فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۹۲، پاییز ۱۳۹۸، ۱۱۲-۸۱

# ارائه مدل دوهدفه مکان‌یابی–مسیریابی برای محصولات فاسدشدنی با در نظر گرفتن ماندگاری محصولات

**علیرضا عیدی***

**آزاده سپاهی**  **امیر خالقی*****

**دریافت: ۹۷/۱/۲۲**  **پذیرش: ۹۷/۵/۲**

**مسائل مکان‌یابی–مسیریابی / محصولات فاسدشدنی / مسائل چندهدفه / پنجره زمانی نرم / روش فراابتکاری** NSGA-II

## چکیده

در این پژوهش، یک مدل دوهدفه برای مسئله مکان‌یابی–مسیریابی محصولات فاسدشدنی همراه با پنجره زمانی نرم ارائه شده است که هدف اول آن کمینه کردن هزینه‌های موجود و هدف دوم حداکثر کردن عمر ماندگاری محصولات می‌باشد. به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، تعدادی مسئله نمونه به‌صورت تصادفی و به کمک داده‌های مقالات معتبر تولید گردیده است. مسئله در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS کد شده و با روش محدودیت اپسیلون بهبود یافته حل شده است. به دلیل NP-hard بودن مسئله، یک الگوریتم NSGAII برای حل مسئله در ابعاد بزرگ پیشنهاد شده است. نتایج محاسباتی، بیانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی است.

*. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران Alireza.eydi@uok.ac.ir

**. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی لجستیک و زنجیره‌تأمین، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

***. دانشجوی دکتری، مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

■ علیرضا عیدی ، نویسنده مسئول.

## مقدمه

یک زنجیره‌تأمین شبکه‌ای از سازمان‌های متصل و وابسته به یکدیگر است که به‌طور متقابل و همکارانه، برای کنترل، مدیریت و بهبود جریان مواد و اطلاعات از تأمین کننده به استفاده کنندگان نهایی با هم فعالیت می‌کنند[1]. یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدیریت زنجیره‌تأمین، برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم لجستیک است که شامل یکپارچه‌سازی اطلاعات، حمل‌ونقل، موجودی کالا، انبارداری، جابه‌جایی کالا و بسته‌بندی و در مواردی نیز شامل امنیت کالا می‌شود. هدف لجستیک، تأمین مواد مشخص و معین، در زمان و مکان درست همراه با بهینه‌کردن یک یا چندین معیار عملکرد (مانند کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی کل)، با توجه به مجموعه‌ای از محدودیت‌ها (مانند محدودیت بودجه و سطح نیروی انسانی) است[2].

وظیفه مدیران زنجیره‌تأمین، مدیریت ارتباطات بالادستی و پایین‌دستی با تأمین‌کنندگان و مشتریان است، به‌منظور ارائه بهتر خدمت به مشتری و با هزینه کمتر برای زنجیره‌تأمین به‌عنوان یک کل. بخش قابل توجهی از هزینه‌های زنجیره‌تأمین را هزینه‌های حمل‌ونقل تشکیل می‌دهد. بنابراین، برنامه‌ریزی در مورد حمل‌ونقل از اهمیت بالایی برخوردار است.

برای طراحی یک شبکه حمل‌ونقل با دو تصمیم عمده مکان‌یابی و مسیریابی مواجه هستیم که باید جواب مناسبی برای این دو مسئله بیابیم. در حدود چهار دهه اخیر محققین مختلف این دو مسئله را به‌صورت همزمان در نظر گرفته‌اند[3] و مدل‌های مکان‌یابی-مسیریابی را معرفی کرده‌اند. مدل‌های مکان‌یابی ـ مسیریابی به حل توأم مسئله تعیین تعداد بهینه، ظرفیت و مکان تسهیلات خدمت‌دهنده به بیش از یک تأمین‌کننده/مشتری و نیز مجموعه بهینه زمان‌بندی و مسیر وسایل نقلیه می‌پردازند. به این ترتیب این مسائل سعی در افزایش کارایی سیستم توزیع از طریق مجموعه‌ای از حمل‌ونقل و جابجایی هماهنگ و پیوسته کالا دارند[4]. به عبارت دیگر مدل‌های یکپارچه مکان‌یابی-مسیریابی جهت حل همزمان مسائل مکان‌یابی تسهیلات (FLP[5]) و مسیریابی وسایل حمل (VRP[6]) و نشان دادن اثرات متقابل

1. Christopher, (2016).
2. Hugos, (2011).
3. Laporte, (1981).
4. Min and Srivastava, (1998).
5. Facility Location Problem
6. Vehicle Routing Problem

بین دو تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرند[1].

یکی از انواع پرکاربرد لجستیک، لجستیک موادغذایی است. در حمل‌ونقل محصولات غذایی، اغلب به علت افزایش یافتن زمان سفر و توقف‌های متوالی برای خدمت‌رسانی به مشتری، امکان خرابی محصولات در طی فرآیند تحویل محصولات وجود دارد. بنابراین، اغلب مدیریت موثر زنجیره توزیع سرد در هوای گرم و مرطوب کار مشکلی است. توسعه حمل‌ونقل و لجستیک زنجیره محصولات سرد (استفاده از یخچال‌ها در حمل‌ونقل)، امکان خرابی غذاها و کالاهای فاسدشدنی را در فرآیند ارسال و حمل‌ونقل کاهش داده است. در نهایت، کم شدن خرابی‌های محصول باعث کم شدن هزینه‌های حمل‌ونقل شده است و امکان فروش محصولات را افزایش داده است و باعث افزایش ماندگاری محصول می‌شود. عمر ماندگاری[2] محصول به دوره زمانی اطلاق می‌شود که پس از طی آن دوره، محصول ویژگی‌های اصلی و تعریف‌شده خود را از دست داده و نزد مشتری فاقد ارزش می‌شود[3]. محصولات فاسدشدنی را براساس ماندگاری آن‌ها به دو گروه اصلی تقسیم می‌کنند. گروه اول محصولات با دوره ماندگاری ثابت می‌باشند که پس از طی این دوره به یک‌باره ارزش خود را از دست می‌دهند. گروه دوم محصولات با دوره ماندگاری تصادفی هستند که دوره ماندگاری آن‌ها به‌صورت متغیر تصادفی فرض می‌شود[4].

در این پژوهش، مسئله طراحی سیستم توزیع برای یک شرکت پخش مواد فاسدشدنی را مدنظر قرار داده و قصد داریم یک مدل مکان‌یابی–مسیریابی برای آن ارائه دهیم، به‌طوری‌که تعدادی انبار (جهت توزیع کالاهای فاسدشدنی با توجه به مکان‌های بالقوه موجود) مکان‌یابی شده و مسیرهایی از آن‌ها به مشتریان (خرده‌فروشان) موجود تعیین گردد. در برنامه‌ریزی برای محصولات فاسدشدنی نظیر میوه‌ها، سبزیجات، ماست و شیر تازه باید موضوع فساد آن‌ها در سطوح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی مدنظر قرار گیرد، زیرا که این محصولات اغلب دارای بازه زمانی مصرف حدود یک هفته می‌باشند و معمولاً فساد آن‌ها از لحظه تولید شروع می‌شود. لذا بدون برنامه‌ریزی صحیح (در سطوح مختلف تصمیم‌گیری) محصولات قبل از رسیدن به دست مشتری نهایی فاسد خواهند شد و

1. Tuzun, (1999).
2. Shelf-life
3. Amorim, (2012).
4. Nahmias, (1982).

هزینه‌های زیادی را متوجه زنجیره‌تأمین خواهد نمود. منافع حاصله از این کار بسیار وابسته به سطح تازگی محصولات ارائه شده می‌باشد. برای پاسخ‌گویی به رضایت کامل مشتریان محصولات فاسدشدنی نیازمند یک برنامه‌ریزی چندهدفه می‌باشیم که هزینه‌ها را کاهش داده و تازگی محصولات ارائه شده را افزایش دهد. طراحی این سیستم توزیع با دو هدف اصلی کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی زمان ماندگاری محصولات رسیده به‌دست مشتری صورت می‌گیرد. با توجه به فاسدشدنی بودن محصول و جلب بیشتر رضایت مشتری، از پنجره زمانی نرم استفاده شده است که در این مسئله علاوه بر محدودیت ظرفیت، هریک از مشتریان دارای فواصل زمانی جهت ارائه خدمات می‌باشند.

## ۱. مرور ادبیات

از آن‌جایی که این پژوهش مرتبط با دو حوزه مختلف تحقیقاتی است، لذا بررسی پیشینه تحقیق در هر دو شاخه یعنی مکان‌یابی–مسیریابی و توزیع محصولات فاسدشدنی انجام می‌شود.

### ۱-۱. لجستیک سرد

محققین مختلفی به مطالعه زنجیره‌تأمین سرد پرداخته‌اند. دوفانگ[1] و همکاران، مدلی را به منظور طراحی شبکه توزیع لجستیک زنجیره سرد، با هدف کاهش از دست دادن محصولات کشاورزی در چرخه تولید و کاهش هزینه کل ارائه دادند. نویسندگان به منظور مدل‌سازی مسئله، شعاع خدمت‌رسانی به مشتریان را به عنوان مجموعه‌ای از محدودیت‌های اصلی مسئله درنظر گرفته‌اند[2]. آموریم[3] و همکاران، مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع محصولات فاسدشدنی را در سطح عملیاتی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها مدل‌های چندهدفه یکپارچه و غیر یکپارچه را برای دو حالت مختلف از کالاهای فاسدشدنی که دارای زمان مجاز نگهداری ثابت و متغیر هستند، فرمول‌بندی نمودند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مزایای

1. Daofang
2. Daofang, (2015).
3. Amorim

به‌دست آمده از رویکرد یکپارچه، وابستگی بیشتری به تازگی محصولات دارد[1]. اوسوالد و زاندیک[2]، یک مسئله مسیریابی با پنجره زمانی را برای توزیع سبزیجات تازه که در آن فاسد شدن یک عامل مهم است ارائه دادند. در مدل ارائه شده برای این مسئله، تأثیر فساد محصولات به عنوان بخشی از هزینه‌های توزیع کلی در نظر گرفته شده و برای حل آن، یک رویکرد ابتکاری براساس جستجوی ممنوع معرفی شده است[3]. هسو و هونگ[4]، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یخچال‌دار را با پنجره زمانی و فرآیند توزیع تصادفی برای مواد غذایی مطرح ساختند و یک مدل برای پیدا کردن مسیر مطلوب توسعه دادند[5]. هسو و همکاران، یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی و با داده‌های تصادفی، برای توزیع مواد غذایی فاسدشدنی ارائه نمودند. مدل ارائه شده آن‌ها مسیر بهینه تحویل، بارگذاری، اعزام ناوگان و زمان‌های حرکت برای ارائه مواد غذایی فاسدشدنی از یک مرکز توزیع را به دست می‌آورد[6]. درنس[7] و همکاران، نتایج یک مطالعه موردی زنجیره سرد در فرانسه که در سال ۲۰۱۳ در چارچوب یک پروژه اروپایی به نام فریزبی[8] انجام شده، ارائه دادند[9]. سونگ و کو[10]، مسئله مسیریابی وسیله‌ی نقلیه را برای تحویل محصولات غذایی فاسدشدنی متنوع با دو نوع وسیله نقلیه‌ی یخچال‌دار و معمولی، درنظر گرفتند که مکان هر مشتری و حجم سفارش آن معین و قطعی فرض شده است[11].

