

مدل برنامه‌ریزی دو هدفه امکانی برای زمان‌بندی کامیون‌ها در یک سیستم انبار متقاطع با در نظر گرفتن اثر یادگیری و میزان انتشار کربن

سپیده صفرخانی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

sepideh.safarkhani@shahed.ac.ir

سید میثم موسوی^۱

استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

sm.mousavi@shahed.ac.ir

محسن رجب‌زاده

دکتر، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

m.rajabzadeh@shahed.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، یک مدل جدید برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای زمان‌بندی کامیون‌ها در یک سیستم انبار متقاطع ارائه می‌شود. با توجه به اهمیت عامل یادگیری نیروی انسانی بر زمان انجام عملیات، اثر یادگیری نیروی انسانی و کاهش زمان عملیات در نتیجه تکرار آن در نظر گرفته می‌شود. اهداف مدل ارائه شده، کمینه‌سازی هم‌زمان میزان انتشار کربن و زمان کل عملیات است. در این مدل میزان انتشار کربن حاصل از جابه‌جایی کالاها با ارائه تابع هدف توسعه یافته محاسبه می‌شود. به منظور مواجهه با عدم قطعیت موجود در برخی از پارامترهای مسئله، از اعداد فازی مثلثی جهت مدل‌سازی و در نظر گرفتن عدم قطعیت استفاده می‌شود و مدل برنامه‌ریزی امکانی دوهدفه ارائه شده با استفاده از یک روش برنامه‌ریزی آرمانی توسعه یافته حل می‌شود. کارایی مدل و رویکرد حل پیشنهادی با پیاده‌سازی یک مثال کاربردی بررسی می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با در نظر گرفتن اثر یادگیری نیروی انسانی مبتنی بر موقعیت زمان کل عملیات ۱۵.۲٪ کاهش می‌یابد و با بهره‌گیری از تابع هدف پیشنهادی کمینه‌سازی میزان انتشار کربن، مقدار کربن حاصل از عملیات درون انبار می‌تواند تا ۷۵٪ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: زمان‌بندی انبار متقاطع؛ اثر یادگیری؛ انتشار کربن؛ عدم قطعیت فازی امکانی؛ برنامه‌ریزی آرمانی توسعه یافته

^۱ نویسنده مسئول

A probabilistic bi-objective scheduling model for truck scheduling in a cross-docking system considering learning effect and carbon emissions

S. Safarkhani, sepideh.safarkhani@shahed.ac.ir

M.Sc. Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

S. M. Mousavi, (corresponding author), sm.mousavi@shahed.ac.ir

Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

M. Rajabzadeh, m.rajabzadeh@shahed.ac.ir

Ph.D., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

Abstract

In this research, a new bi-objective mixed integer nonlinear programming model is presented for truck scheduling in a cross-docking warehouse system. Considering the importance of the learning factor of human resources on the operation time, the effect of human resources learning and reducing the operation time as a result of its repetition are considered. The model objectives are to minimize both the makespan and carbon emissions simultaneously. In this model, the amount of carbon emissions resulting from the movement of goods is calculated by presenting an expanded objective function. In order to deal with the uncertainty in some of the problem parameters, triangular fuzzy numbers are used to model and consider uncertainty, and the presented bi-objective possibilistic programming model is solved using the developed goal programming method. The effectiveness of the proposed model and solution approach was analyzed by implementing an applied example. The results showed that by considering the effect of position-based human learning, the makespan is reduced by 15.2% and by using the proposed objective function to minimize the amount of carbon emission, the amount of carbon resulting from operations in the warehouse can be reduced by 75%.

Keywords: Cross-docking Scheduling; Learning effects; Carbon emissions; Fuzzy uncertainty; Enhanced goal programming.

۱. مقدمه

انبارمقاطع^۲ یک استراتژی نوین، برای پاسخ‌گویی سریع به تقاضای تأمین‌کنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان است. با حذف ذخیره‌سازی کالاها و انتقال مستقیم آن‌ها از تأمین‌کنندگان به مشتریان، هزینه‌های فرآیند حمل‌ونقل و انبارداری کاهش می‌یابد^[۳-۱]. انبارمقاطع با جمع‌آوری سریع کالاها از منابع مختلف و تکمیل ظرفیت وسایل نقلیه، عملیات توزیع و سیستم حمل‌ونقل را بهبود می‌دهد و از اثرات منفی متعدد مانند تراکم ترافیک، افزایش مصرف انرژی و انتشار آلاینده جلوگیری می‌نماید^[۴،۲].

زمان‌بندی کامیون، یکی از مسائل پایانه‌های انبارمقاطع است که در آن فعالیت‌ها در دفعات و موقعیت‌های^۳ متعددی با به‌کارگیری نیروی انسانی و ماشین‌آلات انجام می‌شود^[۱،۲،۵]. نیروی انسانی، می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر بهره‌وری و کیفیت زمان‌بندی انبارمقاطع بگذارد. با تخصیص مناسب نیروی انسانی براساس سطح مهارت و تجربه، زمان‌های ازدحام و بیکاری به حداقل می‌رسد^[۲،۶]. نیروی انسانی دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که با تکرار مداوم یک فعالیت زمان طبیعی پردازش آن را کاهش می‌دهد و فعالیت را در زمان کوتاه‌تری از زمان واقعی انجام می‌دهد که این پدیده به اثریادگیری شناخته شده است^[۱].

سرانو و همکاران^[۷] مدل برنامه‌ریزی خطی برای زمان‌بندی کامیون‌های ورودی انبارمقاطع با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های اضافی و حجم کاری نامتعادل ارائه کردند. حسنی گودرزی و همکاران^[۸] مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط با هدف کمینه‌سازی هزینه ارائه کردند. کوریا ایسی و همکاران^[۹] با ارائه مدل ریاضی، زمان‌بندی کامیون‌های انبارمقاطع را با هدف کمینه‌سازی زمان کل عملیات بررسی کردند. حق‌گویی و همکاران^[۱۰] مدل چندهدفه ریاضی را برای زمان‌بندی عملیات ورود و خروج کامیون‌ها از انبارمقاطع ارائه کردند. مدل چندهدفه با استفاده از اعداد فازی در ابعاد کوچک با روش min-max حل شد. لی و همکاران^[۱۱] با ارائه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، مسئله تخصیص درب انبارمقاطع را با هدف به

حداقل رساندن هزینه کل جابجایی بررسی کردند. رجب‌زاده و موسوی^[۱۲] یک مدل ریاضی چندهدفه را برای زمان‌بندی کامیون‌های انبارمقاطع ارائه کردند. در این پژوهش رویکرد حل ترکیبی جدید با استفاده از اعداد فازی مثلثی بازه‌ای ارائه شد.

رایت و همکاران^[۱۳] با بررسی عملکرد صنعت هواپیمایی و فرموله کردن فرضیه ۸۰٪ ابتدایی‌ترین منحنی اثر یادگیری را ارائه کردند. بیسکوپ^[۱۴]، با توجه به اهمیت اثر یادگیری در زمان‌بندی، مدل‌های یادگیری مستقل و القایی را مرور کرد. سیدی و همکاران^[۱]، با ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، یادگیری و زوال را در مسئله زمان‌بندی انبارمقاطع بررسی کردند. مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری حل شد. چارگوی و همکاران^[۱۵] با استفاده از اینترنت اشیا و ارائه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چند هدفه، فرآیند بهینه‌سازی عملیات پایانه‌های راه آهن‌جاده را با هدف کمینه‌سازی مصرف انرژی بررسی کردند. استنکووی و همکاران^[۱۶] با شبیه‌سازی عملیات‌های سکو در نرم افزار شبیه‌سازی، کاهش مصرف انرژی لیفتراک‌های الکتریکی را بررسی کردند. موگال و همکاران^[۴]، کمینه‌سازی هزینه‌های کلی زنجیره‌تأمین را با ارائه یک شبکه حمل‌ونقل پایدار بررسی کردند. رجب‌زاده و موسوی^[۲] مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را با هدف کمینه‌سازی هزینه کل سیستم و انتشار کربن ارائه کردند. در این پژوهش یک رویکرد مبتکرانه تحت عدم قطعیت بازه‌ای مبتنی بر راه‌حل‌های پارتو ارائه شد. علینقیان و همکاران^[۱۷]، با ارائه یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسئله تخصیص سکو به وسایل نقلیه و مسیریابی وسیله نقلیه را بررسی کردند و پنجره زمانی نیز در نظر گرفتند. هم چنین یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جدید ارائه کردند. محسن باقری و همکاران^[۱۸]، با ارائه مدل چندهدفه به‌دنبال کمینه‌سازی هم‌زمان دیرکرد کامیون‌های ورودی و خروجی و زمان اتمام کل است. برای حل مدل ارائه شده، سه الگوریتم ژنتیک چندهدفه توسعه

