بداهه‌سرایایی

به منظور اجرای فرآیند بداهه‌سرایایی در تکرارهای مختلف الگوریتم، یک عدد تصادفی تولید شده و سپس یک یا دو عملگر HS جهت اجرای فرآیند بداهه‌سرایایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تشریح عملگرهای HS در سه بخش زیر تشریح شده و روابط (۲۰) و (۲۱) و (۲۲) احتمال استفاده شدن هر یک از عملگرها را نشان می‌دهد.

$$P_{HMCR} = HMCR \quad (20)$$

$$P_{pa} = HMCR * r_{pa} \quad (21)$$

$$P_{rand} = 1 - HMCR \quad (22)$$

نرخ مراجعه به HM

این عملگر تضمین می‌کند که بهترین هارمونی‌ها در طی فرآیند بهینه‌سازی از حافظه پاک نخواهند شد. این عملگر با نرخی به نام نرخ ملاحظه حافظه هارمونی کنترل می‌شود. احتمال بهره‌جستن از این عملگر در رابطه (۲۰) نشان داده شده است. مقادیر کوچک این نرخ باعث کندی همگرایی الگوریتم خواهد شد. از طرفی دیگر، مقادیر بالای این نرخ باعث می‌شود که تنه‌ها هارمونی‌های HM انتخاب شده و مورد استفاده قرار گیرند و لذا الگوریتم در بهینه‌های محلی مستقر خواهد شد.

عملگر تنظیم کوک

در دنیای موسیقی، تنظیم کوک به معنای تغییر ساختار فرکانس‌ها می‌باشد که معادل تولید جواب‌های همسایه در فرآیند بهینه‌سازی است. این عملگر از نرخی به نام نرخ تنظیم کوک بهره‌جسته تا تنظیمات را کنترل نماید. مقادیر بالای عملگر تنظیم کوک، تنوع‌گرایی را افزایش خواهد داد. بدین منظور گیم و همکاران پیشنهاد دادند که نرخ r_{pa} در بازه (۰/۵-۰/۱) تنظیم شود. همان‌طور که در بالا اشاره شد احتمال بهره‌جستن از این عملگر در رابطه (۲۱) نشان داده شده است. در این تحقیق از دو نوع عملگر تنظیم کوک استفاده شده است. برای انجام عملگر تنظیم کوک نوع یک مراحل زیر را دنبال می‌کنیم:

- یکی از جواب‌های موجود در جمعیت انتخاب می‌شود.
- جواب مورد نظر تحت عملگر تنظیم کوک نوع یک قرار می‌گیرد به این صورت که یک انبار به تصادف انتخاب شده و مسیر حرکت وسایل حمل و نقل از آن انبار تا مشتریان تغییر می‌کند.

عملگر تنظیم کوک نوع دو بدین صورت است که:

- یکی از جواب‌های موجود در جمعیت انتخاب می‌شود.

- جواب مورد نظر به این صورت تحت عملگر تنظیم کوک نوع دو قرار می‌گیرد که بیت‌های مربوط به یک محصول خاص از جواب انتخاب می‌شوند. و در تمامی سطرها به شکل معکوس چیده می‌شوند.

عملگر تصادفی سرایی

همانطور که از اسم این عملگر مشخص است، جواب‌هایی را به صورت تصادفی تولید کرده و وارد جمعیت می‌کند. احتمال تصادفی سرایی نیز از رابطه (۲۲) قابل محاسبه است.

معیار توقف الگوریتم

آخرین قدم در الگوریتم‌های ژنتیک بررسی شرایط توقف می‌باشد. در این راستا شیوه‌ی استاندارد برای شرایط توقف الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه وجود ندارد. به همین دلیل، معیار تعداد تکرار را برای شرط خاتمه در نظر می‌گیریم و تعداد تکرار بهینه برای الگوریتم را با استفاده از تکنیک‌های طراحی و تحلیل آزمایش‌ها به دست می‌آوریم.

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب‌ها

الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب یکی از کارآمدترین و مشهورترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد که توسط دب^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۰ ارائه شد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک هدفه، حل بهینه را با توجه به یک هدف می‌یابند و این در حالی است که در مسائل چند هدفه یک حل بهینه مجزا را نمی‌توان یافت. پس طبیعی است که با یک مجموعه‌ای از حل‌ها به نام حل‌های مغلوب نشده موثر سروکار داشته باشیم. از بین این مجموعه حل‌های متناهی حل مناسب جواب‌هایی خواهد بود که عملکرد قابل قبولی را نسبت به همه اهداف داشته باشد. برای انجام مقایسات مناسب در بهینه‌سازی چند هدفه از مفهوم غلبه استفاده می‌کنیم. مفهوم غلبه به این صورت است که فرض کنید F کل فضای موجه مسئله