### ۱-۲. مکان‌یابی-مسیریابی:

مسائل مکان‌یابی-مسیریابی حوزه گسترده‌تری از تحقیقات را شامل می‌شوند. مختصری از این مطالعات در مقالات مروری ارائه شده توسط محققین مختلف نظیر نگی و سالی[12]،

1. Amorim, (2012).
2. Osvald & Zadnik
3. Osvald, (2008).
4. Hsu & Hung
5. Hsu, (2007).
6. Hsu, (2003).
7. Derens
8. Frisbee
9. Derens-Bertheau, (2015).
10. Song & Ko
11. Song, (2016).
12. Nagy & Salhi, (2007).

پرادهان و پرینس[1] و همکاران، لوپز و همکاران[2] و درکسل و اشنایدر[3] به تفصیل اشاره شده است. درکسل و اشنایدر در مقاله مروری خود به بررسی انواع مسائل مکان‌یابی-مسیریابی به همراه نسخه‌های توسعه یافته آن پرداختند. در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌گردد.

یو[4] و همکاران، مسئله مکان‌یابی-مسیریابی نسبتاً جدیدی که دو جزء اصلی یک سیستم لجستیک، از جمله مسئله مکان‌یابی تسهیلات (FLP) و مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) را در نظر گرفته است، معرفی کردند[5]. زرندی و همکاران، یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی را به‌صورت یک نمونه خاص از مسئله مسیریابی وسیله نقلیه جایی که نیاز است تعداد و مکان بهینه انبارها به طور همزمان با پیدا کردن مسیرهای خودرو از انبارها به مشتریان، در جهت به حداقل رساندن هزینه‌های مرتبط با مکان انبارها و توزیع مشتری‌ها تعیین شود بررسی کردند[6]. گووینداندن[7] و همکاران، مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی با چند وسیله نقلیه و با در نظر گرفتن پنجره زمانی برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین پایدار مواد فاسدشدنی را مطالعه نمودند. آن‌ها بیان کردند که هدف این مقاله تعیین تعداد و مکان تسهیلات و بهینه‌سازی مقدار محصولات تحویلی در مراحل و مسیرهای کمتر در هر سطح است[8].

در رابطه با نزدیک‌ترین تحقیقات انجام‌شده، وو و همکاران یک مدل مکان‌یابی-مسیریابی با چند انبار را ارائه کردند که در آن ظرفیت انبار محدود و تعداد وسایل نقلیه نامحدود بود و از روش شبیه‌سازی تبرید برای حل آن استفاده کردند[9]. نیک‌بخش و ذگردی، مدل مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دوسطحی را با تسهیلات ظرفیت‌دار و پنجره زمانی نرم ارائه کردند و با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژی یک کران پایین برای مسئله به‌دست آورده و روش ابتکاری خود را با آن مقایسه کردند[10]. آموریوم و همکاران، مدل مسئله برنامه‌ریزی

1. Prodhan & Prins, (2014).
2. Lopes, (2013).
3. Drexl & Schneider, (2015).
4. Yu
5. Vincent, (2010).
6. Zarandi
7. Govindan
8. Govindan, (2014).
9. Wu, (2002).
10. Nikbakhsh, (2010).

تولید و توزیع محصولات فاسدشدنی را در سطح عملیاتی ارائه کردند که در آن، مدل‌های چندهدفه یکپارچه و غیریکپارچه را برای دو حالت مختلف از کالاهای فاسدشدنی دارای زمان مجاز نگهداری ثابت و متغیر ارائه شد و از روش‌های دقیق برای حل مدل‌ها استفاده کردند و جواب‌های پارتویی را گزارش کردند[1]. دوفانگ و همکاران، مدل طراحی شبکه توزیع لجستیک زنجیره سرد را با هدف کاهش از دست دادن محصولات کشاورزی در چرخه تولید و کاهش هزینه کل ارائه کردند که در آن شعاع خدمت‌رسانی به مشتریان به عنوان مجموعه‌ای از محدودیت‌های اصلی مسئله در نظر گرفته شد[2]. هان و همکاران، مدل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با زمان سفر نامشخص را که در آن یک جریمه برای هر خودرویی که از محدودیت زمانی مشخص شده آن تجاوز کند در نظر گرفته شده، ارائه کردند که در آن به دنبال پیدا کردن مسیرهایی با قرارگرفتن در محدوده مشخص با کمترین هزینه مورد انتظار بودند و از روش شاخه و برش برای حل مسئله استفاده کردند[3]. مدل مسئله مسیریابی وسیله نقلیه‌ی دوره‌ای، با تسهیلات ظرفیت‌دار، دارای پنجره‌زمانی، همراه با برداشت و تحویل همزمان کالا و خدمات چندبخشی و گسسته توسط توکلی‌مقدم و همکاران ارائه گردید و از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل آن استفاده کردند[4]. گویندان و همکاران، مدل مسئله مکان‌یابی-مسیریابی دوهدفه دوسطحی را با چند وسیله نقلیه و با در نظر گرفتن پنجره زمانی، برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین پایدار مواد فاسدشدنی ارائه کردند که دارای دو هدف کمینه کردن هزینه‌ها و کمینه‌سازی اثر محیطی سیستم اندازه‌گیری‌شده توسط گازهای گلخانه‌ای بود و از یک روش فراابتکاری ترکیبی جدید به نام MHPV برای حل مدل استفاده کردند[5]. هم‌چنین، محمدی‌شاد و فتاحی، مدل مکان‌یابی-مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت‌دار را با پنجره زمانی سخت ارائه کردند و یک روش حل فراابتکاری را بر مبنای الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر، برای حل آن به کار گرفتند[6].

1. Amorim, (2012).
2. Daofang, (2015).
3. Han, (2013).
4. Moghaddam, (2012).
5. Govindan, (2012).
۶. محمدی، فتاحی، (۲۰۰۲).

از مرتبط‌ترین تحقیقات انجام‌شده در سال‌های اخیر، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. لی[1] و همکاران، یک مدل سه‌هدفه را برای مسئله مکان‌یابی – مسیریابی – موجودی در مورد لجستیک سرد بررسی کردند که در آن، اهداف مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های مکان‌یابی مراکز توزیع، کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل و کمینه‌سازی هزینه‌های موجودی بود. آن‌ها برای حل مسئله از الگوریتم ازدحام ذرات گسسته استفاده کردند[2]. فرخی‌اصل[3] و همکاران، یک مدل دوهدفه مکان‌یابی – مسیریابی در مدیریت جمع‌آوری ضایعات ارائه کردند که در آن، هدف اول مسئله اقتصادی بود و شامل: کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه، هزینه‌های متغیر سفر، هزینه ثابت گشایش تسهیلات دفن ضایعات در مکان‌های بالقوه و هزینه‌های گشایش دپوها در مکان‌های بالقوه بود. هدف دوم، یک هدف اجتماعی بود و شامل حداکثرسازی مجموع فواصل تسهیلات دفن ضایعات از مشتریان (به‌دلیل اثرات منفی تسهیلات بر روی افراد جامعه). نویسندگان برای حل مسئله از دو الگوریتم ژنتیک چندهدفه و ازدحام ذرات چندهدفه استفاده کردند. یک مدل دوهدفه مکان‌یابی – مسیریابی برای لجستیک معکوس چندسطحی با در نظرگرفتن پنجره زمانی توسط قضاوتی و بیگی[4] ارائه شد. در این مسئله، هدف اول شامل کمینه‌سازی هزینه‌های مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری/بازرسی، هزینه‌های ثابت مکان‌یابی مراکز بازیابی، هزینه به‌کار گرفتن وسایل نقلیه، هزینه‌های متغیر حمل‌ونقل و جریمه خروج از پنجره زمانی و هدف دوم کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل جمع‌آوری محصولات بازگشتی بود. برای حل مسئله از روش دقیق محدودیت اپسیلون و روش فراابتکاری ژنتیک چندهدفه استفاده شد. ویدویچ[5] و همکاران، یک مدل مکان‌یابی – مسیریابی دوسطحی را برای طراحی شبکه لجستیک بازیافتی ارائه کردند. در این مدل، نرخ جمع‌آوری وابسته به فاصله بود و هدف مسئله، حداکثرسازی درآمدهای حاصل از مواد بازیافتی جمع‌آوری‌شده منهای هزینه‌های سیستم بود. برای حل مدل در ابعاد متوسط و بزرگ، نویسندگان یک الگوریتم ابتکاری را