^۳ Position

^۲ Cross-dock

داده شد. موارد زیر به عنوان شکاف مطالعات پیشین در ادبیات موضوع شناسایی شده است:

توجه به نیروی انسانی به دلیل استفاده از آن در عملیات بارگیری و تخلیه کالاها در داخل سیستم انبار متقاطع ضروری است. در بررسی پژوهش‌های پیشین مشاهده شد، سیدی و همکاران^[۱] با ارائه مدل خطی، اثربخشی نیروی انسانی را در سیستم انبار متقاطع بررسی کردند. سایر پژوهش‌ها توابع اثربخشی را در دیگر سیستم‌ها پیاده‌سازی کردند.

با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی توجه به عوامل تولید آلاینده‌ها لازم و ضروری است. در مطالعات پیشین مشاهده شد؛ رجب‌زاده و موسوی^[۲]، عامل زیست‌محیطی را با در نظر گرفتن میزان انتشار کربن در سیستم انبار متقاطع بررسی کردند و حقوقی و همکاران^[۱۰] هزینه انتشار آلاینده‌های کامیون‌ها را ارائه کردند.

به کارگیری عدم قطعیت، نتایج مسئله را به دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌نماید. در پژوهش‌های پیشین تأثیر عدم قطعیت بر زمان‌بندی انبار متقاطع به طور محدود بررسی شده است. به طور مثال رجب‌زاده و موسوی^[۲]، عدم قطعیت مسئله زمان‌بندی انبار متقاطع را با به کارگیری اعداد فازی بازه‌ای بررسی کردند، حقوقی و همکاران^[۱۰] با استفاده از اعداد فازی و رجب‌زاده و همکاران^[۱۹] با استفاده از اعداد خاکستری مدل‌سازی کردند.

علاوه بر مطالعات پیشین، پژوهش‌های اخیر نیز نشان می‌دهد که مسائل زمان‌بندی و تخصیص در انبار متقاطع همچنان موضوعی فعال است. برای نمونه، التاف و همکاران^[۲۰] یک مدل استوار برای مسئله تخصیص کامیون‌ها به درب‌ها ارائه کردند که با استفاده از رویکرد فازی با قید شانس به عدم قطعیت پارامترهای عملیاتی پرداخته‌اند و تأثیر آن را بر هزینه‌های عملیاتی و کارایی بررسی کردند. علاوه بر آن، در پژوهش‌اتی و همکاران^[۲۱] رابطه زمان‌بندی و تخصیص کامیون‌ها در محیط‌های چنددرب با سکوها انعطاف‌پذیر مورد توجه قرار گرفت. در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه داده شد و به کمک الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به صورت کارتری حل شد.

بر اساس مرور ادبیات، می‌توان شکاف‌های زیر را شناسایی کرد. نخست، اگرچه مسئله زمان‌بندی کامیون‌ها در

سیستم‌های انبار متقاطع به طور گسترده در ادبیات بررسی شده است، اما بخش قابل توجهی از این مطالعات بر حالت‌های خاصی نظیر سکوها ورودی و خروجی مجزا، یا مدل‌های ساده‌تر تخصیص و توالی تمرکز داشته‌اند و بررسی هم‌زمان تخصیص، توالی و موقعیت پردازش کامیون‌ها در محیط سکوها مختلط همچنان محدود است. دوم، اگرچه در برخی مطالعات اخیر به مؤلفه‌های زیست‌محیطی در سیستم‌های انبار متقاطع توجه شده است، این مؤلفه‌ها عمدتاً در سطح انتخاب ناوگان یا عملیات حمل‌ونقل بیرونی مدل‌سازی شده‌اند و انتشار کربن ناشی از جابه‌جایی‌های داخلی کالاها بین کامیون‌های ورودی و خروجی در داخل پایانه کمتر به صورت صریح مورد توجه قرار گرفته است. سوم، نقش نیروی انسانی و پدیده یادگیری در عملیات تخلیه و بارگیری در انبار متقاطع، به‌ویژه یادگیری مبتنی بر موقعیت پردازش، در ادبیات موجود به ندرت مدل‌سازی شده و اغلب مطالعات زمان‌های عملیاتی را ثابت فرض کرده‌اند. چهارم، اگرچه برخی پژوهش‌ها عدم قطعیت را در قالب اعداد بازه‌ای یا سناریو محور بررسی کرده‌اند، استفاده از چارچوب برنامه‌ریزی امکانی مبتنی بر اعداد فازی مثلی برای مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترهای زمانی در مسائل زمان‌بندی انبار متقاطع همچنان محدود باقی مانده است.

در پاسخ به این شکاف‌ها، پژوهش حاضر یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط دوهدفه برای زمان‌بندی کامیون‌های ورودی و خروجی در انبار متقاطع با سکوها مختلط ارائه می‌دهد که در آن، اثر یادگیری نیروی انسانی مبتنی بر موقعیت در زمان‌های تخلیه و بارگیری لحاظ شده، یک تابع هدف جدید برای کمینه‌سازی انتشار کربن ناشی از جابه‌جایی درون‌انبار توسعه یافته و عدم قطعیت پارامترهای زمانی با استفاده از اعداد فازی مثلی و چارچوب برنامه‌ریزی امکانی مدیریت می‌شود.

سایر بخش‌های این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است. در بخش ۲ بیان مسئله و مدل برنامه‌ریزی امکانی دوهدفه ارائه شده است. بخش ۳ رویکردهای حل برنامه‌ریزی امکانی دوهدفه را شرح می‌دهد. در بخش ۴ نتایج حاصل از پیاده‌سازی یک مثال کاربردی به منظور اعتبارسنجی مدل

ارائه شده است. در بخش ۵ یافته‌های کلیدی پژوهش و پیشنهادات آتی در این حوزه ارائه شده است.

۲. بیان مسئله و مدل‌سازی

۱.۲ بیان مسئله

در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی کامیون‌های ورودی و خروجی در یک انبار متقاطع با سکوهاى مختلط بررسی می‌شود. اهداف مسئله ارائه‌شده، کمینه‌سازی هم‌زمان میزان انتشار کربن ناشی از جابه‌جایی کالاها در داخل انبار متقاطع و زمان کل عملیات سیستم است.

در سیستم انبار متقاطع، هر کامیون ورودی به‌منظور تخلیه کالاها و هر کامیون خروجی به‌منظور بارگیری کالاها به یکی از سکوهاى مختلط تخصیص داده می‌شود. کالاهای تخلیه‌شده از کامیون‌های ورودی، از طریق سکوها یا انبارهای موقت جابه‌جا شده و پس از تجمع، بر روی کامیون‌های خروجی بارگیری می‌شوند. کامیون‌ها مطابق توالی تعیین‌شده در سکوها مستقر می‌مانند تا عملیات تخلیه یا بارگیری آن‌ها به‌طور کامل انجام شود و بلافاصله پس از اتمام عملیات، سکو را ترک می‌کنند. کامیون‌های ورودی و کامیون‌های خروجی به ترتیب زمانی تا تکمیل فرآیند تخلیه و بارگیری خود در سکوها باقی می‌مانند و پس از اتمام آن بلافاصله سکو را ترک می‌کنند. در این مسئله فرض می‌شود که مجموع کالاهای تخلیه‌شده از کامیون‌های ورودی با مجموع کالاهای بارگیری‌شده بر کامیون‌های خروجی برابر است تا از ذخیره‌سازی بلندمدت کالاها جلوگیری شود.