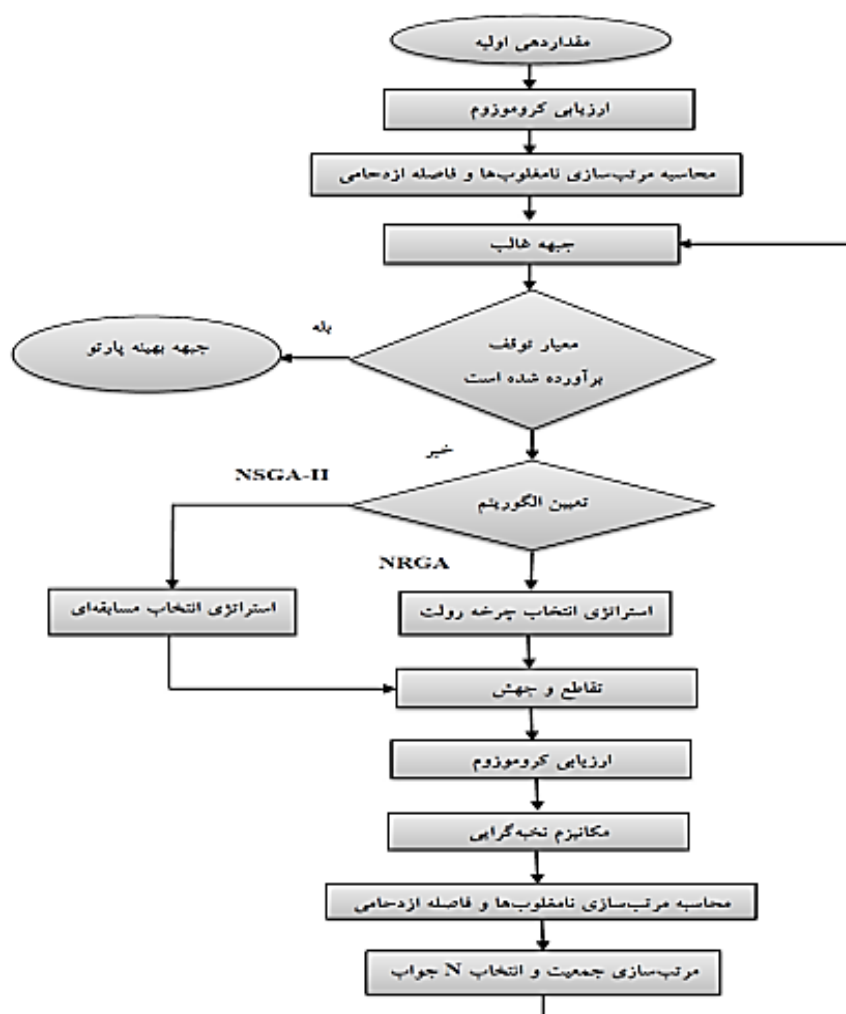
باشد و $x_1, x_2 \in F$ دو جواب از این مسئله باشد، می‌گوییم x_1 بر x_2 غالب است (یا x_2 مغلوب x_1 است) اگر و فقط x_1 نسبت به x_2 در هیچ کدام از اهداف بدتر نباشد ($f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$) و x_1 نسبت به x_2 حداقل در یکی از اهداف اکیداً بهتر باشد ($f_i(x_1) < f_i(x_2)$) (دب، ۲۰۰۰). بدین منظور با توجه به این تعریف دو اپراتور به منظور رتبه‌بندی جواب‌ها به الگوریتم ژنتیک اضافه شده و در ادبیات به الگوریتم NSGA-II شهرت یافته است. آن دو اپراتور مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها^۱ و فاصله ازدحامی^۲ می‌باشند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۴).

الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب‌ها

در سال ۲۰۰۸ یک الگوریتم تکاملی چند هدفه جدید مبتنی بر جمعیت با نام الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب‌ها به طور موفقیت آمیزی توسط عمرالجدان^۳ و همکارانش برای بهینه‌سازی غیر محدب، غیرخطی و گسسته توسعه داده شده است (عمرالجدان و همکاران، ۲۰۰۸). براساس رویکردهای موجود در مسائل قبلی، آن‌ها رویکرد جدیدی را با ترکیب الگوریتم انتخاب چرخه‌رولت مبتنی بر رتبه‌بندی و الگوریتم رتبه‌بندی جمعیت براساس پارتو توسعه دادند که الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب‌ها نام‌گذاری شد. تفاوت الگوریتم NPGA با INSGA-I در دو بخش استراتژی انتخاب و بخش مرتب کردن جمعیت و انتخاب برای نسل بعد می‌باشد. در استراتژی انتخاب از عملگر چرخه رولت مبتنی بر رتبه بندی^۴ به جای استفاده از عملگر مسابقه‌ای ازدحام استفاده می‌کنیم (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۲). این عملگر به گونه‌ای طراحی می‌شود که اعضای بهتر (با برازش بهتر)، احتمال

-
1. Fast non-dominated sort (FNDS)
 2. Crowding Distance (CD)
 3. Al Jadaan
 4. Ranked based roulette wheel selection (RRWS)

انتخاب بیشتری برای تولید مثل و تشکیل نسل بعدی پیدا می‌کنند. در اینجا هر عضو جمعیت دارای دو مشخصه رتبه مرز غیر مغلوبی که در آن قرار دارد و رتبه خودش درون مرز بر اساس فاصله ازدحامی می‌باشد. بنابراین برای انتخاب یک جواب، ابتدا باید یک مرز غیرمغلوب انتخاب شود سپس درون آن مرز یک جواب انتخاب شود (عمرالجدان و همکاران، ۲۰۰۸). در شکل (۲) روند پیاده‌سازی هر دو الگوریتم INSGA-I و NPGA را نشان داده‌ایم.