1. Li
2. Li, K. (2016).
3. Farrokhiasl
4. Ghezavati and Beigi, (2016).
5. Vidovic, (2016).

توسعه دادند. توکلی‌مقدم و رازی[1]، مسئله مکان‌یابی – مسیریابی – موجودی چنددوره‌ای و چندمحصولی را با تقاضای فازی بررسی کردند که در آن دو هدف کمینه‌سازی هزینه‌های استفاده از وسایل نقلیه، نگه‌داری موجودی، مصرف سوخت، حمل‌ونقل و مکان‌یابی مراکز توزیع بود و کمینه‌سازی کمبود موجودی محصولات برای مشتریان در نظر گرفته شد. برای حل مسئله از برنامه‌ریزی ریاضی فازی استفاده شد. چاو[2] و همکاران، مسئله مکان‌یابی – مسیریابی – موجودی دومرحله‌ای را برای شبکه‌های توزیع غذا با در نظر گرفتن پنجره زمانی مورد مطالعه قرار دادند. مرحله اول، شامل یک مسئله مسئله مکان‌یابی – مسیریابی – موجودی با پنجره زمانی و مرحله دوم، شامل یک مسئله حمل‌ونقل با محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه بود. تابع هدف مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های سفر از تولیدکننده به توزیع‌کننده و از توزیع‌کننده به مشتریان، هزینه‌های موجودی، هزینه‌های آسیب‌دیدن کالاها، هزینه‌های انرژی و جریمه خروج از پنجره زمانی تعیین‌شده بود. برای حل مدل، از یک الگوریتم ابتکاری هیبریدی استفاده شد. مسئله مکان‌یابی – موجودی – مسیریابی برای محصولات فسادپذیر، توسط هیاسات[3] و همکاران ارائه شد. مسئله به‌دنبال تعیین تعداد و مکان انبارها و سطح موجودی در خرده‌فروشی‌ها و مسیر وسایل نقلیه بود. هدف مسئله کمینه‌سازی هزینه‌های گشایش و عملیات انبارها، هزینه‌های حمل‌ونقل و نگه‌داری موجودی بود. محققان برای حل مسئله از یک الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. رفیعی‌مجد[4] و همکاران، مسئله موجودی – مکان‌یابی – مسیریابی یکپارچه سه‌سطحی را در حالت چنددوره‌ای و چندمحصولی برای محصولات فسادپذیر تحت عدم‌قطعیت تقاضا (استوکاستیک و توزیع نرمال) بررسی کردند. هر وسیله نقلیه در هر دوره می‌توانست به بیش از یک مرکز توزیع اختصاص یابد. هدف مسئله شامل کمینه‌سازی هزینه‌های گشایش مراکز توزیع، هزینه‌های نگه‌داری موجودی، هزینه‌های انتظاری ضایعات، هزینه‌های سوخت، هزینه‌های راننده، هزینه‌های راه‌اندازی، هزینه‌های نگه‌داری ذخیره اطمینان و هزینه‌های ارسال محصولات بود. برای حل مسئله از یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژی برای به دست آوردن کران پایین و

1. Tavakkoli-Moghaddam and Raziei, (2016).
2. Chao, (2017).
3. Hiassat, (2017).
4. Rafie-Majd, (2018).

یک الگوریتم ابتکاری برای تعیین کران بالا استفاده شد. ونگ[1] و همکاران، مسئله مکان‌یابی – مسیریابی را برای لجستیک سرد با در نظر گرفتن هزینه‌های انتشار کربن بررسی کردند. هدف مسئله کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت مراکز توزیع، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های انجماد، جریمه خروج از پنجره زمانی، هزینه‌های آسیب به محصولات و هزینه‌های انتشار کربن بود. محققان برای حل مسئله از یک الگوریتم ژنتیک هیبریدی استفاده کردند.

براساس بررسی‌های انجام شده و با توجه به اهمیت مسائل مکان‌یابی–مسیریابی و توزیع محصولات فاسدشدنی از نظر کاربردی و تئوری، پرداختن به مسئله مکان‌یابی–مسیریابی محصولات فاسدشدنی با درنظر گرفتن زمان مجاز برای نگهداری، می‌تواند حائز اهمیت باشد. در واقع، وجه تمایز این پژوهش با مطالعات پیشین، درنظر گرفتن زمان مجاز برای نگهداری می‌باشد.

## ۲. بیان مسئله و مدل ریاضی

### ۲-۱. فرضیات تحقیق

- زنجیره‌تأمین شامل تأمین‌کننده، انبارها وخرده‌فروش‌ها می‌باشد.
- فضای حل مسئله گسسته بوده و مکان‌های بالقوه تاسیس انبارها (توزیع‌کننده‌ها) مشخص است.
- تعداد و محل قرارگیری خرده‌فروش‌ها ثابت و مشخص است.
- هزینه‌های حمل‌ونقل به مسافت پیموده‌شده وابسته است.
- هر خرده‌فروش دارای یک پنجره زمانی نرم برای دریافت کالا می‌باشد.
- مسئله از نوع تک محصولی و تک دوره‌ای می‌باشد.
- ناوگان حمل ناهمگن است.
- مسئله در شرایط قطعی مدل‌سازی می‌شود.
- محصول دارای یک طول عمر مفید است که با گذشت زمان از ارزش آن کم می‌شود.

1. Wang, (2018).

## ۲-۲. فرمول‌بندی مدل

### ۲-۲-۱. اندیس‌های مدل

I: مجموعه‌ای از همه مکان‌های بالقوه مرکز توزیع (DC)

J: مجموعه‌ای از همه مشتری‌ها

K: مجموعه‌ای از همه وسایل نقلیه

O: مکان تولیدکننده

### ۲-۲-۲. پارامترهای مدل

N: تعداد گره‌های مشتری و انبار

T: تاریخ تولید

S: عمر محصول

$C_{ij}$ : مسافت بین گره i و گره j. $i,j \in I \cup J$

$C_{oi}$ :مسافت بین تولیدکننده O تا مرکز انبار i

$G_i$ :هزینه ثابت تاسیس مرکز توزیع i

$F_k$ :هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه K

$VC_i$ :هزینه متغیر برای رسیدگی به هر واحد کالا در مرکز توزیع i

$w_i$ :ظرفیت مرکز توزیع i

$d_j$ :تقاضای مشتری

$Q_k$ :ظرفیت وسیله نقلیه K

$ST_i$ :زمان سرویس‌دهی کالا برای گره i

SM:سرعت متوسط وسیله نقلیه

$e_j$ :زودترین زمان رسیدن محصول به دست مشتری j (حد پایین پنجره زمانی)

$I_j$ : دیرترین زمان رسیدن محصول به دست مشتری j (حد بالای پنجره زمانی)

$P_{ej}$ :جریمه زودتر از موعد رسیدن محصول به دست مشتری j

$Pl_j$ :جریمه دیرکرد تحویل محصول به دست مشتری j

H :شعاع مجاز خدمت رسانی از تولیدکننده تا مرکز توزیع (با عبور از این حد شعاع، محصول رسیده به دست مشتری دچار فساد می‌شود)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

G :شعاع مجاز خدمت رسانی مرکز توزیع به مشتری

PH: جریمه تجاوز از شعاع مشخص شده بین تولیدکننده و توزیع‌کننده i

G: جریمه تجاوز از شعاع مشخص شده بین توزیع‌کننده و مشتری j

### ۲-۲-۳. متغیرهای تصمیم

$X_{ijk}$ : متغیر باینری می‌باشد اگر وسیله نقلیه K به طور مستقیم از گره i به گره j سفر کند برابر یک، در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.

$y_j$ : متغیر باینری می‌باشد اگر انبار i تاسیس شود برابر یک، در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.

$f_{ij}$ :متغیر باینری می‌باشد که اگر مشتری i به مرکز توزیع i تعلق گیرد برابر یک، در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.

$D_i$ : مقدار کالای ارسالی از تولیدکننده به مرکز توزیع i

$a_j$ : زمان رسیدن محصول به دست مشتری j

$Te_j$ : مدت زمان زودکرد رسیدن محصول به دست مشتری j

$Tl_j$ : مدت زمان دیرکرد رسیدن محصول به دست مشتری j

$h_i$ : شعاع تجاوز شده در طول مسیر از تولیدکننده به توزیع‌کننده i

$g_k$ : شعاع تجاوز شده از توزیع‌کننده به مشتری در مسیر k

$U_{rk}$ : متغیر کمکی برای حذف محدودیت زیرتور برای مسیر k

$$Min\ Z_1 = \sum_{i\in I} G_i * y_i + \sum_{i\in I\cup J}\sum_{j\in I\cup J}\sum_{k\in K} C_{ij} * x_{ijk} + \sum_{k\in K} F_k \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} x_{ijk} + \sum_{i\in I} y_i * C_{oi} \quad (1)$$

$$+ \sum_{i\in I} VC_i * D_i + \sum_{j\in J} Pe_j * Te_j + \sum_{j\in J} Pl_j * Tl_j + \sum_{i\in I} PH * h_i + \sum_{k\in K} PG * g_k$$

$$Max Z_2 = \sum_{j\in J}\sum_{i\in I} \frac{(t + S - a_j)d_j * f_{ij}}{D_i} \quad (2)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in I\cup J} x_{ijk} = 1 \qquad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{j\in J} x_{ijk} \le 1 \qquad \forall i \in I \qquad (4)$$

$$\sum_{j\in J} d_j \sum_{i\in I\cup J} x_{ijk} \le Q_k \qquad \forall k \in K \qquad (5)$$

$$U_{rk} - U_{jk} + N * x_{rjk} \le N - 1 \qquad \forall r, j \in J, k \in K \qquad (6)$$

$$\sum_{j\in I\cup J} x_{ijk} - \sum_{j\in I\cup J} x_{jik} = 0 \qquad \forall k \in K, i \in I \cup J \qquad (7)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} x_{ijk} \le 1 \qquad \forall k \in K \qquad (8)$$

$$\left(\sum_{j\in J} d_j * f_{ij}\right) - w_i * y_i \le 0 \qquad \forall i \in I \qquad (9)$$

$$-f_{ij} + \sum_{m\in I\cup J} (x_{imk} + x_{mjk}) \le 1 \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K \qquad (10)$$

$$D_i = \sum_{j\in J} d_j * f_{ij} \qquad \forall i \in I \qquad (11)$$

$$a_j = \sum_{i\in I\cup J}\sum_{k\in K} x_{ijk}\left(a_i + ST_i + \left(\frac{C_{ij}}{Sm}\right)\right) \qquad \forall j \in J \qquad (12)$$

$$Te_j \ge (e_j - a_j) \qquad \forall j \in J \qquad (13)$$

$$Tl_j \ge (a_j - l_j) \qquad \forall j \in J \qquad (14)$$

$$C_{Oi} * y_i - h_i \le H \qquad \forall i \in I \qquad (15)$$

$$\left(\sum_{i\in I\cup J}\sum_{j\in J} C_{ij} * x_{ijk}\right) - g_k \le G \qquad \forall k \in K \qquad (16)$$

$$\sum_{i\in I} f_{ij} = 1 \qquad \forall j \in J \qquad (17)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ or } 1 \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K \qquad (18)$$

$$y_i = 0 \text{ or } 1 \qquad \forall i \in I \qquad (19)$$

$$f_{ij} = 0 \text{ or } 1 \qquad \forall i \in I, j \in J \qquad (20)$$

$$U_{lk}, a_j, Te_j, Tl_j, h_i \ge 0 \qquad \forall l \in j,\ k \in K \qquad (21)$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