عملیات تخلیه و بارگیری کالاها عمدتاً توسط نیروی انسانی انجام می‌شود. اگرچه ماهیت این عملیات در ظاهر تکرارشونده و نسبتاً استاندارد است، اما انجام متوالی آن‌ها در طول یک شیفت کاری موجب افزایش مهارت، هماهنگی و سرعت عمل نیروی انسانی می‌شود. در نتیجه، با پردازش کامیون‌های بیشتر و قرار گرفتن آن‌ها در موقعیت‌های بعدی پردازش در سکوها، زمان انجام عملیات تخلیه و بارگیری کاهش می‌یابد؛ پدیده‌ای که در ادبیات به‌عنوان اثر یادگیری نیروی انسانی شناخته می‌شود. در این پژوهش، اثر یادگیری نیروی انسانی با استفاده از یک مدل یادگیری مبتنی بر

موقعیت^۴ در نظر گرفته شده است. مطابق این مدل، زمان انجام عملیات تخلیه یا بارگیری برای کامیونی که در موقعیت i ام توالی پردازش قرار دارد، تابعی کاهشی از موقعیت پردازش است. بر این اساس، زمان عملیات به‌صورت زیر مدل‌سازی شده است:

$$P_{ir} = P_i r^a \quad (1)$$

در این رابطه، P_{ir} زمان پردازش کار i در موقعیت ترتیبی r است. پارامتر P_i زمان پردازش نرمال و بدون اثر یادگیری کار i است و a شاخص یادگیری می‌باشد [۱۴].

علاوه بر این، جابه‌جایی کالاها از کامیون‌های ورودی به کامیون‌های خروجی، به‌ویژه در محیط با سکوهاى مختلط و با استفاده از انبارهای موقت، منجر به مصرف انرژی و انتشار کربن می‌شود که مقدار آن به مسافت طی‌شده و مسیرهای جابه‌جایی داخلی وابسته است. بنابراین، زمان‌بندی و تخصیص کامیون‌ها نه‌تنها بر زمان کل عملیات، بلکه بر میزان انتشار کربن در داخل انبار متقاطع نیز اثرگذار است.

تمامی کامیون‌های ورودی و خروجی در ابتدای شیفت کاری در دسترس بوده و مدل ارائه‌شده، توالی، تخصیص و موقعیت پردازش کامیون‌ها را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که به‌طور هم‌زمان میزان انتشار کربن و زمان کل عملیات کمینه شود. بر این اساس، مفروضات اصلی مدل ریاضی پیشنهادی به شرح زیر است:

- اثر یادگیری نیروی انسانی مبتنی بر موقعیت پردازش کامیون‌ها در سکوها است.
- وقوع اثر یادگیری نیروی انسانی منجر به کاهش تدریجی زمان‌های تخلیه و بارگیری کالاها می‌شود.
- میزان انتشار کربن به مسافت جابه‌جایی کالاها از کامیون‌های ورودی به کامیون‌های خروجی در داخل انبار متقاطع وابسته است.

۲.۲ مدل‌سازی ریاضی

مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی در جدول (۱) معرفی شده‌است. پارامترهای زمان بارگیری، زمان تخلیه، زمان تعویض کامیون‌ها و زمان‌های جابه‌جایی کالاها از نوع

^۴ position-based learning

عدد فازی مثلثی است و در مدل ریاضی با نماد $\tilde{}$ (مدک) نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای مدل

نماد	شرح نماد
مجموعه‌ها	
$V(V = In \cup out)$	مجموعه کامیون‌های ورودی و خروجی
$In = \{1, \dots, i\}, i \in In$	مجموعه کامیون‌های ورودی
$out = \{1, \dots, j\}, j \in out$	مجموعه کامیون‌های خروجی
P	مجموعه نوع محصول
$D = \{1, \dots, k\}, k \in D$	مجموعه تعداد سکوهاى مختلط
S	مجموعه تعداد انبارهای موقت
پارامترها	
N_{vp}	تعداد محصول نوع p که از کامیون v تخلیه شده یا بارگیری شده
$\tilde{U}T_p$	زمان تخلیه محصول نوع p
$\tilde{L}T_p$	زمان بارگیری محصول نوع p
C_{sk}	ظرفیت انبار موقت s که در مقابل سکو k است
$TD_{kk'}$	زمان جابه‌جایی محصولات از سکو k به سکو k' ($k \neq k'$), از طریق انبار $s = 1$
$\tilde{ST}$	زمان جابه‌جایی محصولات از انبار موقت $s = 2$ تا کامیون خروجی
$\tilde{TC}$	زمان تعویض کامیون
LT_j	آخرین زمان حرکت کامیون خروجی j
$D_{kk'}$	کل مسافت طی شده از سکو k تا سکو k'
φ	ضریب انتشار کربن دی اکسید
a	شاخص یادگیری ($-1 \leq a \leq 0$)
M	یک عدد مثبت بزرگ
متغیرها	
T	زمان کل عملیات
at_v	زمان رسیدن کامیون v در سکو
dt_v	زمان حرکت کامیون v از سکو
r_{vk}	موقعیت کامیون v در سکو k
x_{ijps}	تعداد محصول نوع p که از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j از طریق انبار موقت s منتقل می‌شود.

^۵ Tilde

L_{ijs}	اگر محصولی از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j از طریق انبار موقت s منتقل شود 1، در غیر این صورت مقدار 0 دارد.
G_{ij}	اگر محصولی از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j منتقل شود 1، در غیر این صورت مقدار 0 دارد.
F_{ijk}	اگر کامیون i قبل از کامیون j در توالی کامیون‌های ورودی، در سکو k باشد 1، در غیر این صورت مقدار 0 دارد.
u_{ijk}	اگر کامیون i قبل از کامیون j در توالی کامیون‌های خروجی، در سکو k باشد 1، در غیر این صورت مقدار 0 دارد.
q_{ik}	اگر کامیون ورودی i به سکو k تخصیص داده شود 1، در غیر این صورت مقدار 0 دارد.
f_{jk}	اگر کامیون خروجی j به سکو k تخصیص داده شود 1، در غیر این صورت مقدار 0 دارد.
$h_{ijkk'}$	اگر محصول از کامیون ورودی i در سکو k به کامیون خروجی j در سکو k' جابه‌جا شود 1، در غیر این صورت مقدار 0 دارد.

$$Z_1 = \text{Min} T \quad (2)$$

$$Z_2 = \text{Min} \sum_{i,j,k,k'} \varphi * D_{kk'} * h_{ijkk'} \quad (3)$$

Subject to:

$$T \geq dt_j \quad \forall j \in O \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^{|S|} \sum_{j=1}^{|O|} x_{ijps} = N_{ip} \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^{|S|} \sum_{i=1}^{|I|} x_{ijps} = N_{jp} \quad \forall j \in O, \forall p \in P \quad (6)$$

$$x_{ijps} \leq M * L_{ijs} \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall p \in P, \forall s \in S \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^{|P|} x_{ijps} \geq L_{ijs} \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} \sum_{p=1}^{|P|} x_{ijps} \leq C_{sk} \quad \forall j \in O, \forall s \in S, \forall k \in D \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} \sum_{p=1}^{|P|} x_{ijps} \leq C_{sk} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall k \in D \quad (10)$$

$$dt_i \geq at_i + \sum_{p=1}^{|P|} N_{ip} * \hat{U}T_p * r_{ik}^a \quad \forall i \in I, \forall k \in D \quad (11)$$

$$dt_j \geq at_j + \sum_{p=1}^{|P|} N_{jp} * \hat{L}T_p * r_{jk}^a \quad \forall j \in O, \forall k \in D \quad (12)$$

$$dt_j \leq LT_j \quad \forall j \in O \quad (13)$$

$$at_j \geq dt_i + \#C - M * \left(1 - \sum_{k=1}^{|D|} F_{ijk} \right) \quad \forall i, j \in I; i \neq j \quad (14)$$