شکل (۲): فلوجارت الگوریتم‌های NSGA-II و NPGA (کریمی و همکاران، ۱۳۹۴)

آزمایشات محاسباتی

هدف از انجام آزمایشات محاسباتی، ارزیابی کارایی روش حل پیشنهادی است. بدین منظور ابتدا چگونگی تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی توضیح داده می‌شود، سپس معیارهای مقایسه جهت ارزیابی الگوریتم‌ها ارائه شده و در نهایت نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. کلیه الگوریتم‌های مطرح در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Matlab R2010a برنامه‌نویسی شده و بر روی یک رایانه شخصی با چهار گیگابایت RAM و پردازشگر Core i5 (2.2 GHz) اجرا شده است.

تنظیم پارامتر با روش تاگوچی

هدف از طراحی آزمایش‌های تاگوچی، یافتن ترکیبی از سطوح عوامل کنترلی است، به گونه‌ای که برای متغیر پاسخ تابع هدف حداکثر شود و همچنین انحراف معیار برای متغیر پاسخ حداقل شود. موضوع فوق تحت عنوان بهینه کردن ترکیب سطوح عوامل کنترل شناخته می‌شود. برای رسیدن به هدف فوق، متغیر پاسخ به معیار عملکرد ارائه شده توسط تاگوچی یعنی نسبت نوفه به نشانه تبدیل می‌شود. نسبت S/N باید تا حد امکان بزرگتر باشد. با توجه به اینکه متغیر پاسخ در نظر گرفته شده، تعداد جواب‌های پارتو است فرمول مرتبط با آن برای حالت بزرگتر-بهرتر انتخاب می‌شود. با توجه به این مطالب نسبت S/N برای متغیر فوق به صورت زیر خواهد بود:

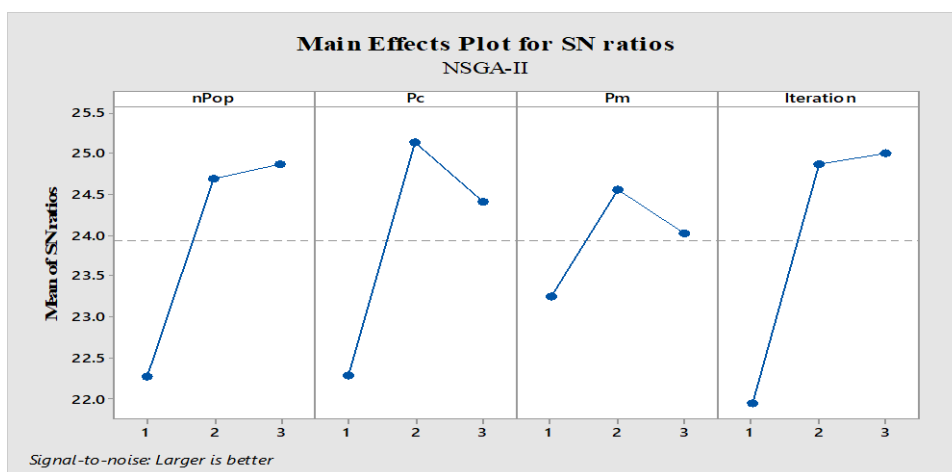
$$\left(\frac{S}{N}\right) = -10 \log \log \left(\frac{1}{n}\right) \sum_i \left(\frac{1}{y_i^2}\right) \quad (23)$$

که y_i و n به ترتیب معرف تعداد آزمایش‌ها و مقدار پاسخ مورد نظر فرآیند در آزمایش i ام می‌باشند (تاگوچی^۱، ۱۹۸۶). جدول ۱ بیانگر دامنه جستجوی سطوح پارامترهای ورودی سه الگوریتم می‌باشد.