در مدل مذکور، هدف (۱) کمینه‌سازی مجموعه هزینه‌های تأسیس انبار، هزینه تحویل

از انبار به مشتری، هزینه استفاده از وسیله نقلیه، هزینه تحویل از تولیدکننده به انبار، هزینه متغیر برای رسیدگی در انبار، جریمه‌های زودکرد و دیرکرد تحویل محصول به مشتری (به ترتیب) و هزینه تجاوز از شعاع خدمت‌رسانی بین تولیدکننده و توزیع‌کننده و از توزیع‌کننده به مشتری می‌باشد. هدف (۲) ماندگاری باقی‌مانده محصول رسیده به مشتری را حداکثر می‌کند. ماندگاری (عمر) باقی‌مانده یک محصول توسط جایی که تاریخ تکمیل این محصول است، ماندگاری محصول و تاریخ تحویل هر سفارش مشتری است، نشان داده می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده زمان دردسترس محصول برای استفاده مشتری می‌باشد.

محدودیت‌ها عبارتند از:

محدودیت (۳) تخصیص هر مشتری به یک مسیر را نشان می‌دهد. محدودیت (۴) بیان‌کننده این است که حداقل یه تور از هر مرکز توزیع خارج می‌شود. محدودیت (۵) محدودیت ظرفیت برای هر وسیله نقلیه را بیان می‌کند. محدودیت (۶) مجموعه محدودیت حذف زیرتور جدید را نشان می‌دهد. محدودیت (۷) محدودیت تعادل جریان است که تضمین می‌کند که یال‌های ورودی و خروجی به یک گره، ناشی از یک وسیله نقلیه برابر باشند. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه یک بار می‌تواند سرویس دهد. محدودیت (۹) بیانگر محدودیت ظرفیت برای مراکز توزیع می‌باشد. محدودیت (۱۰) بیان می‌کند که یک مشتری می‌تواند به یک مرکز توزیع اختصاص یابد تنها اگر یک مسیر از مرکز توزیع به سمت مشتری وجود داشته باشد. محدودیت (۱۱) رابطه تعادل بین کالای ارسالی از تولیدکننده و تقاضای مشتریان (مجموع تقاضای نسبت داده شده به هر انبار ). محدودیت (۱۲) زمان تحویل محصول به دست مشتری را بیان می‌کند. محدودیت (۱۳) و (۱۴) محدودیت نقض پنجره زمانی، زمانی که محصول به موقع به دست مشتری نرسد (زودکرد و دیرکرد). محدودیت (۱۵) و (۱۶) محدودیت‌های شعاع خدمت رسانی می‌باشد (یعنی اگر از شعاع مشخص شده تجاوز کند محصول خراب و غیر قابل استفاده برای مشتری می‌شود). محدودیت (۱۷) هرمشتری تنها به یک مرکز توزیع اختصاص می‌یابد. محدودیت (۱۸) و (۱۹) و (۲۰) متغیر تصمیم باینری که مقدار صفر یا یک می‌گیرند. محدودیت (۲۱) متغیر کمکی و متغیرهای تصمیم که مقدار مثبت می‌گیرند.

در اینجا محدودیت (۱۲) غیرخطی می‌باشد که به قرار ذیل، خطی‌سازی می‌شود.

$$a_j = \sum_{i \in I \cup J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \left( a_i + ST_i + \left( \frac{C_{ij}}{Sm} \right) \right) \qquad \forall j \in J \qquad (۲۱$$

$$\sum_{i\in I\cup J}\sum_{k\in K} x_{ijk}\left(a_i + ST_i + \left(\frac{C_{ij}}{Sm}\right)\right) \le a_j + M\left(1-\left(x_{ijk}\right)\right) \qquad \forall j \in J \qquad (۲۲$$

$$\sum_{i\in I\cup J}\sum_{k\in K} x_{ijk}\left(a_i + ST_i + \left(\frac{C_{ij}}{Sm}\right)\right) \ge a_j - M\left(1-\left(x_{ijk}\right)\right) \qquad \forall j \in J \qquad (۲۳$$

که در این پژوهش برای خطی‌سازی رابطه (۱۲)، محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) جایگزین رابطه (۱۲) شده‌اند.

## ۲-۳. روش حل پیشنهادی فراابتکاری

مسئله مکان‌یابی – مسیریابی ترکیبی از دو مسئله مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسایل نقلیه است. بر طبق تحقیقات کورنجولس و همکاران، کارپ و لنسترا و کن این دو مسئله ان پی هارد هستند. بنابراین، مسئله مکان‌یابی – مسیریابی نیز متعلق به کلاس ان پی هارد می‌باشد. هم‌چنین، پرل و داسکین، نشان دادند که مسائل مکان‌یابی –مسیریابی ان پی هارد هستند. با توجه به اینکه مسئله مکان‌یابی–مسیریابی بدون در نظر داشتن محدودیت‌های مسئله پیشنهادی در این مقاله، مسئله‌ای NP–hard است بنابراین مسئله معرفی شده نیز NP–hard بوده و حل دقیق آن در ابعاد بزرگ، سخت است. بنابراین در مواجهه با این مشکل یک الگوریتم فراابتکاری پیشنهاد می‌شود که در ادامه تشریح می‌شود.

### ۲-۳-۱. الگوریتم NSGA–II

دب و همکاران نسخه دوم الگوریتم ژنتیک دو هدفه را که در آن، علاوه بر کیفیت جواب‌ها، تنوع و گوناگونی جواب‌های بهینه پارتویی مدنظر قرار داده بودند، برای رفع نواقص نسخه اولیه توسعه دادند. در این الگوریتم، ابتدا کیفیت و سپس نظم مورد بررسی قرار می‌گیرند. الگوریتم NSGA–II دارای دو فاز شناخته شده می‌باشد، فاز اول از معیار رتبه‌بندی و مفهوم غلبه استفاده کرده و فاز دوم که مربوط به نظم آن‌هاست از فاصله ازدحامی استفاده می‌کند.

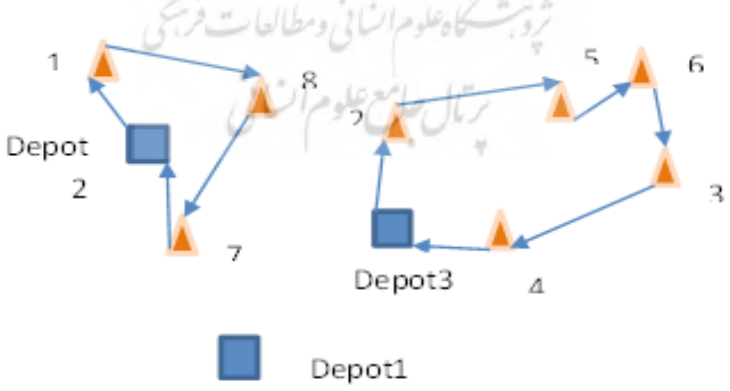
#### ۲-۳-۱-۱. نحوه نمایش جواب

در این روش مهمترین موضوع، انتخاب یک نمایش جواب مناسب برای مسئله است. نمایش جواب برای الگوریتم فراابتکاری تحقیق حاضر به صورتی که در شکل (۱) نشان داده شده است، تعریف می‌گردد.

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۹ | ۲ | ۵ | ۶ | ۳ | ۴ | ۱۰ | ۱ | ۸ | ۷ |
| ۳ | ۱ | ۲ | | | | | | | |

**شکل ۱ـ نمایش جواب برای الگوریتم فراابتکاری**

اگر ndep تعداد انبارها و ncus تعداد مشتریان باشد؛ در این نمایش جواب، ابتدا جایگشتی از اعداد ۱ تا ndep+ncus-1 به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس به مقادیر اعداد تولید شده، مقدار ndep اضافه خواهد شد تا در نمایش جواب فقط شماره مشتریان وجود داشته باشد. به این ترتیب ndep-1 ژن با مقدار بزرگتر به عنوان جداکننده انبارها استفاده می‌شوند. یعنی اولین ژن از سمت چپ که یکی از این مقادیر را گرفته باشد تمامی ژن‌های قبل از آن به عنوان مشتریان اختصاص‌یافته به انبار اول در نظر گرفته می‌شوند و همینطور ادامه می‌یابد. حال اگر دو تا از مقادیر مذکور کنار هم باشند، به این معنی است که انبار تاسیس نشده است. همچنین در بخش دوم نمایش جواب، جایگشتی تصادفی از وسائل نقلیه در نظر گرفته شده و تورهای تشکیل شده به ترتیب با این وسائل سرویس‌دهی می‌شوند. پس اگر مثالی با سه انبار و هشت مشتری داشته باشیم، از کروموزوم بالا می‌توان به این نتیجه رسید که انبار اول تاسیس نشده اما انبار دوم و سوم تاسیس شده و به ترتیب مشتری‌های ۴-۳-۶-۵-۲ و همچنین ۷-۸-۱ به آن‌ها اختصاص یافته‌اند و به‌ترتیب با وسائل نقلیه شماره ۳ و ۱ سرویس‌دهی خواهند شد که گراف مربوط به این مثال در شکل (۲) آمده است.