$$at_j \geq dt_i + \#C - M * \left(1 - \sum_{k=1}^{|D|} u_{ijk} \right) \quad \forall i, j \in O; i \neq j \quad (15)$$

$$at_j \geq at_i + \#C - M^*(2 - q_{ik} - f_{jk}) \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall k \in D \quad (16)$$

$$at_j + M^*(3 - L_{ij1} - q_{ik} - f_{jk}) \geq dt_i + \sum_{p=1}^{|P|} x_{ijp1} * TD_{kk'} \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall k, k' \in D \quad (17)$$

$$at_j + M^*(1 - L_{ij2}) \geq dt_i + \sum_{p=1}^{|P|} x_{ijp2} * ST \quad \forall i \in I, \forall j \in O \quad (18)$$

$$dt_j \geq at_i + \hat{L}T_p * \sum_{p=1}^{|P|} \sum_{s=1}^{|S|} x_{ijps} + D_{kk'} - M^*(1 - h_{ijk'}) \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall k, k' \in D, \forall p \in P \quad (19)$$

$$h_{ijk'} \geq G_{ij} + q_{ik} + f_{jk'} - 2 \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall k, k' \in D \quad (20)$$

$$h_{ijk'} \leq (G_{ij} + q_{ik} + f_{jk'}) / 3 \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall k, k' \in D \quad (21)$$

$$G_{ij} \leq \sum_{s=1}^{|S|} L_{ijs} \quad \forall i \in I, \forall j \in O \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^{|D|} q_{ik} = 1 \quad \forall i \in I \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^{|D|} f_{jk} = 1 \quad \forall j \in O \quad (24)$$

$$F_{ijk} + F_{jik} \leq 1 \quad \forall i, j \in I, i \neq j, \forall k \in D \quad (25)$$

$$u_{ijk} + u_{jik} \leq 1 \quad \forall i, j \in O, i \neq j, \forall k \in D \quad (26)$$

$$F_{ijk} + F_{jik} \geq q_{ik} + q_{jk} - 1 \quad \forall i, j \in I, i > j, \forall k \in D \quad (27)$$

$$u_{ijk} + u_{jik} \geq f_{ik} + f_{jk} - 1 \quad \forall i, j \in O, i > j, \forall k \in D \quad (28)$$

$$r_{ik} = \sum_{i=1}^{|I|} q_{ik} - \sum_{\substack{j=1, \\ i \neq j}}^{|I|} F_{ijk} - M(1 - q_{ik}) \quad \forall i, j \in I, \forall k \in D \quad (29)$$

$$r_{jk} = \sum_{j=1}^{|O|} f_{jk} - \sum_{\substack{j=1, \\ i \neq j}}^{|O|} u_{ijk} - M(1 - f_{jk}) \quad \forall i, j \in O, \forall k \in D \quad (30)$$

$$T, at, dt, r \geq 0, x \in Z^+ \cup \{0\}, L, G, F, u, q, f, h \in \{0, 1\} \quad (31)$$

غیرجاده‌ای در مطالعه ژانگ و همکاران^[۳۲] بدست آمده است. محدودیت (۴) نشان می‌دهد زمان تکمیل عملیات انبار متقاطع حداقل برابر است با زمان ترک آخرین کامیون خروجی از سکوی‌های خروجی. محدودیت (۵) نشان می‌دهد تعداد کالا نوع p که از کامیون ورودی i تخلیه شده برابر است با تعداد کل کالا نوع p که از کامیون ورودی i به کامیون‌های خروجی j از طریق انبار موقت s منتقل می‌شود. محدودیت (۶) نشان می‌دهد تعداد کالا نوع p که بر روی کامیون خروجی

تابع هدف اول (۲) کمینه‌سازی کل زمان پردازش کامیون‌ها است. تابع هدف دوم (۳) کمینه‌سازی میزان انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از جابه‌جایی کالاها در داخل انبار متقاطع می‌باشد. در این تابع، پارامتر ϕ ضریب انتشار CO_2 ناشی از جابه‌جایی داخلی کالاها بوده و انتشار حاصل از عملیات غیرجاده‌ای/درون‌تسهیل، نظیر استفاده از تجهیزات جابه‌جایی داخلی، را مدل‌سازی می‌کند. مقدار این پارامتر بر اساس ضرایب انتشار گزارش‌شده برای تجهیزات جابه‌جایی

z بارگیری شده است برابر است با تعداد کل کالا نوع p که از کامیون‌های ورودی i به کامیون خروجی z از طریق انبار موقت s منتقل می‌شود. محدودیت (۷) رابطه بین متغیر عدد صحیح x_{ijps} و متغیر باینری L_{ijps} را نشان می‌دهد. متغیر باینری L_{ijps} برابر است با ۱ اگر کالا نوع p از کامیون ورودی i به کامیون خروجی z از طریق انبار s منتقل شود. محدودیت (۸) به‌عنوان مکمل محدودیت (۷) تعریف شده و تضمین می‌کند که در صورت جابه‌جایی هر تعداد کالا بین کامیون‌های ورودی و خروجی، متغیر باینری متناظر فعال می‌شود. محدودیت (۹) نشان می‌دهد تعداد کل کالایی که از تمامی کامیون‌های ورودی به کامیون خروجی z در سکو k جابه‌جا می‌شود از ظرفیت انبار موقت سکو بیشتر نمی‌باشد. محدودیت (۱۰) نشان می‌دهد تعداد کل کالایی که از کامیون ورودی i به تمامی کامیون‌های خروجی در سکو k جابه‌جا می‌شود از ظرفیت انبار موقت سکو بیشتر نمی‌باشد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که زمان خروج کامیون ورودی i برابر یا بزرگتر است با مجموع زمان رسیدن آن کامیون با زمان تخلیه تمامی کالاهایش؛ همچنین در این محدودیت اثربادگیری نیروی انسانی مبتنی بر موقعیت در نظر گرفته شده است. این محدودیت تضمین می‌کند کامیون ورودی i پس از تخلیه تمامی کالاهای سکو را ترک می‌نماید. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که زمان خروج کامیون خروجی z برابر یا بزرگتر است با مجموع زمان رسیدن آن کامیون با زمان بارگیری تمامی کالاهایش؛ همچنین در این محدودیت اثربادگیری نیروی انسانی مبتنی بر موقعیت در نظر گرفته شده است و این محدودیت تضمین می‌کند که کامیون خروجی z پس از بارگیری تمامی کالاهای سکو را ترک می‌نماید. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند زمان ترک کامیون خروجی برابر یا کمتر با زمان حرکت آخرین کامیون خروج z است. محدودیت (۱۴) توالی کامیون‌های ورودی را نشان می‌دهد. اگر در سکو k زمان رسیدن کامیون z برابر یا بزرگتر از زمان حرکت کامیون i باشد؛ کامیون ورودی z بعد از کامیون ورودی i است. محدودیت (۱۵) توالی کامیون‌های خروجی را نشان می‌دهد. اگر در سکو k زمان رسیدن کامیون z برابر یا بزرگتر از زمان حرکت کامیون i باشد؛ کامیون خروجی z بعد از کامیون خروج i است. محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند

اگر کامیون خروجی z به سکو k که کامیون ورودی i در آن قرار دارد تخصیص داده شود؛ زمان رسیدن کامیون خروجی z برابر یا بزرگتر از مجموع زمان تعویض کامیون‌ها و زمان رسیدن کامیون ورودی i است. محدودیت (۱۷) تضمین می‌کند اگر کالاهای کامیون ورودی i در سکو k به کامیون خروجی z در سکو k' از طریق انبار موقت $s=1$ جابه‌جا شود آنگاه زمان رسیدن کامیون خروجی z برابر یا بزرگتر از مجموع زمان جابه‌جایی کالاهای سکو k و به سکو k' و زمان خروج کامیون ورودی i است. اگر کامیون‌های ورودی و خروجی در سکوهایی یکسان باشد زمان جابه‌جایی کالاهای برابر با ۰ است. محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند اگر کالاهای کامیون ورودی i به کامیون خروجی z از طریق انبار موقت $s=2$ جابه‌جا شود؛ زمان رسیدن کامیون خروجی z برابر یا بزرگتر از زمان خروج کامیون ورودی i و زمان جابه‌جایی کالاهای از انبار موقت $s=2$ به کامیون خروجی z است. محدودیت‌های (۱۹) تا (۲۲) زمان لازم برای جابه‌جایی کالاهای را از کامیون‌های ورودی i به کامیون‌های خروجی z محاسبه می‌کنند. محدودیت‌های (۱۶) تا (۲۲) تضمین می‌کند کامیون‌های خروجی بعد از تخلیه کامیون‌های ورودی در انبار حاضر می‌باشند تا کالاهای بر آنها بارگیری شوند. محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) تضمین می‌کند که هریک از کامیون‌های ورودی و کامیون‌های خروجی به یکی از سکوها تخصیص می‌یابد. محدودیت (۲۵) تضمین می‌کند اگر کامیون ورود i بر کامیون ورودی z تقدم داشته باشد، کامیون ورودی z نمی‌تواند بر کامیون ورود i متقدم باشد. محدودیت (۲۶) تضمین می‌کند اگر کامیون خروجی i بر کامیون خروجی z تقدم داشته باشد، کامیون خروجی z نمی‌تواند بر کامیون خروجی i متقدم باشد. محدودیت (۲۷) تضمین می‌کند اگر دو کامیون ورودی به یک سکو تخصیص داده شود، آنگاه فقط یکی از آنها قبل از دیگری است و تکمیل‌کننده محدودیت (۲۵) است. محدودیت (۲۸) تضمین می‌کند اگر دو کامیون خروجی به یک سکو تخصیص داده شود، آنگاه فقط یکی از آنها قبل از دیگری است و تکمیل‌کننده محدودیت (۲۶) است. محدودیت (۲۹) موقعیت کامیون‌های ورودی در سکوها را تعیین می‌کند و تضمین می‌کند که کامیون‌های ورودی تخصیص یافته به سکو به‌ترتیب موقعیت

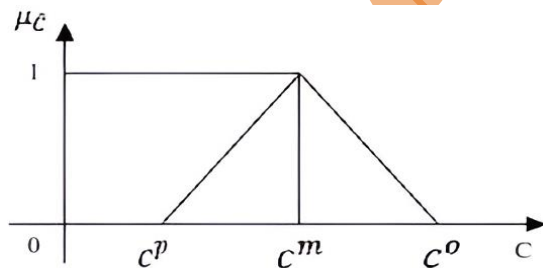
$$yy_{vk} = 1\lambda_{1k} + 0.71\lambda_{2k} + 0.58\lambda_{3k} + 0.5\lambda_{4k} + 0.45\lambda_{5k} \quad (32)$$

$$r_{vk} = 1\lambda_{1k} + 2\lambda_{2k} + 3\lambda_{3k} + 4\lambda_{4k} + 5\lambda_{5k} \quad (33)$$

$$\lambda_{1k} + \lambda_{2k} + \lambda_{3k} + \lambda_{4k} + \lambda_{5k} = 1 \quad (34)$$

۳. رویکرد حل پیشنهادی

در مسئله ارائه شده به منظور مواجهه با عدم قطعیت و نزدیکی به دنیای واقعی، از تئوری فازی استفاده می‌شود. زیرا عدم قطعیت موجود در پارامترهای زمانی عملیات انبار متقاطع عمدتاً ناشی از عوامل انسانی و شرایط اجرایی است و در بسیاری از موارد، داده‌های تاریخی کافی برای برآورد توزیع‌های احتمالی دقیق در دسترس نیست. در چنین شرایطی، رویکرد فازی مبتنی بر نظرات خبرگان امکان مدل‌سازی عدم قطعیت‌های زمانی و ذهنی را فراهم می‌کند. در این پژوهش، به منظور دستیابی به توازن میان واقع‌گرایی، سادگی مدل و قابلیت حل، از اعداد فازی مثلثی و چارچوب برنامه‌ریزی امکانی برای مدیریت عدم قطعیت پارامترهای زمانی استفاده شده و در مدل ریاضی با نماد $\tilde{c}$ (نشان داده شده است. شکل (۲) نشان‌دهنده عدد فازی مثلثی $\tilde{c}$ است که دارای سه عدد حقیقی $c^p < c^m < c^o$ می‌باشد. راس مثلث در نقطه‌ی $x = c^m$ و قاعده آن در بازه‌ی $[c^p, c^o]$ قرار دارد [۲۴].



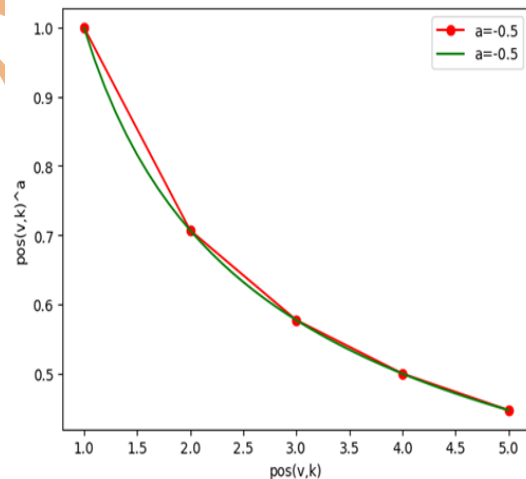
شکل ۲؛ عدد فازی مثلثی $\tilde{c}$

به منظور فازی‌زدایی مدل و تبدیل برنامه‌ریزی امکانی به مدل معادل قطعی، از روش خیمنز و همکاران [۲۵] استفاده شده است که در آن معادله (۳۵) بر مبنای مفاهیم فاصله مورد انتظار و مقدار مورد انتظار است (معادلات (۳۶) و (۳۷)) تعریف شده است.

پردازش می‌شوند. محدودیت (۳۰) موقعیت کامیون‌های خروجی در سکوها را تعیین می‌کند و تضمین می‌کند که کامیون‌های خروجی تخصیص یافته به سکو به ترتیب موقعیت پردازش می‌شوند. محدودیت (۳۱) انواع متغیرهای تصمیم مدل را تعریف می‌کند.

۳.۲ خطی‌سازی

در مدل ریاضی پیشنهادی، اثریادگیری نیروی انسانی مبتنی بر موقعیت با استفاده از عبارت غیرخطی r_{vk}^a در محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شود. این عبارت غیرخطی، تابع تفکیک‌پذیری است که می‌توان آن را با توابع خطی تکه‌ای تقریب زد و یک بهینه سراسری برای مسئله محدب و یک بهینه محلی برای مسئله غیر محدب به دست آورد. به طور مثال اگر متغیر عدد صحیح عبارت غیرخطی r_{vk}^a با توان ۰.۵- در بازه‌ی [۱،۵] مقدار گیرد این بازه را مطابق شکل (۱) می‌توان به چهار قسمت تقسیم کرد.



شکل ۱؛ منحنی غیر خطی و تکه‌ای

حذف عبارت غیرخطی در مثال با جایگزین کردن معادلات (۳۲) تا (۳۴) انجام می‌شود. λ_{vk} متغیر جدیدی است که می‌توان آن را به عنوان "وزن" رؤس معرفی کرد به طوری که هر حداکثر دو λ_{vk} مجاور می‌تواند غیر صفر باشند. به عبارتی تضمین می‌کند که مقادیر متناظر r_{vk} و yy_{vk} روی یکی از خطوط مستقیم قرار دارند [۲۳].

$$EV(\bar{C}) = [\frac{c^p + 2c^m + c^o}{4}] \quad (37)$$

$$\alpha(\frac{c^m + c^o}{2}) + (1-\alpha)(\frac{c^m + c^p}{2}) \quad (35)$$

$$EI(\bar{C}) = [\frac{1}{2}(c^p + c^m), \frac{1}{2}(c^m + c^o)] \quad (36)$$

براساس روابط فوق، بازنویسی محدودیت‌های دارای پارامترهای فازی در معادلات (۳۸) تا (۴۴) ارائه شده است.

$$dt_i \geq at_i + \sum_{p=1}^{|P|} N_{ip} * (\alpha(\frac{UT_{p2} + UT_{p3}}{2}) + (1-\alpha)(\frac{UT_{p2} + UT_{p1}}{2})) * r_{ik}^a \quad \forall i \in I, \forall k \in D \quad (38)$$

$$dt_j \geq at_j + \sum_{p=1}^{|P|} N_{jp} * (\alpha(\frac{LT_{p2} + LT_{p3}}{2}) + (1-\alpha)(\frac{LT_{p2} + LT_{p1}}{2})) * r_{jk}^a \quad \forall j \in O, \forall k \in D \quad (39)$$

$$at_j \geq dt_i + (\alpha(\frac{TC_{p2} + TC_{p3}}{2}) + (1-\alpha)(\frac{TC_{p2} + TC_{p1}}{2})) - M * (1 - \sum_{k=1}^{|D|} F_{ijk}) \quad \forall i, j \in I, i \neq j \quad (40)$$

$$at_j \geq dt_i + (\alpha(\frac{TC_{p2} + TC_{p3}}{2}) + (1-\alpha)(\frac{TC_{p2} + TC_{p1}}{2})) - M * (1 - \sum_{k=1}^{|D|} u_{ijk}) \quad \forall i, j \in O, i \neq j \quad (41)$$

$$at_j \geq at_i + (\alpha(\frac{TC_{p2} + TC_{p3}}{2}) + (1-\alpha)(\frac{TC_{p2} + TC_{p1}}{2})) - M * (2 - q_{ik} - f_{jk}) \quad \forall i \in I, \forall j \in O, \forall k \in D \quad (42)$$

$$at_j + M * (1 - L_{ij2}) \geq dt_i + \sum_{p=1}^{|P|} x_{ijp2} * (\alpha(\frac{ST_{p2} + ST_{p3}}{2}) + (1-\alpha)(\frac{ST_{p2} + ST_{p1}}{2})) \quad \forall i \in I, \forall j \in O \quad (43)$$

$$dt_j \geq at_i + (\alpha(\frac{LT_{p2} + LT_{p3}}{2}) + (1-\alpha)(\frac{LT_{p2} + LT_{p1}}{2})) * \sum_{p=1}^{|P|} \sum_{s=1}^{|S|} x_{ijps} + D_{kk'} - M * (1 - h_{ijkk'}) \quad \begin{matrix} \forall i \in I, \forall j \in O, \\ \forall k, k' \in D, \forall p \in P \end{matrix} \quad (44)$$

است. تابع مطلوبیت خطی سمت راست که در معادله (۴۵) ارائه شده برای اهداف بیشینه‌سازی است و تابع مطلوبیت خطی سمت چپ که در معادله (۴۶) ارائه شده برای اهداف کمینه‌سازی است که در این پژوهش از تابع مطلوبیت خطی سمت چپ استفاده می‌شود.

در این پژوهش برای یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های رضایت بخش، برنامه‌ریزی آرمانی چانگ^[۲۶] توسعه می‌یابد. برنامه‌ریزی آرمانی پیشنهادی به دنبال کاهش انحرافات مثبت و منفی است و به منظور غلبه بر افزایش خودکار مطلوبیت دارای دو نوع تابع مطلوبیت خطی سمت چپ و سمت راست

$$u_i(y_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } y_i \geq g_{i,\max} \\ \frac{y_i - g_{i,\min}}{g_{i,\max} - g_{i,\min}} & \text{if } g_{i,\min} \leq y_i \leq g_{i,\max} \\ 0 & \text{if } y_i \leq g_{i,\min} \end{cases} \quad (45)$$

به همین دلیل از تابع مطلوبیت خطی سمت چپ استفاده می‌شود.

$g_{i,\max}$ و $g_{i,\min}$ به ترتیب کران‌های پایین و بالای هدف i است و در این پژوهش اهداف مدل ریاضی کمینه‌سازی است

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n [w_i (d_i^+ + d_i^-) + \beta_i f_i^- + \varphi_i (dp_i^+ + dp_i^-)] \quad (46)$$

Subject to :

$$\lambda_i \leq \frac{g_{i,\max} - y_i}{g_{i,\max} - g_{i,\min}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (47)$$

$$f_i(x) - d_i^+ + d_i^- = y_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (48)$$

$$\lambda_i + f_i^- = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (49)$$

$$y_i - dp_i^+ = g_{i,\min} \quad (50)$$

$$y_i + dp_i^- = g_{i,\max} \quad (51)$$

$$dp_i^+ + dp_i^- = g_{i,\max} - g_{i,\min} \quad (52)$$

$$d_i^+, d_i^-, dp_i^+, dp_i^-, f_i^-, \lambda_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (53)$$

$x \in F$, (F is a feasible set, x is unrestricted in sign)

مطلوبیت است. در برنامه‌ریزی آرمانی چندان انتخابه با تابع مطلوبیت، y_i باید تا حد امکان به $g_{i,\min}$ نزدیک شود.

w_i و φ_i به ترتیب وزن انحرافات $dp_i^+, dp_i^-, d_i^+, d_i^-$ نقش β_i به عنوان یک مؤلفه ترجیحی برای مقدار تابع مطلوبیت $u_i(y_i)$ است. λ_i مقدار ۴. نتایج عددی

فازی مثلی مدل سازی شده‌اند که دامنه آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

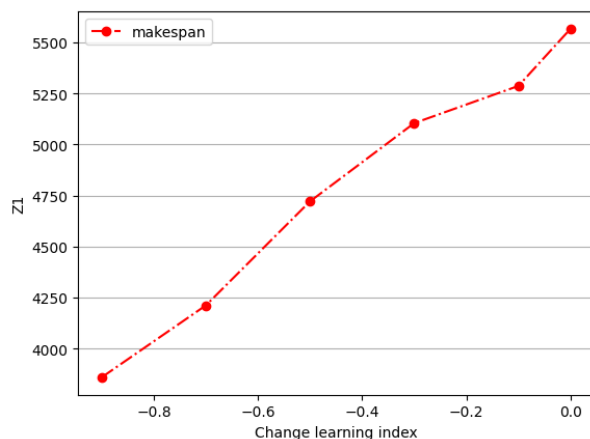
به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد رویکرد حل پیشنهادی، یک مثال کاربردی در یک مرکز توزیع مبتنی بر انبار متقاطع پیاده‌سازی شد. مرکز مورد مطالعه دارای سه سکوی مختلط است و در یک شیفت کاری، پنج نوع کالا با نام‌های تجاری مختلف از طریق نه کامیون ورودی تخلیه می‌شوند. کالاها پس از تجمیع و طبقه‌بندی، بر روی هشت کامیون خروجی بارگیری شده و برای مشتریان ارسال می‌گردد.

پارامتر نرخ انتشار دی‌اکسید کربن در این پژوهش به صورت ثابت فرض شده است. لازم به ذکر است که در کاربردهای واقعی، این پارامتر می‌تواند با استفاده از رویکردهای پیشنهادی در ادبیات، از جمله روش معرفی شده در مطالعه ژانگ و همکاران [۲۲]، محاسبه و به‌روزرسانی شود. تمامی مثال‌های عددی ارائه شده با استفاده از حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده‌اند. محاسبات بر روی یک کامپیوتر شخصی با مشخصات Intel(R) Core(TM) i7-7800X CPU @ 3.50GHz 3.50 GHz انجام شده است. زمان محاسباتی حل مسائل برای مثال‌های بررسی شده در محدوده قابل قبول قرار داشته و با افزایش ابعاد مسئله، روند افزایشی زمان حل مطابق با انتظار مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی برای مسائل با ابعاد کوچک تا متوسط از نظر محاسباتی قابل حل است.

در این مطالعه، داده‌های مورد استفاده به صورت مصنوعی و کنترل شده تولید شده‌اند تا امکان تحلیل دقیق رفتار مدل فراهم شود. به منظور جلوگیری از سوگیری در تولید داده‌ها و پوشش دامنه متنوعی از شرایط عملیاتی، پارامترهای پایه با استفاده از توزیع یکنواخت تولید شده‌اند. پارامترهای زمانی شامل زمان بارگیری کالاها، زمان تخلیه کالاها، زمان تعویض کامیون‌ها و زمان‌های جابه‌جایی کالاها، به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در عملیات واقعی، به صورت اعداد

جدول ۲. زمان بارگیری و تخلیه کالاها

Time	Product	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
$\hat{t}_{T_p}$		Un([1,3],[3,5],[6,8])	Un([2,4],[5,7],[8,9])	Un([3,5],[5,7],[7,9])	Un([1,3],[4,5],[5,7])	Un([3,5],[6,7],[7,8])
$\hat{v}_{T_p}$		Un([1,4],[5,7],[8,9])	Un([1,3],[4,5],[6,8])	Un([2,4],[5,7],[8,9])	Un([1,4],[5,6],[7,9])	Un([2,4],[5,6],[6,8])



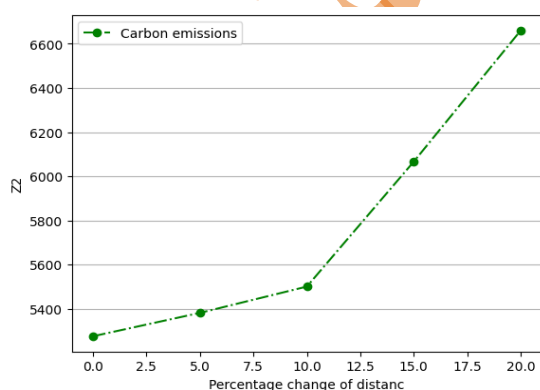
شکل ۳؛ تاثیر اثربادگیری بر زمان کل عملیات

مهم‌ترین نوآوری این پژوهش پیاده‌سازی اثربادگیری نیروی انسانی مبتنی بر موقعیت است. در این تحلیل ابتدا مدل ریاضی دو هدفه پیشنهادی بدون درنظر گرفتن تابع اثربادگیری حل و سپس تابع اثربادگیری اضافه شد. نتایج حاصل از حل مثال کاربردی در شکل (۳) تاثیر مقادیر مختلف شاخص اثربادگیری بر زمان کل عملیات را نشان می‌دهد و مطابق آن پیاده‌سازی تابع اثربادگیری با شاخص یادگیری ۰.۵- بر زمان عملیات تخلیه و بارگیری کالاها اثر می‌گذارد و زمان کل عملیات را از ۵۵۶۷ تا ۴۷۲۱.۳ کاهش می‌دهد و مجموع زمان تخلیه کالاها و مجموع زمان بارگیری کالاها به ترتیب ۴۴۵۵.۵ و ۲۱۲۴.۷۵ واحد کاهش می‌یابد.

جدول ۳. مقایسه تاثیر پیاده‌سازی تابع اثربادگیری

α	Z_1	Z_2	Total loading times of goods	Total unloading times of goods	Solution time (seconds)
0	5567	4250	9320.25	10108.5	2700
-0.1	5287.2	4400	8838.1	9482.6	2700
-0.3	5104.9	5025	7974.1	8414.8	2700
-0.5	4721.3	4575	7222.2	7584.4	2700
-0.7	4211.5	5275	6520.9	6807.7	2700
-0.9	3858.9	4975	6004.3	6041.1	2700

اثربادکار است به طوری که با افزایش ۲۰٪ مسافت، میزان کربن منتشر شده از ۴۵۷۵ تا ۶۶۶۰ افزایش یافته است.

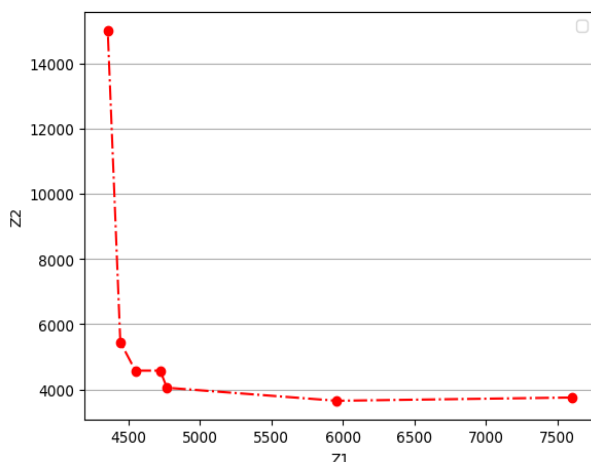


شکل ۳؛ تاثیر تغییر عامل مسافت بر توابع هدف

مدل ریاضی دوهدفه پیشنهادی با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی پیشنهادی به یک مدل تک هدفه تبدیل شده است. به منظور بررسی تضاد بین اهداف، وزن توابع هدف

به منظور بررسی تاثیر مقادیر مختلف شاخص یادگیری بر زمان کل عملیات، مجموع زمان‌های تخلیه و بارگیری کالاها، تحلیل تغییر شاخص یادگیری در بازه‌ی $[-0.9, -0.1]$ به فاصله ۰.۲ انجام شد. مطابق نتایج جدول (۳) در شاخص با مقدار ۰ یادگیری رخ نمی‌دهد و زمان کل عملیات برابر است با ۵۵۶۷. با کاهش شاخص یادگیری و افزایش میزان یادگیری نیروی انسانی، زمان کل عملیات، مجموع زمان‌های تخلیه کالاها و مجموع زمان‌های بارگیری کالاها کاهش می‌یابد و عملکرد بهبود می‌یابد. براساس نتایج جدول (۳) پیاده‌سازی تابع اثربادگیری با شاخص ۰.۵- موجب کاهش زمان کل عملیات از ۵۵۶۷ تا ۴۷۲۱.۳ می‌شود و ۱۵.۲٪ زمان کل عملیات کاهش یافته است.

شکل (۳) نشان دهنده تاثیر عامل مسافت بر میزان انتشار کربن است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ۵٪ عامل مسافت میزان انتشار کربن روندی رو به افزایش دارد و عامل مسافت



شکل ۴؛ تاثیر تغییر وزن توابع هدف در برنامه‌ریزی آرمانی به‌منظور ارزیابی مقیاس‌پذیری مدل ریاضی پیشنهادی، چهار مثال عددی دیگر با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این مثال‌ها شامل تعداد متفاوتی از کامیون‌های ورودی و خروجی و انواع محصول هستند و به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که شرایط عملیاتی مراکز انبار متقاطع با مقیاس کوچک تا متوسط را شبیه‌سازی کنند. نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج حل مثال‌های عددی با ابعاد مختلف (بررسی مقیاس‌پذیری مدل)

Row	Number of inbound trucks	Number of outbound trucks	Type of product	Makespan	Carbon emissions	Solution time (seconds)
Example 1	15	13	2	809.644	2375	2880
Example 2	17	17	1	1239.5	7100	2880
Example 3	20	20	1	802.657	4050	3100
Example 4	20	20	3	1900	175	3100

برنامه‌ریزی آرمانی توسعه یافته حل شد. عملکرد مدل برنامه‌ریزی امکانی با پیاده‌سازی یک مثال کاربردی بررسی شد و نتایج نشان داد با پیاده‌سازی تابع اثربخشی مبتنی بر موقعیت زمان کل عملیات ۱۵.۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین تابع هدف جدید پیشنهادی می‌تواند میزان انتشار کربن را تا ۷۵٪ کاهش دهد.

به پژوهشگران آتی پیشنهاد می‌شود میزان اثرگذاری سایر توابع اثر یادگیری نیروی انسانی را در قالب روابط جایگزین بررسی نمایند. همچنین، عدم قطعیت می‌تواند با به‌کارگیری اعداد فازی توسعه‌یافته در تمامی پارامترهای مدل مورد

در برنامه‌ریزی آرمانی پیشنهادی در بازه‌ی [۰, ۱] تغییر کرده است. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول (۴) و شکل (۴) نشان می‌دهد با به‌کارگیری هم‌زمان میزان انتشار کربن و زمان کل عملیات به عنوان تابع هدف، نتایج متعادل‌تری بدست می‌آید و با افزایش اهمیت نسبی تابع هدف اول زمان کل عملیات از ۷۶۰۰ تا ۴۴۴۲ کاهش می‌یابد و با افزایش اهمیت نسبی تابع هدف دوم میزان انتشار کربن از ۵۴۵۰ تا ۳۷۵۰ کاهش می‌یابد به عبارتی با در نظر گرفتن متغیر میزان انتشار کربن به عنوان تابع هدف، میزان کربن حاصل از عملیات درون انبار می‌تواند تا ۷۵٪ کاهش می‌یابد.

جدول ۴. تاثیر تغییر وزن توابع هدف در برنامه‌ریزی آرمانی

W_1	Z_1	W_2	Z_2
0	7600	1	3750
0.1	5957	0.9	3650
0.3	4768	0.7	4050
0.5	4721	0.5	4575
0.7	4547	0.3	4575
0.9	4442	0.1	5450

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی امکانی جدید برای زمان‌بندی سیستم انبار متقاطع با درب‌های مختلط پیشنهاد شد. در مدل پیشنهادی اثر تکرار فعالیت‌ها بر یادگیری نیروی انسانی و کاهش زمان انجام فرآیند تخلیه و بارگیری کامیون‌ها در نظر گرفته می‌شود. توسعه یک تابع هدف جدید برای کمینه‌سازی میزان انتشار کربن ناشی از جابجایی درون انبار متقاطع در کنار کمینه‌سازی زمان کل عملیات، نوآوری دیگر پژوهش حاضر بوده است. برای مواجهه با عدم قطعیت برخی از پارامترهای مدل، از اعداد فازی مثلثی استفاده شده است. مدل دوهدفه امکانی با استفاده از روش

تصمیم‌های بهینه می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. در نهایت، با توجه به رشد پیچیدگی محاسباتی مسئله در ابعاد بزرگ‌تر، توسعه و به‌کارگیری روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری برای حل مسائل زمان‌بندی انبار متقاطع در مقیاس‌های واقعی بزرگ، به‌عنوان یکی از مسیرهای مهم پژوهشی آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع - References

- performance of a two-workstation production system. *International Journal of Production Economics*, 267, 109076. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109076>
7. Serrano, C., Delorme, X., & Dolgui, A., 2017. Scheduling of truck arrivals, truck departures and shop-floor operation in a cross-dock platform, based on trucks loading plans. *International Journal of Production Economics*, 194, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.008>
8. Hasani Goodarzi, A., Zegordi, S. H., Alpan, G., Nakhai Kamalabadi, I., & Hussein Zadeh Kashan, A., 2021. Reliable cross-docking location problem under the risk of disruptions. *Operational Research*, 21, 1569-1612. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00583-5>
9. Correa Issi, G., Linfati, R., & Escobar, J. W., 2020. Mathematical optimization model for truck scheduling in a distribution center with a mixed service-mode dock area. *Journal of Advanced Transportation*, 2020(1), 1-13. <https://doi.org/10.1155/2020/8813372>
10. Haghgoei, A., Irajpour, A., & Hamidi, N., 2024. A multi-objective optimization model of truck scheduling problem using cross-dock in supply chain management: NSGA-II and NRGa. *Journal of Modelling in Management*, 19(4), 1155-1179. <https://doi.org/10.1108/JM2-06-2023-0130>
11. Li, M., Hao, J. K., & Wu, Q., 2024. A flow-based formulation and a reinforcement learning based strategic oscillation for cross-dock door assignment. *European Journal of Operational Research*, 312(2), 473-492. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.014>
12. Rajabzadeh, M., & Mousavi, S. M., 2023. A new interval-valued fuzzy optimization model for truck scheduling in a multi-door
1. Seyedi, I., Hamed, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R., 2021. Developing a mathematical model for a multi-door cross-dock scheduling problem with human factors: A modified imperialist competitive algorithm. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 8(1), 180-201. <https://doi.org/10.22116/jiems.2021.252150.1395>
2. Rajabzadeh, M., & Mousavi, S. M., 2023. Allocation of products to a heterogeneous fleet of trucks in a cross-docking center based on carbon emissions and costs in food and beverage industry: Novel uncertain solution approaches. *Journal of Environmental Management*, 332, 117071. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117071>
3. Essghaier, F., Allaoui, H., & Goncalves, G., 2021. Truck to door assignment in a shared cross-dock under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 182, 114889. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114889>
4. Mogale, D. G., De, A., Ghadge, A., & Tiwari, M. K., 2023. Designing a sustainable freight transportation network with cross-docks. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1455-1478. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2037777>
5. Rijal, A., Bijvank, M., & de Koster, R., 2019. Integrated scheduling and assignment of trucks at unit-load cross-dock terminals with mixed service mode dock doors. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 752-771. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.04.028>
6. Ranasinghe, T., Senanayake, C. D., & Grosse, E. H., 2024. Effects of stochastic and heterogeneous worker learning on the

- logistics networks with a cross-docking center, *Kybernetes*, 54(5), 2806-2836. <https://doi.org/10.1108/K-12-2022-1637>
20. Altaf, A., El Amraoui, A., Delmotte, F., & Lecoutre, C. (2025). Robust cross-dock assignment problem with fuzzy chance constrained optimization approach: A. Altaf et al. *Operational Research*, 25(4), 106. <https://doi.org/10.1007/s12351-025-00968-4>
 21. Eti, N. A., Ferrell Jr, W. G., & Huynh, N. (2025). Multi-door cross-dock scheduling under flexible doors mode and material handling resource restrictions. *Computers & Operations Research*, 183, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107183>
 22. Zhang, Y., Peng, Y. Q., Wang, W., Gu, J., Wu, X. J., & Feng, X. J. (2017). Air emission inventory of container ports' cargo handling equipment with activity-based "bottom-up" method. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(7), 1687814017711389. <https://doi.org/10.1177/1687814017711389>
 23. Williams, H. P., 2013. Model building in mathematical programming. John Wiley & Sons.
 24. Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
 25. Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodri, M. V., 2007. Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution. *European journal of operational research*, 177(3), 1599-1609. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.002>
 26. Chang, C. T., 2011. Multi-choice goal programming with utility functions. *European journal of operational Research*, 215(2), 439-445. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.06.041>
 - cross-docking system by considering transshipment and flexible dock doors extra cost. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 20(6), 63-84. [10.22111/ijfs.2023.41416.7203](https://doi.org/10.22111/ijfs.2023.41416.7203)
 13. Wright, T. P., 1936. Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the aeronautical sciences*, 3(4), 122-128. <https://doi.org/10.2514/8.155>
 14. Biskup, D., 2008. A state-of-the-art review on scheduling with learning effects. *European Journal of Operational Research*, 188(2), 315-329. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.040>
 15. Chargui, T., Bekrar, A., Reghioui, M., & Trentesaux, D., 2019. Multi-objective sustainable truck scheduling in a rail-road physical internet cross-docking hub considering energy consumption. *Sustainability*, 11(11), 3127. <https://doi.org/10.3390/su11113127>
 16. Stanković, R., Rogić, K., & Šafran, M., 2022. Saving Energy by Optimizing Warehouse Dock Door Allocation. *Energies* 2022, 15(16), 5862. <https://doi.org/10.3390/en15165862>
 17. Alinaghian, M., Hasanazadeh, A., Zeinal Hamadani, A. A new mathematical model for simultaneous dock assignment and vehicle routing with soft time windows within cross-docks. *Sharif Journal of Industrial Engineering (SJIE)*, 35(1.2), 75-84, [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j65.2018.7184.1749>
 18. Bagheri, M., Assadi, M.T., Joulai, F. Three evolutionary multi-objective algorithms for door assigning and sequencing of inbound and outbound trucks in cross-docking terminals. *Sharif Journal of Industrial Engineering (SJIE)*, 33(2.1), 117-128, [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j65.2018.5489>
 19. Rajabzadeh, M., Mousavi, S. M., & Azimi, F. (2025). A new gray optimization model for disposing or re-commercializing unsold goods in reverse