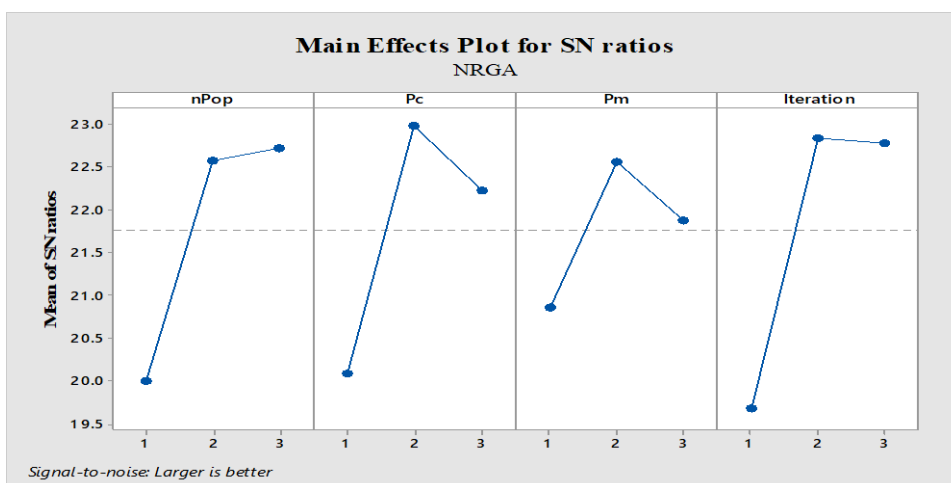
جدول ۱: عوامل قابل کنترل و سطوح آنها

| الگوریتم‌ها | پارامترها | دامنه | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ |
|----------------|------------------|-----------|----------|----------|----------|
| NSGA-II | $nPop$ | ۲۰-۱۵۰ | ۲۰ | ۷۰ | ۱۵۰ |
| | P_c | ۰/۷-۰/۹۸ | ۰/۷ | ۰/۸ | ۰/۹۸ |
| | P_m | ۰/۱-۰/۲ | ۰/۱ | ۰/۱۵ | ۰/۲ |
| | <i>Iteration</i> | ۳۰۰-۶۰۰ | ۳۰۰ | ۴۰۰ | ۶۰۰ |
| NRGA | $nPop$ | ۱۰۰-۲۰۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۲۰۰ |
| | P_c | ۰/۶-۰/۸ | ۰/۶ | ۰/۷ | ۰/۸ |
| | P_m | ۰/۱-۰/۴ | ۰/۱ | ۰/۲ | ۰/۳ |
| | <i>Iteration</i> | ۴۰۰-۷۰۰ | ۳۰۰ | ۵۰۰ | ۷۰۰ |
| MOHS | $nPop$ | ۴۰-۱۵۰ | ۴۰ | ۸۰ | ۱۵۰ |
| | $Phmcr$ | ۰/۷۵-۰/۹۵ | ۰/۷۵ | ۰/۸۵ | ۰/۹۵ |
| | Ppa | ۰/۴-۰/۲ | ۰/۲ | ۰/۳ | ۰/۴ |
| | <i>Outloop</i> | ۴۰۰-۲۰۰ | ۲۰۰ | ۲۵۰ | ۳۰۰ |
| | <i>In. loop</i> | ۵۰-۱۵۰ | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ |

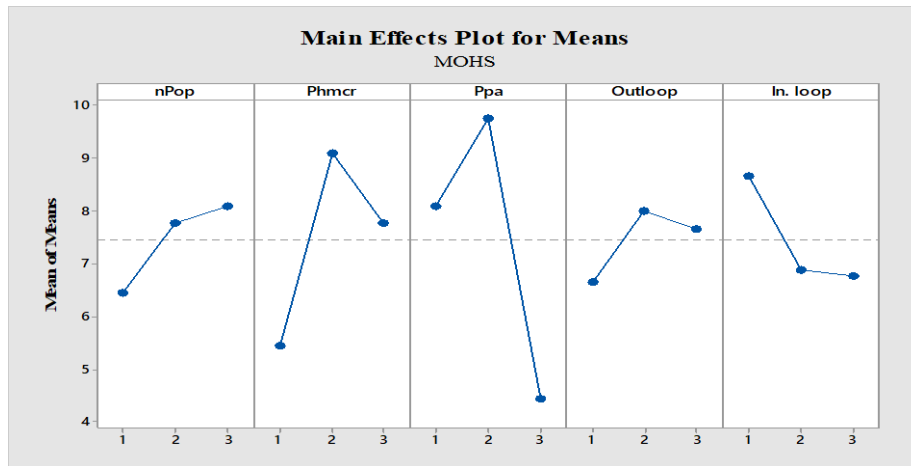
هر یک از آزمایش‌های از پیش طراحی شده اجرا شده و مقدار تابع هدف به نسبت S/N تبدیل می‌شود. شکل‌های (۳) و (۴) و (۵) چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N را در سطوح مختلف الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. سطوحی که در آن شاخص S/N به بیشینه خود رسیده است می‌توانند به عنوان سطوح بهینه انتخاب شوند.



شکل (۳): چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N را در سطوح مختلف الگوریتم NSGA-II



شکل (۴): چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N را در سطوح مختلف الگوریتم NRGA



شکل (۵): چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N را در سطوح مختلف الگوریتم MOHS

شاخص های مقایسه

به طور کلی برخلاف بهینه سازی تک هدفه، دو معیار اصلی شامل حفظ تنوع در بین جواب های و همگرایی به مجموعه جواب های پارتو را برای بهینه سازی چندهدفه می توان در نظر گرفت (دب و همکاران، ۲۰۰۱). در این بخش پنج معیار مقایسه برای ارزیابی الگوریتم های بهینه سازی چندهدفه ارائه می شود.

بیشترین گسترش^۱

این معیار، که توسط زیتلر (۱۹۹۹) ارائه شده است، طول قطر مکعب فضایی که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب های نامغلوب به کار می رود را اندازه گیری می کند (زیتلر^۲، ۱۹۹۹).

$$D = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\max_i (\max_i f_i^m) - \min_i (\min_i f_i^m))^2} \quad (24)$$

1. Maximum spread or diversity (D)
2. Zitler

در مسائل دو هدفه، این معیار برابر فاصله اقلیدسی بین دو جواب انتهایی در فضای جواب می- باشد. هر چه این معیار بزرگتر باشد، بهتر است.

تعداد جواب‌های آرشیو پارتو^۱

الگوریتمی که بتواند تعداد جواب‌های غیر مغلوب بیشتری در آرشیو پارتو ارائه دهد، در ترسیم سطح بهینه پارتو واقعی موفق‌تر بوده و تصمیم‌گیرنده را با گزینه‌های بیشتری مواجه می‌سازد.

فاصله از جواب ایده آل^۲

این معیار به منظور محاسبه میانگین فاصله جواب‌های پارتو از یک جواب ایده آل است. این جواب ایده آل می‌تواند با توجه به نظرات کارشناس تعیین شود. در رابطه (۲۵) مشخص است که هر چه این معیار کمتر باشد، کارایی الگوریتم بیشتر خواهد بود (زیتلر و تایلر^۳، ۱۹۹۸).

$$MID = \frac{1}{NOS} \sum_{i=1}^{NOS} c_i \text{ where } c_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m f_{ji}^2} \quad (25)$$

فاصله گذاری^۴

این شاخص که توسط اسکات (۱۹۹۵) ارائه شده است یک معیار اندازه‌گیری برای سنجش فاصله نسبی جواب‌های متوالی می‌باشد. در رابطه (۲۶) نحوه محاسبه این شاخص ارائه شده است (اسکات، ۱۹۹۵).

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \text{ where } d_i = \min_{k \in \dots} \min_{\epsilon} \sum_{m=1}^2 |f_m^i - f_m^k| \quad (26)$$

$$\text{and } \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

1. Number of pareto solution (NOS)

2. Mean ideal distance (MID)

3. Zitler and Thiele

4. Spacing (S)

فاصله اندازه گیری شده برابر است با کمترین مقدار مجموع قدر مطلق تفاضل در مقادیر توابع هدف بین λ امین جواب و جواب های واقع در مجموعه نامغلوب نهایی. قابل ذکر است که این معیار فاصله با معیار کمترین فاصله اقلیدسی بین جواب ها متفاوت است (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۲).

معیار زمان اجرای الگوریتم

زمان اجرای الگوریتم را نیز به عنوان معیار ارزیابی در نظر می گیریم که طبیعتاً مقدار کمتر آن مطلوب تر می باشد.

مقایسه الگوریتم ها

بعد از تعریف معیارهای استاندارد مقایسه ی الگوریتم های چندهدفه ی مبتنی بر پارتو، در جدول ۲، معیارهای اندازه گیری مسائل آزمایشی تولید شده، محاسبه شده است.

از آنجایی که مسائل محک در مورد مدل پیشنهادی در ادبیات موضوع وجود ندارد، تعدادی مسئله نمونه به طور تصادفی تولید شدند. مسائل تولید شده با توجه به تعداد مشتریان، محصولات و انبارها در ۴ کلاس متفاوت قرار دارند. دسته اول شامل مسائلی با ۵ انبار، ۱۰ مشتری و ۵ محصول، گروه دوم شامل مسائلی با ۵ انبار، ۲۰ مشتری و ۱۰ محصول، گروه سوم شامل مسائلی با ۱۰ انبار، ۴۰ مشتری و ۵ محصول و در آخر دسته چهارم شامل مسائلی با ۱۰ انبار، ۶۰ مشتری و ۱۰ محصول هستند. در هر گروه، ۸ مسئله تصادفی تولید شده و برای بررسی عملکرد الگوریتم ها مورد استفاده قرار می گیرند.

شکل ۶، عملکرد الگوریتم ها در شاخص های مورد بررسی را نشان می دهد. شکل (۶- الف) کارایی الگوریتم ها را در شاخص تعداد جواب پارتو نشان می دهد. در شکل (۶- الف) مشاهده می شود که با افزایش اندازه مسئله تعداد جواب های پارتو افزایش می یابد. دلیل این امر آن می باشد که هر چقدر تعداد مشتریان و انبارها افزایش یابد حالت های استفاده و تخصیص مشتریان به انبارها افزایش پیدا کرده و در نتیجه احتمال یافتن جواب های پارتو بیشتر افزایش می یابد. بر اساس این شکل می توان نتیجه گرفت که الگوریتم NSGA-II بهترین

عملکرد را در بین سایر الگوریتم‌ها دارد و می‌تواند تعداد جواب‌های بیشتری را در صف اول پارتو پیدا کند. ضمناً الگوریتم NPGA و MOHS از نظر این معیار تقریباً در یک سطح قرار دارند. شکل (۶-ب) کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی را در شاخص بیشترین گسترش نشان می‌دهد. از آنجایی که معیار بیشترین گسترش هر چه بیشتر بهتر است می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم MOHS نسبت به دو الگوریتم دیگر از کارایی بالاتری برخوردار است. شکل‌های (۶-ج) و (۶-د) مربوط به معیارهای فاصله از جواب ایده‌آل و فاصله‌گذاری می‌باشند که کارایی الگوریتم‌ها در هر دو این معیارها در حد یکسانی است. در نهایت شکل (۶-ه) عملکرد الگوریتم‌ها در معیار زمان محاسبات را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی و مقایسه دقیق‌تر از تحلیل‌های آماری استفاده شده است. همان‌طور که اشاره شد، در این حیطه از تحلیل واریانس و آزمون t بهره‌جسته‌ایم که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

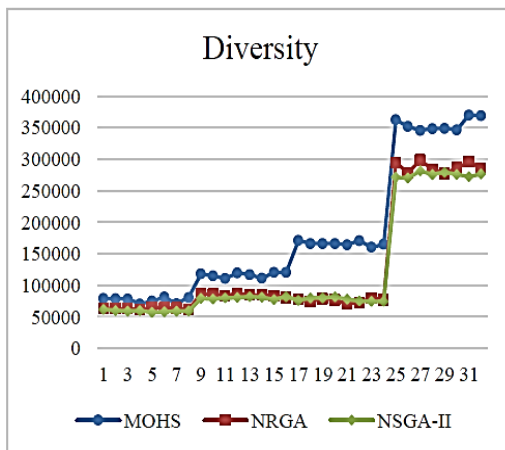
جدول ۳: آنالیز واریانس برای نتایج

| شاخص | F-Value | P-Value | نتایج آزمون |
|-----------|---------|---------|-------------|
| Diversity | ۷۵/۳۶ | ۰ | رد فرض صفر |
| NOS | ۳۷/۷۵ | ۰ | رد فرض صفر |
| Spacing | ۱۱/۵۹ | ۰ | رد فرض صفر |
| MID | ۷۴/۷۶ | ۰ | رد فرض صفر |
| Time | ۱۸/۵۸ | ۰ | رد فرض صفر |

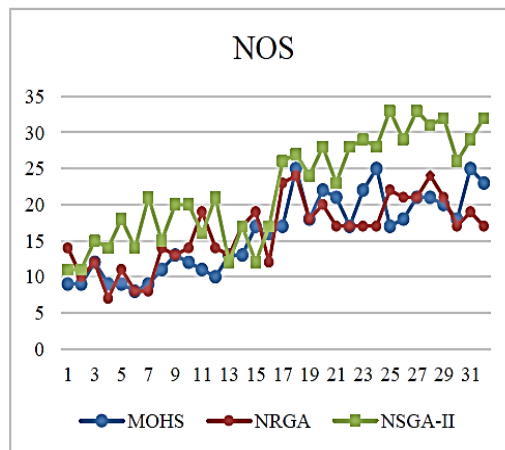
جدول ۲: نتایج محاسباتی معیارهای اندازه‌گیری مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II ، NPGA و MOHS

| MOHS | | | | | NPGA | | | | | NSGA-II | | | | | شماره |
|--------|---------|---------|-----------|-----|--------|---------|--------|-----------|-----|---------|---------|--------|-----------|-----|-------|
| Time | Spacing | MID | Diversity | NOS | Time | Spacing | MID | Diversity | NOS | Time | Spacing | MID | Diversity | NOS | شماره |
| 1.046 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 771.07 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 747 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 1 |
| 1.1917 | 7971709 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 2 |
| 1.2366 | 7971768 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 3 |
| 1.4117 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 4 |
| 1.4918 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 5 |
| 1.6170 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 6 |
| 1.7421 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 7 |
| 1.8672 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 8 |
| 2.0173 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 9 |
| 2.1424 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 10 |
| 2.2675 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 11 |
| 2.3926 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 12 |
| 2.5177 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 13 |
| 2.6428 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 14 |
| 2.7679 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 15 |
| 2.8930 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 16 |
| 3.0181 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 17 |
| 3.1432 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 18 |
| 3.2683 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 19 |
| 3.3934 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 20 |
| 3.5185 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 21 |
| 3.6436 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 22 |
| 3.7687 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 23 |
| 3.8938 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 24 |
| 4.0189 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 25 |
| 4.1440 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 26 |
| 4.2691 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 27 |
| 4.3942 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 28 |
| 4.5193 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 29 |
| 4.6444 | 7971767 | 6257657 | 4774748 | 9 | 733.87 | 796767 | 625765 | 4774747 | 9 | 731.87 | 796765 | 625765 | 4774747 | 9 | 30 |

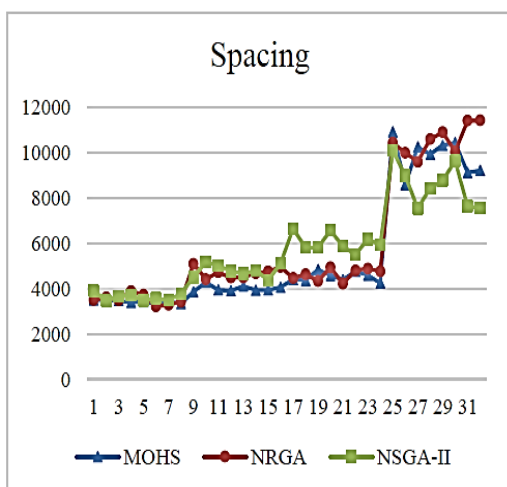
Activate
Go to Setting



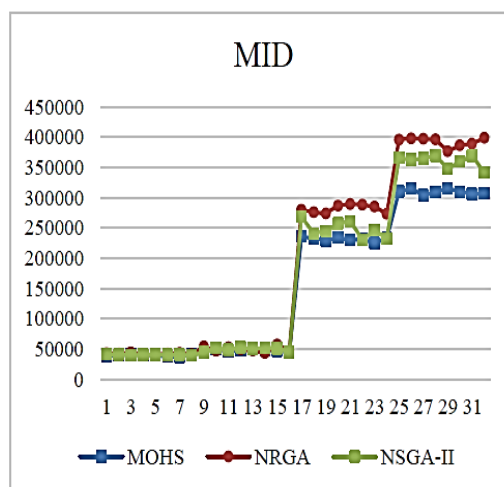
(ب)



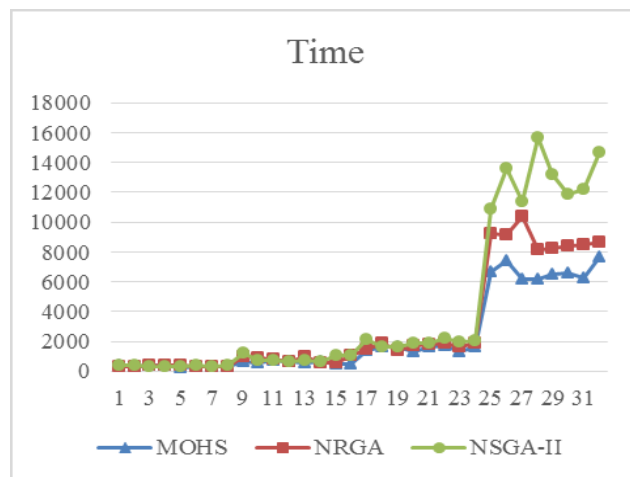
(الف)



(د)



(ج)



(۵)

شکل (۶): نمایش گرافیکی عملکرد الگوریتم‌ها در شاخص‌های مورد بررسی

نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

با توجه به غیرخطی و NP-Hard بودن مدل از طرفی و چندهدفه بودن آن از طرف دیگر، الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه برای حل مدل پیشنهاد داده شد. سپس برای بررسی کارایی الگوریتم‌ها، ۳۲ نمونه مسئله به صورت تصادفی در ابعاد مختلف حل گردید. نتایج حاصل از معیارهای ارائه شده را برای الگوریتم‌های پیشنهادی مورد تحلیل قراردادیم و مشخص شده که الگوریتم MOHS در معیار MID که نشان دهنده دستیابی به بهترین جواب‌ها است، بهتر از NSGA-II و NRGGA عمل می‌کند. در سایر معیارها و به ویژه در معیار بیشترین گسترش نیز الگوریتم MOHS عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. در شرایطی که زمان حل برای ما دارای اهمیت زیادی باشد نیز الگوریتم MOHS می‌تواند به خوبی پاسخگو باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که صرف نظر از تمام مزیت‌های الگوریتم MOHS، اگر تعداد جواب‌های پارتو مورد نظر باشد استفاده از الگوریتم NSGA-II توصیه می‌شود.

پیشنهادات برای زمینه‌های آتی این تحقیق به قرار زیر است:

- مفروضات دیگری می‌تواند به مسئله اضافه شود مانند هزینه‌های عملیاتی انبارداری به ازای محصولات، در نظر گرفتن محدودیت زمانی و فاصله برای هر مسیر.
- در نظر گرفتن پارامترهایی مانند زمان سفر، هزینه مسیر بین دو گره، ظرفیت وسایل حمل، هزینه‌های استقرار و عملیاتی انبارها به صورت فازی و مدل‌سازی آن‌ها نیز می‌تواند روش‌های نزدیک‌تری به واقعیت ارائه کند.
- لحاظ نمودن سایر مدل‌های عدم قطعیت نظیر فاز خاکستری و غیره.
- حل مسئله با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری کارا تر

منابع

- اعتباری فرهاد و تراپی نیلوفر، (۱۳۹۸). "ارائه مدل مکانیابی-مسیریابی ظرفیت دار پویا با در نظر گرفتن تقاضای وابسته به قیمت"، *مطالعات مدیریت صنعتی*، دوره ۱۷، شماره ۵۲، ص ۸۹-۱۲۴.
- کریمی مرضیه، کاظمی ابوالفضل، عزیزمحمدی مهدی، (۱۳۹۴). "ارائه یک مدل چندهدفه جدید برای مسئله انتخاب تأمین کننده در زنجیره تامین و حل آن با الگوریتم های فراابتکاری چند هدفه مبتنی بر پارتو"، *مهندسی صنایع و مدیریت شریف*، دوره ۱-۳۱، شماره ۱/۲، ص ۶۱-۷۱.
- کریمی مرضیه، کاظمی ابوالفضل و نادری علیرضا، (۱۳۹۸). "ارائه و حل یک مدل برنامه ریزی دوهدفه جهت انتخاب تأمین کننده بادر نظر گرفتن شرایط تخفیف و کمبود"، *مطالعات مدیریت صنعتی*، دوره ۱۷، شماره ۵۳، ص ۱۲۷-۱۵۸.
- Ahmadi, J. A., Azad, N. (2010). "Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design", *Transportation Research*, Vol. 46, PP. 582-597.
- Ahn, C. W. and Ramakrishna, R. S. (2002). "A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of population". *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, vol. 6, No. 6, PP. 566-579.
- Al Jadaan, O., Rao, C.R. and Rajamani, L. "Non-Dominated ranked genetic algorithm for solving Multi-Objective optimization problems: NRGGA", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, pp.60-67, (2008).
- Almouhanna, A., Quintero-Araujo, C. L., Panadero, J., Juan, A. A., Khosravi, B., & Ouelhadj, D. (2020). "The location routing problem using electric vehicles with constrained distance". *Computers & Operations Research*, 115, 104864.
- Azizi, V., & Hu, G. (2020). "Multi-product pickup and delivery supply chain design with location-routing and direct shipment". *International Journal of Production Economics*, 107648.
- Barahona, F., Jensen, D., (1998). "Plant Location with Minimum

Inventory”, *Mathematical Programming*, Vol. 83, PP. 101-111.

Barreto, S. S., Ferreira, C., Paixa, J. and Santos, B. S. (2007). “Using clustering analysis in capacitated location-routing problem”. *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, PP. 968–977.

Darvish, M., Archetti, C., Coelho, L. C., & Speranza, M. G. (2019). “Flexible two-echelon location routing problem”. *European Journal of Operational Research*, 277(3), 112

Deb, K. “Multi-objective optimization using evolutionary algorithms”, *Chichester, UK: Wiley* (2000).

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. (2001). “A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II”, *In: proceedings of the parallel problem solving from nature VI (PPSN-VI) conference*, PP. 849-858.

Dukkanci, O., Kara, B. Y., & Bektaş, T. (2019). “The green location-routing problem”. *Computers & Operations Research*, 105, 187-202.

Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan, G.V. (2001). “A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony search”. *Simulation*, Vol. 76, PP. 60-68.

Ghiani, G. and Laporte, G. (1999), “Eulerian location problems”, *Networks*, vol. 34, No. 4, PP. 291-302.

Lee, K.S., Geem, Z. W., (2004). “A new structural optimization method based on the harmony search algorithm”. *Computers and Structures*, Vol. 82, PP. 781-798.

Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). “Strategic facility location: A review”. *European journal of operational research*, 111(3), 423-447.

Rabbani, M., Heidari, R., Farrokhi-Asl, H., & Rahimi, N. (2018). “Using metaheuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types”. *Journal of Cleaner Production*, 170, 227-241.

Rahmati, S.H.A., Zandieh, M., and Yazdani, M. (2012). “Developing

two multi-objective evolutionary algorithms for the multi-objective flexible job shop scheduling problem”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 915-932.

Rui Borges Lopes, Carlos Ferreira, Beatriz Sousa Santos,(2016) “A simple and effective evolutionary algorithm for the capacitated location–routing problem”, *Computers & Operations Research*, Vol. 70, PP. 155–162.

Schiffer, M., Schneider, M., Walther, G., & Laporte, G. (2019). “Vehicle routing and location routing with intermediate stops: a review”, *Transportation Science*, 53(2), 319-343.

Schott, J.R. (1995). “Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithms optimization”, *Master’s thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, MA.

Srivastava, H. and Benton, W.C. (1990). “The location-routing problem: considerations in physical distribution system design”, *Computers & operations research*, vol. 17, No. 5, PP. 427-435.

Taguchi, G., “Introduction to quality engineering”, (1986). *White Plains: Asian Productivity Organization/UNIPUB*.

Tai-Hsi Wu, Chinyao Low, Jiunn-Wei Bai, (2001). “Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems”, *Management Science*.

Toro, E., Franco, J., Echeverri, M., Guimarães, F & Rendón, R. (2017). “Green open location-routing problem considering economic and environmental costs”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 8, No. 2, PP. 203-216.

Yao, Z., Lee, L. H., Jaruphongsa, W., Tan, V., Hui, C. F. (2010) “Multi - source facility location - allocation and inventory problem”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 207, PP. 750-762.

Yu, V. F., Lin, S-W., Lee, W. and Ting, C.-J. (2010). "A simulated annealing heuristic for the capacitated location-routing problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, PP. 288-299.

Zitler, E. (1999). "Evolutionary Algorithms for multi-objective optimization: method and applications". *p.h.D Thesis, dissertation ETHNO. 13398, Swaziland Federal Institute of Technology Zorikh, Switzerland.*

Zitler, E. and Thiele, L. "Multiobjective optimization using evolutionary algorithms a comparative case study", In A.E. Eiben, T. Back, M. Schoenauer and H.P. Schwefel (Eds.), Fifth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-V), Berlin, Germany, pp.292-301, (1998).