**شکل ۲ـ نمایش گرافیکی کروموزوم شکل ۸**

در تحقیق حاضر، به منظور جلوگیری از تولید جواب‌های غیر موجه از تکنیک تخصیص جریمه یا پنالتی به محدودیت‌ها استفاده شده است. به این منظور به میزان تخطی محدودیت‌های ظرفیت ماشین و همچنین ظرفیت انبار جریمه‌ای به آن‌ها تخصیص یافته و به تابع هدف اول که از نوع کمینه‌سازی است اضافه می‌گردد.

**۲-۳-۱-۲. جمعیت اولیه**

در این پژوهش، جمعیت اولیه به صورت کاملاً تصادفی تولید می‌شود. به این منظور، ماتریسی با اندازه pop×( ndep+ncus-1) تولید می‌شود. در این ماتریس هر یک از سطرها نشان‌دهنده یکی از جواب‌های مسئله می‌باشد و به صورت جایگشتی از اعداد است و عدد تکراری در آن وجود ندارد.

**۲-۳-۱-۳. عملگرهای ژنتیکی**

عملگرهای ژنتیکی در انواع الگوریتم‌های ژنتیک حائز اهمیت بالایی هستند. دلیل اهمیت این عملگرها به این خاطر است که سبب هدایت الگوریتم به سمت جواب‌های بهتر و در نهایت جواب بهینه می‌شوند.

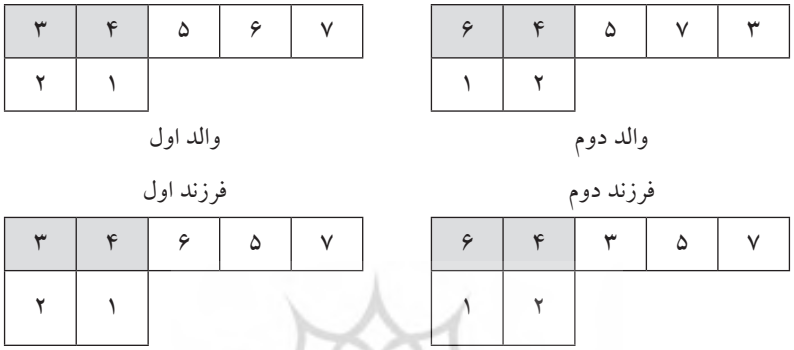
**۲-۳-۱-۴. عملگر همگذری**

عملگر همگذری فرایندی است که در آن با ترکیب ژنتیکی کروموزوم‌های دو والد، یک جواب جدید تولید می‌شود. هدف از ترکیب دو کروموزوم والد، دستیابی به یک کروموزوم بهتر است، به‌طوریکه بخشی از ویژگی‌های والد به فرزندان منتقل شود.

در این پژوهش، از عملگر همگذری یک نقطه‌ای[1] برای نمایش جواب جایگشتی طبق تحقیق آندریکا و چیرا[2] استفاده شده است. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌کنید، در این نوع همگذری که مخصوص نمایش جواب جایگشتی است، به این صورت عمل می‌شود که ابتدا یک ژن به تصادف انتخاب شده و تمامی ژن‌های ماقبل آن از والد اول به فرزند اول منتقل می‌شوند؛ مابقی ژن‌های فرزند اول، از والد دوم منتقل می‌شوند اما به صورتی که از ژن‌های والد اول در بین آن‌ها نباشد و ژن تکراری به وجود نیاید. برای تولید

1. One-point crossover
2. Andreica, (2015).

فرزند دوم، همین عمل به صورت برعکس انجام می‌شود و این بار ژن‌های اولیه و ماقبل ژن انتخاب‌شده از والد دوم منتقل می‌شوند. در این همگذری، بخش دوم کروموزوم‌ها تغییری نمی‌کند و در فرزندان و والدین ثابت باقی می‌ماند. در شکل (۳)، فرض بر این است که دو انبار و چهار مشتری وجود دارد و ژن دوم به تصادف برای عمل همگذری انتخاب شده است.

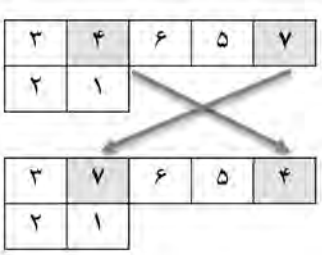



**شکل ۳ـ نمایش همگذری یک نقطه‌ای برای نمایش جواب**

### ۲-۳-۱-۵. عملگر جهش

فرآیند جهش به‌گونه‌ای می‌باشد که در طی آن فرزندان دارای خصوصیاتی می‌شوند که متعلق به هیچ‌کدام از والدین نمی‌باشد. هدف از عملگر جهش، متنوع‌سازی[1] جواب‌های روند جستجو، به‌طوری‌که جواب‌های جدیدی را بیابیم که نتوانیم آن‌ها را در همسایگی‌های نزدیک جواب موجود پیدا کنیم و برای فرار از دام بهینه محلی[2] می‌باشد. عملگر جهش همواره تصادفی است و هدف آن جستجوی نقاط بیشتری از فضای جواب و اجتناب از همگرایی سریع است. در این تحقیق، از عملگر جهش جابه‌جایی تصادفی استفاده می‌شود که توالی سرویس‌دهی به مشتریان را به تصادف به‌هم می‌ریزد. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می‌کنید، ابتدا دو ژن به تصادف انتخاب شده‌اند و سپس مقادیر آن‌ها باهم جابجا شده است. در عملگر جهش نیز، بخش دوم کروموزوم ثابت مانده و تغییری نمی‌کند.

1. 2. Diversification
2. 3. Local Optimum




**شکل ٤ـ نمایش عملگر جهش تغییر توالی**

### ۲-۳-۱-۶. رمزگشایی جواب‌ها

برای هر کروموزوم در جمعیت فعلی الگوریتم، ابتدا ndep-1 ژن با بزرگترین مقادیر در کروموزوم شناسایی شده و تورهای میان آن‌ها و همچنین انبارهای تأسیس شده به صورتی که پیش‌تر در نمایش جواب توضیح داده شد، مشخص می‌گردد. پس از مشخص شدن انبارهای تأسیس‌شده و مشتری‌های اختصاص داده شده به هر یک و ترتیب سرویس‌دهی به آن‌ها به راحتی می‌توان مقادیر توابع هدف را محاسبه کرد.

### ۲-۳-۱-۷. انتخاب بازماندگان و شرط توقف

برای انتخاب بازماندگان، طبق روند رایج در الگوریتم فراابتکاری NSGA–II عمل شده و از نخبه‌گرایی استفاده می‌شود. یعنی جواب‌های بهتر از جبهه‌های نامغلوب اولیه به نسل جدید منتقل می‌شوند. همچنین برای معیار توقف الگوریتم و گزارش جواب‌ها از حداکثر تعداد تکرار حلقه اصلی الگوریتم و تغییر نسل استفاده شده است.

## ۲-۴. تولید مسائل نمونه و تنظیم پارامترها

در این تحقیق، به منظور دسته‌بندی مثال‌ها و مشخص کردن ابعاد مسئله، از کدبندی زیر استفاده شده است. اگر i نشان‌دهنده تعداد انبارها و j نشان‌دهنده تعداد مشتریان باشد و همچنین k تعداد وسائل نقلیه را نشان دهد، i-j-k نشان‌دهنده یکی از مسائل نمونه خواهد بود. به طور مثال کد ۲-۴-۲، بیانگر مسئله نمونه‌ای با یک تأمین‌کننده، دو انبار، چهار مشتری و دو وسیله نقلیه می‌باشد. برای تنظیم پارامترهای الگوریتم، برای هر یک از آن‌ها سه سطح به صورتی که در جدول (۱) آمده است، در نظر گرفته شده و پس از آزمایش‌های مختلف

بهترین مقادیر از نظر زمان حل و تعداد نقاط پارتو گزارش شده است. کلیه محاسباتی که از این پس می‌آید، برروی رایانه، همراه با پردازنده core i7 2GHz و با حافظه داخلی 8 GB انجام شده است. الگوریتم فراابتکاری نیز در محیط نرم‌افزار متلب کد شده است. روش محدودیت اپسیلون تکامل‌یافته نیز در محیط نرم‌افزار GAMS کد شده و از حل‌کننده BARON[1] استفاده شده است.

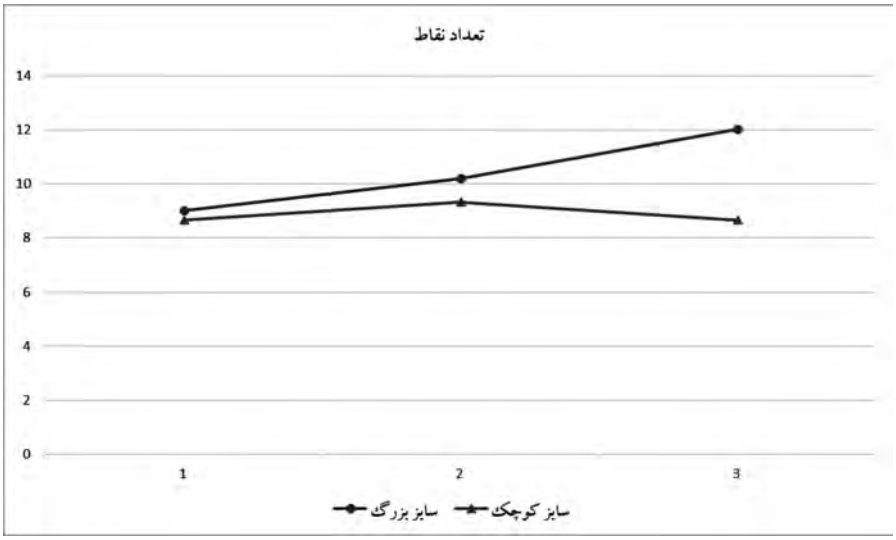
**جدول ۱ـ سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم فراابتکاری**

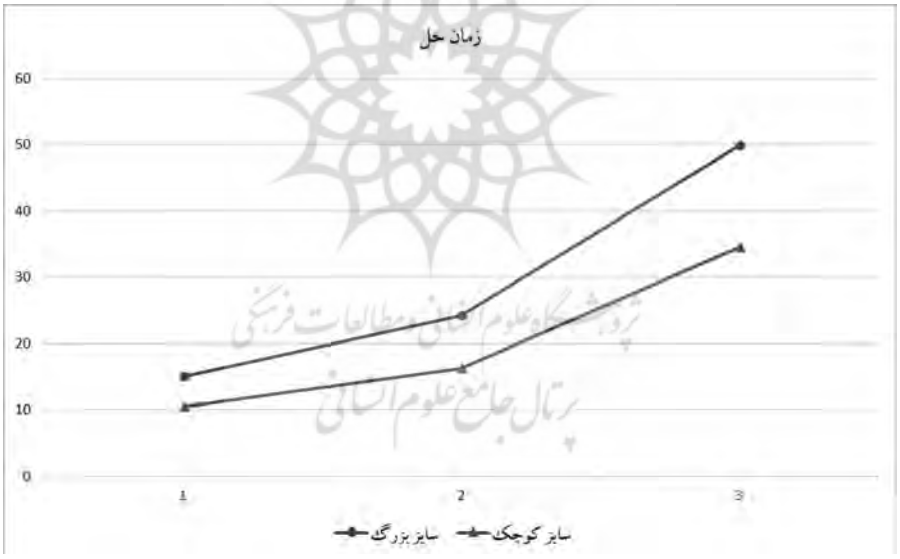
| پارامتر | سطح | | |
|---|---|---|---|
| جمعیت | ۳۰ | ۵۰ | ۱۰۰ |
| حداکثر تکرار | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۳۰۰ |
| نرخ جهش | ۰,۱ | ۰,۳ | ۰,۴ |
| نرخ همگذری | ۰,۶ | ۰,۷ | ۰,۹ |

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم، ابتدا با آزمون و خطا یک سطح پایه برای هر یک در نظر گرفته شده است. سپس برای تحلیل حساسیت بر روی هر یک از پارامترها و تأثیر آن بر روی کیفیت جواب‌های به‌دست آمده، تنها پارامتر مذکور درحالی‌که پارامترهای دیگر در همان سطح پایه خود قرار دارند، بر روی سطوح خود تغییر می‌کند.

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌کنید، افزایش جمعیت تأثیر زیادی بر روی تعداد نقاط پارتویی ندارد، در حالی که زمان حل را به طرز محسوس افزایش می‌دهد.

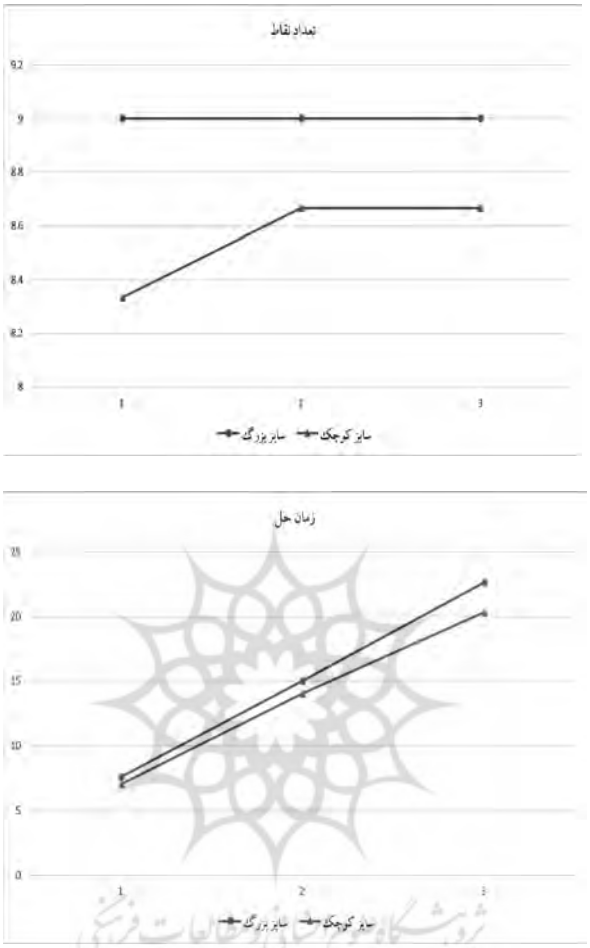
1. Branch and Reduce Optimization Navigator (BARON)




پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

**شکل (۵)ـ تعداد نقاط پارتویی به‌دست آمده**
**و زمان حل الگوریتم برای سطوح مختلف پارامتر جمعیت**




**شکل ۶ـ تعداد نقاط پارتویی و زمان حل برای سطوح مختلف پارامتر تکرار**

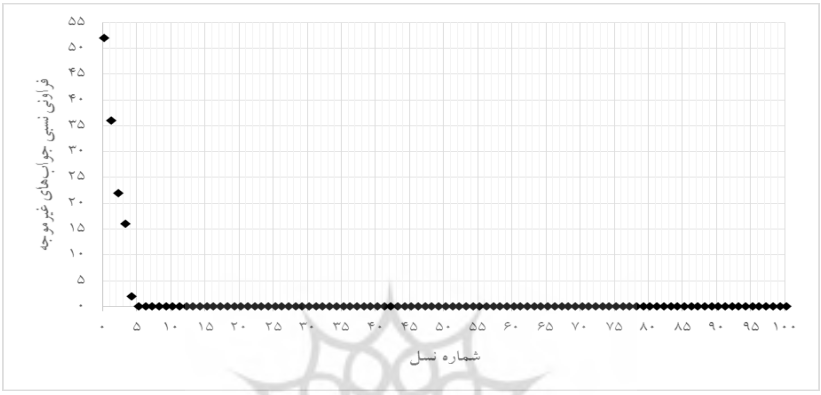
در شکل (۶)، با بیشتر شدن تعداد تکرارهای حلقه اصلی، زمان حل افزایش چشمگیری خواهد داشت اما بر روی نقاط تأثیر آن‌چنانی ندارد و تنها در مثال‌های کوچک کمی مؤثر است.

همان طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌کنید، سطوح مختلف جهش و همگذری تأثیر چندانی بر روی الگوریتم فراابتکاری از لحاظ تعداد نقاط پارتو ندارند، ولی پارامتر تکرار بر روی زمان حل الگوریتم فراابتکاری تأثیر محسوسی دارد و با افزایش تکرار تغییر نسل در الگوریتم زمان حل آن نیز افزایش می‌یابد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

**شکل ۷ـ تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای جهش و همگذری**

در این تحقیق، به منظور ممانعت از تولید جواب‌های غیر موجه در تکرار نسل‌های الگوریتم و همگرایی به سمت جواب‌های موجه و رعایت محدودیت ظرفیت وسائل نقلیه و ظرفیت انبارها از تخصیص جریمه به جواب‌های غیرموجه استفاده شده است. در شکل (۸) می‌توان روند همگرایی به سمت فضای موجه برای الگوریتم را مشاهده نمود. این نمودار




**شکل ۸ـ روند همگرایی الگوریتم به سمت جواب‌های موجه**

نشان‌دهنده فراوانی نسبی جواب‌های غیرموجه موجود در جمعیت آن نسل می‌باشد.

با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته، تصمیم بر آن شد که پارامترهای الگوریتم فراابتکاری طبق جدول (۲) تنظیم شوند.

**جدول ۲ـ مقادیر پارامترهای الگوریتم فراابتکاری**

| | | | |
|---|---|---|---|
| جمعیت | ۵۰ | نرخ جهش | ۰/۳ |
| تکرار | ۱۰۰ | نرخ همگذری | ۰/۷ |
| جریمه تخطی از ظرفیت ماشین | میانگین ظرفیت ماشین‌ها | جریمه تخطی از ظرفیت انبار | میانگین ظرفیت انبارها |

## ۲-۵. بررسی کارایی الگوریتم حل پیشنهادی

پس از تنظیم پارامترهای الگوریتم فراابتکاری، به حل چندین مسئله نمونه پرداخته شد تا کارآیی الگوریتم پیشنهادی سنجیده شود. در ادامه و در جداول جداگانه‌ای انواع مسائل

نمونه حل‌شده و مقایسه مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری با شاخص‌های مختلف را مشاهده می‌کنید.

**جدول ۳ـ مقایسه جواب‌های الگوریتم فراابتکاری و مدل ریاضی**

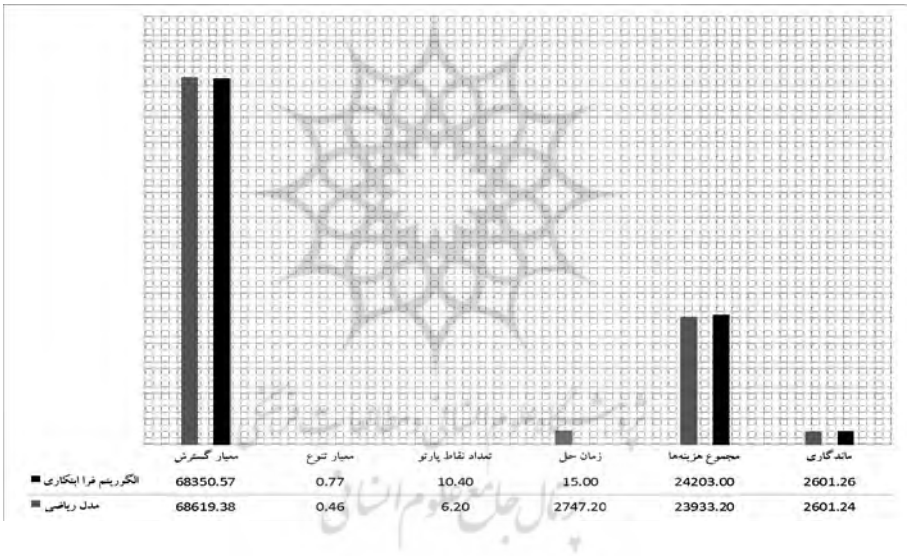
| کد مثال | معیار گسترش | | معیار تنوع | | تعداد جواب‌های پارتو | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری |
| ۲-۳-۲ | ۳۳۳۰۳/۹۳ | ۳۳۳۰۳/۹۳ | ۰/۴۴ | ۰/۶۰ | ۶ | ۷ |
| ۲-۴-۲ | ۴۹۴۲۰/۵۷ | ۴۹۴۲۰/۵۷ | ۰/۴۳ | ۰/۶۰ | ۸ | ۱۰ |
| ۳-۴-۳ | ۴۵۶۵۶/۹۹ | ۴۵۶۵۶/۹۹ | ۰/۳۸ | ۰/۹۰ | ۶ | ۱۱ |
| ۲-۵-۲ | ۸۶۰۹۲/۱۸ | ۸۶۱۱۸/۱۸ | ۰/۳۲ | ۰/۸۷ | ۸ | ۱۱ |
| ۲-۶-۲ | ۱۲۷۲۴۷/۱۶ | ۱۲۸۶۱۹/۰۰ | ۰/۶۶ | ۰/۷۵ | ۳ | ۱۳ |
| ۳-۶-۳ | – | ۶۸۲۳۹/۶۱ | – | ۰/۷۴ | – | ۱۰ |
| ۳-۸-۳ | – | ۵۰۵۴۲/۸۴ | – | ۰/۴۷ | – | ۷ |
| ۴-۸-۴ | – | ۵۴۲۱۳/۱۶ | – | ۰/۶۳ | – | ۷ |
| ۵-۱۰-۵ | – | ۹۳۵۷۶/۲۰ | – | ۰/۹۰ | – | ۲۳ |
| ۷-۱۵-۷ | – | ۷۲۸۱۴/۳۸ | – | ۰/۶۶ | – | ۱۳ |

**جدول ٤ـ مقایسه جواب‌های الگوریتم فراابتکاری و مدل ریاضی با شاخص‌های دیگر**

| کد مثال | زمان حل (ثانیه) | | کمترین مجموع هزینه | | بیشترین ماندگاری | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری |
| ۲-۳-۲ | ۲۸ | ۱۵ | ۱۰۷۰۸/۰۰ | ۱۰۷۰۸/۰۰ | ۲۴۴۴/۹۹ | ۲۴۴۵ |
| ۲-۴-۲ | ۱۷۷ | ۱۵ | ۱۴۷۳۵/۰۰ | ۱۴۷۳۵/۰۰ | ۲۳۳۰/۰۰ | ۲۳۳۰/۰۰ |
| ۳-۴-۳ | ۳۸۳۱ | ۱۵ | ۱۱۹۹۱/۰۰ | ۱۱۹۹۱/۰۰ | ۳۸۲۹/۹۹ | ۳۸۳۰/۰۰ |
| ۲-۵-۲ | ۳۸۵۹ | ۱۵ | ۲۲۴۴۰/۰۰ | ۲۲۴۴/۰۰ | ۲۲۴۴/۹۹ | ۲۲۴۵/۰۰ |
| ۲-۶-۲ | ۵۸۴۱ | ۱۵ | ۵۹۷۹۲/۰۰ | ۶۱۱۴۱/۰۰ | ۲۱۵۶/۲۴ | ۲۱۵۶/۳۰ |
| ۳-۶-۳ | ۷۲۰۰ | ۱۵ | – | ۳۱۶۷۷/۰۰ | – | ۳۶۶۲/۰۰ |

| کد مثال | زمان حل (ثانیه) | | کمترین مجموع هزینه | | بیشترین ماندگاری | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری | مدل ریاضی | الگوریتم فراابتکاری |
| ۳-۸-۳ | ۷۲۰۰ | ۱۶ | – | ۴۷۴۹۴/۰۰ | – | ۳۴۵۰/۰۰ |
| ۴-۸-۴ | ۷۲۰۰ | ۱۵ | – | ۱۰۰۷۰۳/۰۰ | – | ۴۲۸۵/۰۰ |
| ۵-۱۰-۵ | ۷۲۰۰ | ۱۶ | – | ۲۳۲۸۴۴/۰۰ | – | ۴۴۳۶/۰۰ |
| ۷-۱۵-۷ | ۷۲۰۰ | ۱۶ | – | ۲۴۲۳۵۶/۰۰ | – | ۴۶۷۸/۰۰ |

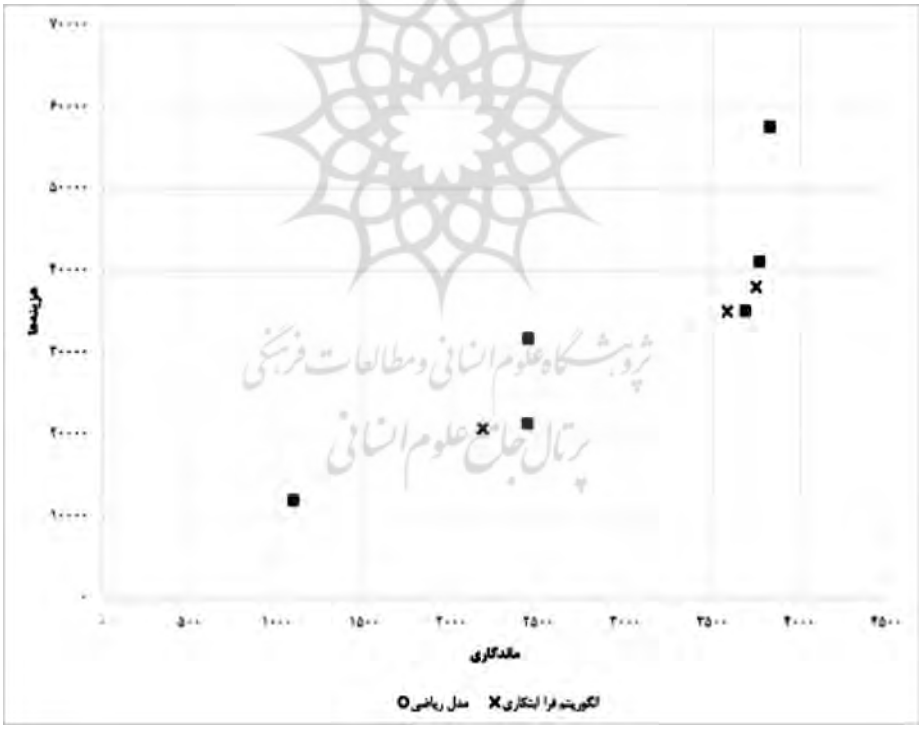
برای مقایسه راحت‌تر و درک بهتر کارآیی الگوریتم میانگین شاخص‌ها برای هر یک از دو روش حل در شکل (۹) آمده است.



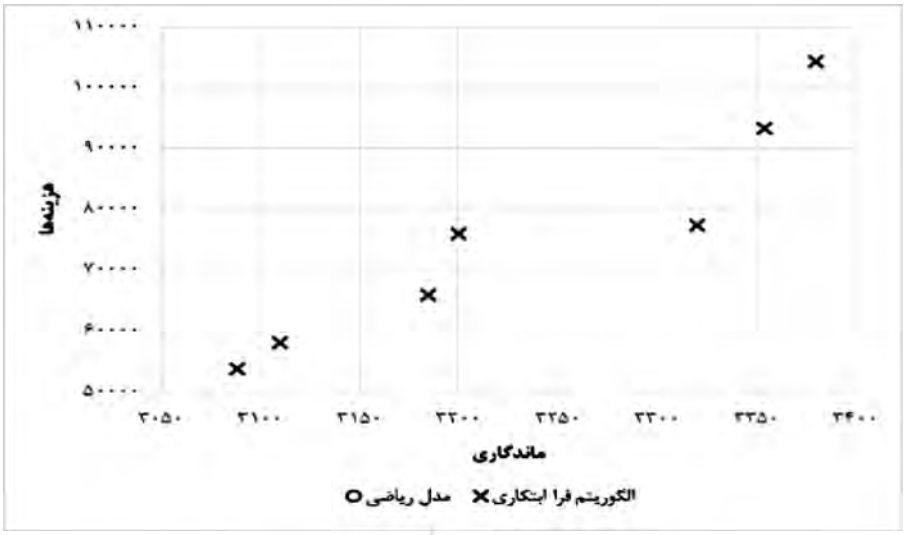

**شکل ۹ـ مقایسه کلی شاخص‌ها**

از نمودارها، جداول و شکل‌هایی که در بخش‌های قبلی ارائه گردید، می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم فراابتکاری در زمان بسیار کمتری به کیفیت قابل قبولی از جواب‌های پارتویی می‌رسد و با توجه به شکل (۱۰) که برای مثالی با سه مرکز توزیع و چهار مشتری حل شده است، می‌توان دید که جبهه پارتوی محاسبه شده از طریق الگوریتم فراابتکاری در اندازه‌های کوچک مسائل نمونه، نزدیک به جبهه پارتویی دقیق محاسبه شده

توسط مدل ریاضی است. از نتایج حاصل از حل مسائل نمونه با الگوریتم فراابتکاری و مقایسه آن‌ها با نتایج حاصل از مدل ریاضی این نتیجه حاصل شد که الگوریتم توسعه داده شده کارایی بالایی دارد و می‌تواند در زمان خیلی کمتری به کیفیت قابل قبولی از مجموعه جواب‌های پارتویی برسد. در تمامی مسائل نمونه، الگوریتم جواب‌های پارتوی بیشتری از مدل ریاضی به‌دست آورده است؛ همچنین در اکثر این مسائل نمونه الگوریتم فراابتکاری در معیار گسترش نیز اندکی بهتر از مدل ریاضی عمل کرده است. به استقراء می‌توان به این نتیجه رسید که در اندازه‌های بزرگ که مدل ریاضی و روش محدودیت اپسیلون قادر به حل مسئله و ارائه جبهه پارتویی در کمتر از زمان ۷۲۰۰ ثانیه نمی‌باشند نیز الگوریتم فراابتکاری کارآیی داشته و به خوبی جواب‌های پارتویی را ارائه می‌دهد که این امر در شکل (۱۱) قابل مشاهده می‌باشد.




**شکل ۱۰. محاسبه جبهه دقیق پارتویی توسط الگوریتم فرا ابتکاری برای یک مثال عددی**




**شکل ۱۱ـ محاسبه جبهه پارتویی توسط الگوریتم فرا ابتکاری برای یک مثال عددی با ۱۱ گره**

## ۴-۵. توصیه‌های سیاستی و کاربردی

- توجه به افزایش عمر ماندگاری محصولات فاسدشدنی در کنار توجه به کاهش هزینه‌ها، باعث بهبود عملکرد مالی شرکت‌ها و افزایش کیفیت خدمات می‌شود. از اینرو می‌توان به شرکت‌های تولید و توزیع مواد فاسدشدنی پیشنهاد کرد که توجه به این دو جنبه را جایگزین نگرش سنتی کنند که در آن بیشتر به هزینه‌های سیستم توجه می‌شود.
- از آنجائیکه افزایش سطح خدمت در زنجیره‌تأمین، باعث افزایش رضایت مشتریان می‌شود، حرکت به سمت افزایش عمر ماندگاری محصولات در کنار کاهش هزینه‌های سیستم می‌تواند سطح خدمت را افزایش داده و رضایت مشتریان از شرکت ارائه‌دهنده خدمات را بیشتر کند. از اینرو، می‌توان به شرکت‌های تولید و توزیع محصولات فاسدشدنی پیشنهاد کرد که برای بهبود عملکرد در خدمت‌رسانی به مشتری، توجه به عمر ماندگاری محصولات را در کنار توجه به کاهش هزینه‌های سیستم، مدنظر قرار دهند.

- با توجه به رقابتی بودن ارائه خدمات به مشتریان، افزایش عمر ماندگاری محصولات توأم با کاهش هزینه‌های شرکت ارائه‌دهنده خدمت، باعث ایجاد مزیت رقابتی می‌شود. بنابراین، به شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات پیشنهاد می‌شود که به این امر توجه کنند و علاوه بر افزایش سطح خدمت و بهبود عملکرد، از افزایش ارزش و مزیت رقابتی نیز برخوردار شوند.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، یک توسعه جدید در مسائل مکان‌یابی-مسیریابی مواد فاسدشدنی ارائه شد. مدل ارائه شده بر ماندگاری محصول رسیده به دست مشتری و همزمان کاهش هزینه‌ها تاکید دارد. همچنین محدودیت زمانی برای ارائه خدمات به مشتریان در نظر گرفته شد. برای حل این مدل از روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده استفاده شد. سپس روش فراابتکاری ژنتیک دوهدفه ارائه شد و در نهایت برای ارزیابی مسئله مطرح شده، تعدادی مسئله نمونه در ابعاد کوچک و متوسط با استفاده از نرم‌افزار متلب و الگوریتم پیشنهادی حل شد که با توجه به ارزیابی چندین معیار، نتایج حاکی از موثر بودن الگوریتم از لحاظ زمان محاسباتی و کیفیت جواب است. پژوهش از چند نظر قابل گسترش و بهبود می‌باشد. تقویت مدل ریاضی با درنظر گرفتن شرایط عدم قطعیت برای برخی از پارامترهای مسأله، به‌کار بردن دیگر روش‌های فراابتکاری مانند کلونی مورچگان و ازدحام ذرات و مقایسه آن‌ها با الگوریتم ژنتیک چندهدفه، بررسی محصولات با عمر متغیر، در نظر گرفتن ترافیک (ازدحام در مسیرها) و استفاده از تئوری صف، در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی، کمینه‌سازی ریسک زنجیره به عنوان جهت‌های تحقیقاتی پیشنهاد می‌شود.

## منابع

محمدی شاد، ع.ر.، فتاحی، پ.، (۲۰۱۲). یک روش فراابتکاری ترکیبی برای مسئله مکان‌یابی-مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی سخت. نشریه مهندسی صنایع، ۴۶(۲): صفحه ۲۱۹-۲۳۳.

Amorim, P., H.-O. Günther, and B. (2012). Almada-Lobo, Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. International Journal of Production Economics, 138(1): p. 89-101.

Andreica, A. and C. Chira, (2015). Best-order crossover for permutation-based evolutionary algorithms. Applied Intelligence, 42(4): p. 751-776.

Chao, C., Zhihui, T., & Baozhen, Y. (2017). Optimization of two-stage location–routing–inventory problem with time-windows in food distribution network. Annals of Operations Research, 1-24.

Christopher, M. (2016). Logistics & Supply Chain Management. Pearson UK.

Cornuejols, G., Fisher, M. L., & Nemhauser, G. L. (1977). Exceptional paper—Location of bank accounts to optimize float: An analytic study of exact and approximate algorithms. Management Science, 23(8), 789-810.

Daofang, C., Z. Jinfeng, and L. Danping, (2015 ). Cold chain logistics distribution network planning subjected to cost constraints. International Journal of Advanced Science and Technology. 75: p. 1-10.

Deb, K., Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. A. M. T., (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2): p. 182-197.

Derens-Bertheau, E., et al., (2015). Cold chain of chilled food in France. International Journal of Refrigeration, 52: p. 161-167.

Drexl, M., Schneider, M., (2015). "A survey of variants and extensions of the location-routing problem", European Journal of Operational Research, 241, 283–308.

Ghezavati, V. R., & Beigi, M. (2016). Solving a bi-objective mathematical model for location-routing problem with time windows in multi-echelon reverse logistics using metaheuristic procedure. Journal of Industrial Engineering International, 12(4), 469-483.

Govindan, K., A. Jafarian, and R. Khodaverdi, (2014). Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. International Journal of Production Economics, 152: p. 9-28.

Farrokhi-Asl, H., Tavakkoli-Moghaddam, R., Asgarian, B., & Sangari, E. (2017). Metaheuristics for a bi-objective location-routing-problem in waste collection management. Journal of Industrial and Production Engineering, 34(4), 239-252.

Han, J., C. Lee, and S. Park, (2013). A robust scenario approach for the vehicle routing problem with uncertain travel times. Transportation Science, 48(3): p. 373-390.

Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. Journal of Manufacturing Systems, 42, 93-103.

Hsu, C.-I. and S. Feng, (2003), Vehicle routing problem for distributing refrigerated food. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 5: p. 2261-2272.

Hsu, C.-I., S.-F. Hung, and H.-C. Li, (2007 ), Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery. Journal of Food Engineering, 80(2): p. 465-475.

Hugos, M.H., (2011). Essentials of Supply Chain Management. Vol. 62.: John Wiley & Sons.

Karp, R. M. (1972). Reducibility among combinatorial problems. In Complexity of Computer Computations (pp. 85-103). Springer, Boston, MA.

Laporte, G. and Y. Nobert, (1981), An exact algorithm for minimizing routing and operating costs in depot location. European Journal of Operational Research. 6(2): p. 224-226.

Lenstra, J. K., & Kan, A. R. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. Networks, 11(2), 221-227.

Li, K. (2016). A new discrete particle swarm optimization for location inventory routing problem in cold logistics. Revista de la Facultad de Ingeniería, 31(5).

Lopes, R. B., Ferreira, C., Santos, B. S., Barreto, S., (2013). "A taxonomical analysis, current methods and objectives on location–routing problems", International Transportation Operational Research, 20, 795–822.

Min, H., V. Jayaraman, and R. Srivastava, (1998 ).Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions. European Journal of Operational Research,. 108(1): p. 1-15.

Moghaddam, R.T., A.M. Zohrevand, and K. Rafiee, (2012). Solving a New Mathematical Model for a Periodic Vehicle Routing Problem by Particle Swarm Optimization. Transportation Research, 2(1): p. 77.

Nahmias, S., (1982 ), Perishable inventory theory: A review. Operations Research, 30(4): p. 680-708.

Nagy, G. and S. Salhi, (2007). Location-routing: Issues, models and methods. European Journal of Operational Research, 177(2): p. 649-672.

Nikbakhsh, E. and S. Zegordi, (2010). A heuristic algorithm and a lower bound for the two-echelon location-routing problem with soft time window constraints. Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering, 17(1): p. 36.

Osvald, A. and L.Z. Stirn, (2008 ). A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. Journal of Food Engineering, 85(2): p. 285-295.

Perl, J., & Daskin, M. S. (1985). A warehouse location-routing problem. Transportation Research Part B: Methodological, 19(5), 381-396.

Prodhon, C., Prins, C., (2014). "A survey of recent research on location-routing problems", European Journal of Operational Research, 238, 1–17.

Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S. H. R., & Naderi, B. (2018). Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation algorithm. Computers & Chemical Engineering, 109, 9-2

Song, B.D. and Y.D. Ko, (2016 ). A vehicle routing problem of both refrigerated-and general-type vehicles for perishable food products delivery. Journal of Food Engineering, 169: p. 61-71.

Tavakkoli-Moghaddam, R., & Raziei, Z. (2016). A new bi-objective location-routing-inventory problem with fuzzy demands. IFAC-Papers Online, 49(12), 1116-1121.

Tuzun, D. and L.I. Burke, (1999). A two-phase tabu search approach to the location routing problem. European Journal of Operational Research, 116(1): p. 87-99.

Vidović, M., Ratković, B., Bjelić, N., & Popović, D. (2016). A two-echelon location-routing model for designing recycling logistics networks with profit: MILP and heuristic approach. Expert Systems with Applications, 51, 34-48.

Vincent, F. Yu., Lin, S. W., Lee, W., & Ting, C. J. (2010). A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. Computers & Industrial Engineering, 58(2), 288-299.

Wang, S., Tao, F., & Shi, Y. (2018). Optimization of Location-Routing Problem for Cold Chain Logistics Considering Carbon Footprint. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(1), 86.

Wu, T.-H., C. Low, and J.-W. Bai, (2002). Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. Computers & Operations Research, 29(10): p. 1393-1415.

Zarandi, M. H. F., Hemmati, A., & Davari, S. (2011). The multi-depot capacitated location-routing problem with fuzzy travel times. Expert Systems with Applications, 38(8), 10075-10084.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی