

مقایسه‌ی سه الگوریتم فراابتکاری NSGA-II، PESA-II و SPEA-II در حل مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون‌ها در مراکز بارانداز

محسن باقری* (استادیار)

محمدتقی اسعدی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی سجاد

فریبرز جولای (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه تهران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۶ (۱۳۹۶)
دوره‌ی ۱، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۱۷-۱۲۸

بارانداز یک استراتژی انبارداری جدید است که با حذف ذخیره‌سازی موجودی و همچنین یک بارچه‌سازی محموله‌های هم‌مقصد هزینه‌های انبارداری و همچنین حمل و نقل را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. زمان‌بندی کامیون‌ها از جمله مسائل مهم و ضروری برای تضمین جریان مناسب مواد در بارانداز و همچنین ارسال به موقع محصولات به مشتریان است. در این مقاله مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون‌ها در سیستم بارانداز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و یک مدل چندهدفه برای این مسئله ارائه شده است. برای حل مدل سه الگوریتم ژنتیک چندهدفه شامل نسخه‌ی دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)، نسخه‌ی دوم الگوریتم انتخاب مبتنی بر الگوی پارتو (PESA-II) و نسخه‌ی دوم الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو (SPEA-II) توسعه داده شده است. به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی چندین مسئله‌ی نمونه براساس شیوه‌های رایج در پیشینه‌ی موضوع تولید شده است. در نهایت، پاسخ‌های پارتو به دست آمده از سه الگوریتم با استفاده از چندین معیار ارزیابی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این مقاله مشاهده شد که الگوریتم SPEA-II می‌تواند پاسخ‌هایی تولید کند که از لحاظ معیارهای ارزیابی در نظر گرفته شده، نسبت به دو الگوریتم دیگر دارای کیفیتی مطابقت‌تر هستند.

واژگان کلیدی: بارانداز، زمان‌بندی کامیون‌ها، تخصیص درب، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه.

m.bagheri@sadjad.ac.ir
m.assadi.ie@gmail.com
fjolai@ut.ac.ir

۱. مقدمه

بمانند بار کامیون ورودی بلافاصله تخلیه شده و پس از بررسی‌های لازم و زدن بارکد در صورت نیاز، مقصد محموله مشخص می‌شود. سپس کالاها توسط سیستم کانویر، یا توسط تعدادی کارگر، یا با کمک سایر وسایل نقلیه (مانند لیفتراک) به درب ارسال منظور شده (جایی که کالاها بر یک کامیون خروجی^۱ که به مقصد مورد نظر تخصیص یافته بارگذاری می‌شود) منتقل می‌شوند. بلافاصله پس از این که یک کامیون ورودی کاملاً تخلیه شد یا یک کامیون خروجی کاملاً بارگذاری شد، کامیون دیگری جایگزین کامیون قبلی می‌شود.^[۱]

اهداف بارانداز در راستای اهداف مدیریت زنجیره‌ی تأمین است و آن عبارت است از حجم کم‌تر موجودی قابل مشاهده که سریع‌تر اما با دفعات بیشتر ارسال شود. در پیشینه‌ی موضوع چندین مزیت دیگر بارانداز در مقایسه با به‌کارگیری یک مرکز پخش سنتی بیان شده است. برخی از این مزایا در مقایسه با مرکز پخش سنتی عبارت‌اند از:

استراتژی توزیع بارانداز امروزه در دنیا بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تعداد زیادی از شرکت‌ها در صنایع مختلف از مزایای این استراتژی لجستیکی بهره می‌برند. ایده‌ی اصلی باراندازها انتقال محموله‌های ورودی بدون ذخیره‌سازی، به‌وسیله‌ی کامیون‌های خروجی است. در واقع این شیوه به دنبال حذف فرایندهای ذخیره‌سازی است. این اقدام اهداف گوناگونی می‌تواند داشته باشد: تقویت محموله، کوتاه‌تر شدن زمان رسیدن محصول به مشتری، کاهش یا حذف کامل هزینه‌های ذخیره‌سازی و ...^[۱] در شکل ۱ نمایی شماتیک از عملیات جابه‌جایی مواد روی یک بارانداز مستطیل شکل با ۸ درب نشان داده شده است. کامیون‌های ورودی^۱ مستقیماً به یک بارانداز تخلیه (درب دریافت) اختصاص می‌یابند یا این که باید تا زمان تخصیص در صف

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۱۵، پذیرش ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

نمونه با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی تحلیل می‌شود. و نهایتاً در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. پیشینه‌ی موضوع

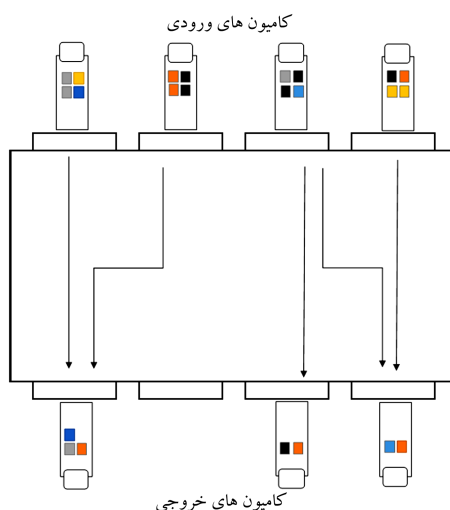
یو و اگیلو^[۲] یک مدل زمان‌بندی برای تعیین توالی کامیون‌ها در باراندازی با تنها یک درب ورودی^۹ و خروجی^{۱۰} ارائه کرده‌اند. مدل می‌تواند هم‌زمان زمان‌بندی کامیون و تخصیص محصول را مشخص کند. هدف مدل کمینه‌سازی زمان عملیات کل است، درحالی‌که یک انبار موقت میانی برای نگهداری کالاها به صورت موقتی در بارانداز ارسال^{۱۱} وجود دارد. این مطالعه توسط وحدانی و زندیه،^[۴] عربانی و همکاران^[۵] و با ارائه‌ی چندین الگوریتم فراابتکاری ادامه یافت. عربانی و همکاران^[۶] به مسئله‌ی با همان مفروضات، اما با رویکرد درست به موقع^{۱۲} پرداخته‌اند. آن‌ها یک زمان‌بندی چندمعیاره پیشنهاد کرده‌اند که هدف اولیه‌اش کمینه‌سازی هم‌زمان زودکردها و دیرکردها با یک تابع هدف یک‌پارچه است. مؤلفان سه متاهوریستیک شامل GA^{۱۳}، DE^{۱۴} و PSO^{۱۵} برای حل این مسئله پیشنهاد کردند.

محتشمی^[۷] یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون‌ها با هدف کمینه‌سازی زمان عملیات کل ارائه کرده است. در مدل پیشنهادی احتمال این که کامیون‌های خروجی در چندین نوبت کالای خود را دریافت کنند وجود دارد. کشتزاری و همکاران^[۸] یک مدل جدید عدد صحیح مختلط برای مسئله‌ی زمان‌بندی در سیستم‌های بارانداز پیشنهاد کرده‌اند. برای حل مسائل با مقیاس بزرگ، یک الگوریتم ترکیبی^{۱۶} حاصل از ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و شبیه‌سازی تبرید ارائه شده، و نتایج حاصل با یکی از مقالات موجود مقایسه شده است. در سال ۲۰۱۶ یک مدل ریاضی برای زمان‌بندی کامیون‌ها در حالتی که کامیون‌های خروجی باید در زمان‌های از پیش تعیین‌شده بارانداز ارسال را ترک کنند، پیشنهاد شد،^[۹] در این مطالعه برای حل مسائل یک الگوریتم ابتکاری نیز ارائه شده است.

در زمینه‌ی مسائل زمان‌بندی کامیون در بارانداز که در آن مسئله به صورت تک‌هدفه در نظر گرفته شده، تحقیقات زیادی انجام شده است.^[۱۰-۱۵] در دنیای واقعی لازم است چندین هدف که معمولاً با یکدیگر تناقضاتی نیز دارند، به طور هم‌زمان بهینه شوند. بهینه‌سازی چندهدفه با چنین اهدافی به جای ارائه‌ی تنها یک پاسخ بهینه، مجموعه‌ی از پاسخ‌های بهینه را فراهم می‌آورد. در این زمینه‌ی تحقیقات اندکی ارائه شده که در ادامه تشریح می‌شوند.

عربانی و همکاران^[۱۶] سه الگوریتم چندهدفه شامل NSGA-II، SPEA-II و SPGA-II برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی باراندازهای دارای یک درب ورودی و خروجی ارائه کردند. توابع هدف به صورت کمینه‌سازی زمان عملیاتی کل و تأخیر کل تریلرهای خروجی در نظر گرفته شده است. عربانی و همکارانش^[۱۷] بار دیگر برای حل همان مسئله، سه الگوریتم چندهدفه شامل SPGA-II، SPPSO-II و SPDE-II را توسعه داده‌اند. نهایتاً نتایج آنها از آزمایشات نشان می‌دهد که SPPSO-II در مقایسه با دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارد.

نقص‌های موجود در تحقیقات پیشین شامل عدم توجه به تعداد درب‌های بارانداز است، به‌گونه‌ی که بسیاری از مؤلفان فرض کرده‌اند که تنها یک درب ورودی به یک درب خروجی خدمت‌دهی می‌کند.^[۲-۴، ۱۳-۱۵] به همین دلیل در تحقیق پیش رو مدلی ارائه شده است که برای باراندازهایی با هر تعداد درب ورودی و خروجی کاربرد داشته باشد. نوآوری دیگر این پژوهش آن است که برخلاف بیشتر مقالات^[۲-۴، ۱۰-۱۲] که در



شکل ۱. یک بارانداز مستطیل شکل با ۸ درب بارانداز.

- کاهش هزینه (هزینه‌ی انبارداری، نگهداری موجودی، حمل و نقل، کار)؛
- زمان ارسال کوتاه‌تر (از تأمین‌کننده به مشتری)؛
- بهبود خدمات به مشتری؛
- کاهش فضای ذخیره‌سازی (انبار)؛
- معاملات سریع‌تر موجودی؛
- کاهش موجودی بیشتر از حد نیاز؛
- کاهش خطر خرابی و از دست دادن محموله‌ها.

این مزایا بارانداز را به یک استراتژی محبوب لجستیکی تبدیل کرده، که می‌تواند برای شرکت‌ها مزایای رقابتی را به ارمغان آورد. والمارت یک مثال شناخته شده است، البته چندین شرکت دیگر نظیر شرکت ایستمن کداک^۲، گودیر^۴، دانس^۵، ال‌ال‌سی^۶، و توپوتا^۷ نیز اجرای موفقیت‌آمیز بارانداز را گزارش کرده‌اند.^[۲۱]

این که کامیون‌های ورودی و خروجی به کدامین درب (در یک سیستم بارانداز با چندین درب) تخصیص یابد و توالی خدمت‌دهی به آن‌ها به چه صورت انجام گیرد، جزو تصمیمات عملیاتی در استقرار یک سیستم بارانداز است. برای روان شدن جریان فیزیکی مواد و اتمام سریع فرایندهای تخلیه و بارگذاری کالاها که منجر به ارسال به موقع کامیون‌های خروجی به مقصدهای از پیش تعیین‌شده شود، ارائه‌ی یک زمان‌بندی خوب در یک سیستم بارانداز حیاتی است. زمان‌بندی ضعیف کامیون‌ها می‌تواند باعث جریان ضعیف محصول و زمان پردازش طولانی شود و در نتیجه هزینه‌ها را افزایش دهد. بنابراین، هدف برخی از مدل‌های پیشنهادی برای مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون‌ها، کمینه‌کردن زمان انجام عملیات کل (زمان اتمام)^۸ است که به منظور کمینه‌کردن هزینه صورت می‌گیرد.

در این پژوهش یک مدل ریاضی، که بتواند تخصیص کامیون‌ها به درب‌ها و همچنین زمان‌بندی عملیات تخلیه و بارگذاری کامیون‌ها را طوری انجام دهد که هم‌زمان معیارهای زمان اتمام کل، دیرکرد کامیون‌های ورودی و دیرکرد کامیون‌های خروجی کمینه‌شوند، پیشنهاد شده است.

در ادامه و در بخش دوم به بیان مقالات ارائه‌شده در زمینه‌ی مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون‌ها پرداخته شده است. در بخش سوم مدل چندهدفه‌ی پیشنهادی ارائه شده است. بخش چهارم به تشریح روش حل مسئله در قالب الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه اختصاص دارد. در بخش پنجم نتایج رایانه‌ی حاصل از حل مسائل

-- هر درب منحصراً به فرایند بارگذاری یا تخلیه تعلق دارد، زیرا در واقعیت نیز برای تسهیل جریان محصولات عموماً از این نوع سیستم استفاده می‌شود.

-- زمان انتقال محصولات از هر درب ورودی به هر درب خروجی بستگی به فاصله‌ی آن‌ها دارد، زیرا زمان انتقال محصولات بین درب‌هایی که در فاصله‌ی بیشتری نسبت به هم قرار گرفته‌اند به مراتب بیشتر از زمان انتقال بین درب‌هایی است که در نزدیکی یکدیگر قرار دارند.

-- تمامی کامیون‌های ورودی و خروجی به محض تکمیل فرایند تخلیه/بارگذاری بارانداز را ترک می‌کنند. همچنین زمان‌های مقرر برای کامیون‌های ورودی و خروجی به صورت محدودیت نرم در توابع هدف گنجانده شده‌اند.

-- ویژگی قطع کار در مدل لحاظ نشده است. یعنی یک کامیون بعد از این که به درب مورد نظر تخصیص یافت تا زمانی که کاملاً تخلیه/بارگذاری نشده باشد، بارانداز را ترک نخواهد کرد.

-- کامیون‌ها می‌توانند ظرفیت‌های متفاوتی داشته باشند.

-- انبار موقت برای ذخیره‌سازی موقت کالاهای انتقالی از کامیون‌های ورودی به کامیون‌های خروجی در نظر گرفته شده است. وجود این انبار موقت از این جهت ضروری است که ممکن است تمامی محصولات تخلیه شده از یک کامیون ورودی در همان لحظه به یک کامیون خروجی مستقل نشود.

-- در این مدل سیاست پیشاتوزیع در بارانداز حاکم است؛ بنابراین تخصیص محصولات انتقالی از هر کامیون ورودی به هر کامیون خروجی از قبل مشخص است.

در این مدل ما به دنبال کمینه‌سازی زمان تکمیل کل^{۲۲}، مجموع تأخیر کامیون‌های ورودی، و مجموع تأخیر کامیون‌های خروجی هستیم که به نوعی با یکدیگر در تناقض و رقابت‌اند. این تناقض در مثال حل شده در نرم‌افزار گمز^{۲۳} (با استفاده از حل‌گر سیپلکس^{۲۴})، در بخش ۳.۳. نشان داده خواهد شد. یادآور می‌شود که در مدل‌سازی مسئله از مطالعات پیشین^[۱۵،۳] استفاده شده است. در ادامه پس از معرفی پارامترها و متغیرهای مسئله، مدل ریاضی تشریح خواهد شد.

۲.۲.۳. پارامترها

I : تعداد کامیون‌های ورودی؛

O : تعداد کامیون‌های خروجی؛

R : تعداد درب‌های دریافت؛

S : تعداد درب‌های ارسال؛

m_{ij} : تعداد محصولاتی که باید از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j ارسال شود؛
 v_{ij} : اگر از کامیون ورودی i محصولی به کامیون خروجی j ارسال شود ۱ است و در غیر این صورت صفر؛

t_{mn} : زمان انتقال محصولات بین درب ورودی m و درب خروجی n ؛

DI_i : زمان مقرر برای خروج کامیون ورودی i ؛

DO_j : زمان مقرر برای خروج کامیون خروجی j ؛

ULT : زمان لازم برای تخلیه‌ی یک واحد محصول؛

LT : زمان لازم برای بارگذاری یک واحد محصول؛

DT : زمان جایگزینی کامیون‌ها در یک درب؛

M : یک عدد بزرگ مثبت.

۳.۲.۳. متغیرهای پیوسته

e_i : زمان شروع عملیات تخلیه‌ی کامیون ورودی i ؛

E_i : زمان تکمیل عملیات تخلیه‌ی کامیون ورودی i ؛

آنها سیستم پیشاتوزیع^{۱۷} در نظر گرفته شده (تخصیص محصولات از قبل مشخص نیست)، در این مقاله سیستم پیشاتوزیع^{۱۸} مد نظر قرار گرفته است. همچنین در اکثر تحقیقات^[۱۰،۱۲-۱۴] فرض شده است زمان انتقال بین درب‌های مختلف ثابت و برابر است. بنابراین در این تحقیق برای نزدیک‌تر شدن مدل به واقعیت این زمان‌ها متفاوت و وابسته به فاصله‌ی بین درب‌ها در نظر گرفته می‌شود. دیگر نوآوری در نظر گرفته شده در این تحقیق رویکردی چندهدفه است که می‌تواند هم‌زمان سه معیار با اهمیت شامل زمان تکمیل کل، مجموع تأخیر کامیون‌های ورودی و مجموع تأخیر کامیون‌های خروجی را کمینه کند و در تصمیم‌گیری به مدیران بارانداز کمک کند.

۳. مدل چندهدفه‌ی پیشنهادی

۱.۳. بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی چندهدفه که به دنبال بهینه‌کردن اهداف متناقض یا اهدافی است که به نوعی با یکدیگر در رقابت‌اند، به جای ارائه‌ی تنها یک پاسخ بهینه، مجموعه‌ی بی‌پاسخ‌های بهینه را فراهم می‌آورد. مجموعه پاسخ‌های بهینه که پارتو - اپتیمال نیز گفته می‌شود، شامل پاسخ‌هایی است که ضمن در نظر گرفتن تمامی اهداف، هیچ‌کدام بر دیگری برتری ندارند. یک مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه (MOP) با n تابع هدف، را می‌توان «تعیین یک بردار از متغیرهای تصمیم‌گیری در فضای شدنی» تعریف کرد که یک بردار از توابع هدف را بهینه می‌کند. بدون کاستن از کلیت آن فرض می‌کنیم مسئله‌ی کمینه‌سازی باشد، چنین مسئله‌ی را می‌توان چنین بیان کرد:

$$\min \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\} \quad (1)$$

$$\text{subject to } g(x) \leq 0, \quad (2)$$

که در آن بردار x نشان‌گر متغیرهای تصمیم‌گیری (پاسخ)، $f_i(x)$ بیان‌گر i امین تابع هدف، و $g(x)$ معرف بردار محدودیت‌هاست.

«غلبه^{۱۹}» در بهینه‌سازی چندهدفه به مفهوم آن است که یک بردار پاسخ x یک بردار پاسخ y را مغلوب می‌کند ($x \succ y$)، اگر:

$$f_i(x) \leq f_i(y) \quad \text{for all } i \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

$$f_i(x) < f_i(y) \quad \text{for at least one } i \in \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

بنابراین مجموعه پاسخ‌های بهینه (پارتو - اپتیمال)، شامل تمامی پاسخ‌های نامغلوب^{۲۰} بهینه‌است و نمایش آن پاسخ‌ها در فضای توابع هدف، به عنوان جبهه‌ی پارتو - بهینه^{۲۱} شناخته می‌شود.

۲.۳. مدل پیشنهادی

در این بخش یک مدل ریاضی پیشنهاد می‌شود که می‌تواند تخصیص کامیون‌ها به درب‌ها و همچنین زمان‌بندی عملیات تخلیه و بارگذاری کامیون‌ها را مشخص کند، به طوری که هم‌زمان معیارهای زمان اتمام کل، دیرکرد کامیون‌های ورودی و دیرکرد کامیون‌های خروجی کمینه شوند. در این مدل سیاست پیشاتوزیع لحاظ شده است، یعنی تخصیص محصولات به کامیون‌ها از قبل مشخص شده است. در ادامه ابتدا مفروضات مدل پیشنهادی ارائه و سپس مدل ریاضی تشریح می‌شود.

۱.۲.۳. مفروضات

-- چندین درب دریافت و چندین درب ارسال برای کامیون‌های ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است.

l_j : زمان شروع عملیات بارگذاری کامیون خروجی j ؛

L_j : زمان تکمیل عملیات بارگذاری کامیون خروجی j ؛

TI_i : تأخیر کامیون ورودی i ؛

TO_j : تأخیر کامیون خروجی j .

۴.۲.۳. متغیرهای صفر و یک

x_{im} : اگر کامیون ورودی i به درب دریافت m تخصیص یابد معادل ۱، و در غیر این صورت صفر؛

y_{jn} : اگر کامیون خروجی j به درب ارسال n تخصیص یابد معادل ۱، و در غیر این صورت صفر؛

p_{ij} : اگر کامیون‌های ورودی i و j به یک درب تخصیص یافته باشند و i پیش از j در توالی ظاهر شود معادل ۱، در غیر این صورت صفر؛

q_{ij} : اگر کامیون‌های خروجی i و j به یک درب تخصیص یافته باشند و i پیش از j در توالی ظاهر شود معادل ۱، در غیر این صورت صفر؛

u_{ijmn} : اگر محصولی از کامیون ورودی i که به درب دریافت m تخصیص یافته است به کامیون خروجی j که به درب ارسال n تخصیص یافته منتقل شود معادل ۱، در غیر این صورت صفر.

۵.۲.۳. مدل چندهدفه‌ی عدد صحیح مختلط

$$\min z_1 = C_{\max} \quad (5)$$

$$\min z_2 = \sum_{i=1}^I TI_i \quad (6)$$

$$\min z_3 = \sum_{j=1}^O TO_j \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^R x_{im} = 1 \quad \text{for all } i \quad (8)$$

$$u_{ijmn} \geq x_{im} + y_{jn} + v_{ij} - 2 \quad \text{for all } i, j, m, n \quad (9)$$

$$x_{im} + x_{jm} = p_{ij} + p_{ji} + 1 \quad \text{for all } i, j, m \quad (10)$$

$$e_j \geq E_i + DT - M \cdot (1 - p_{ij}), \quad \text{for all } i, j \quad (11)$$

$$E_i \geq e_i + ULT \sum_{j=1}^O r_{ij} \quad \text{for all } i \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^S y_{jn} = 1 \quad \text{for all } j \quad (13)$$

$$y_{in} + y_{jn} = q_{ij} + q_{ji} + 1 \quad \text{for all } i, j, n \quad (14)$$

$$l_j \geq L_i + DT - M \cdot (1 - q_{ij}), \quad \text{for all } i, j \quad (15)$$

$$L_j \geq l_j + LT \sum_{i=1}^I r_{ij} \quad \text{for all } j \quad (16)$$

$$L_j \geq E_i + LT \cdot r_{ij} + t_{mn} - M \cdot (1 - u_{ijmn}) \quad \text{for all } i, j, m, n \quad (17)$$

$$TI_i \geq E_i - DI_i \quad \text{for all } i \quad (18)$$

$$TO_j \geq L_j - DO_j \quad \text{for all } j \quad (19)$$

$$C_{\max} \geq L_j \quad \text{for all } j \quad (20)$$

all variables ≥ 0 .

تابع هدف ۵ زمان تکمیل کل فرایند را کمینه می‌کند. توابع هدف ۶ و ۷ به ترتیب مجموع تأخیر کامیون‌های ورودی و خروجی را کمینه می‌کنند. محدودیت ۸ بیان می‌کند که هر کامیون ورودی دقیقاً به یک درب تخصیص یابد. محدودیت ۹ رابطه‌ی صحیح بین متغیرهای x_{im} ، y_{jn} و u_{ijmn} را بیان می‌کند. در واقع در این رابطه اگر مقدار متغیرهای x_{im} و y_{jn} و همچنین پارامتر v_{ij} برابر ۱ باشد، آنگاه متغیر u_{ijmn} مقدار ۱ خواهد گرفت. محدودیت ۱۰ بیان می‌کند اگر کامیون‌های ورودی i و j به درب دریافت m تخصیص یابند، آنگاه یکی از دو کامیون باید زودتر از دیگری تخلیه شود. این رابطه تضمین می‌کند که در این حالت تنها یکی از متغیرهای p_{ij} و p_{ji} باید مقدار ۱ اختیار کنند. محدودیت ۱۱ زمان شروع هر کامیون ورودی را برابر با مجموع زمان تکمیل کامیون قبل در توالی و زمان لازم برای جایگزینی کامیون قرار می‌دهد. محدودیت ۱۲ بیان می‌کند که زمان تکمیل فرایند تخلیه‌ی هر کامیون ورودی برابر است با مجموع زمان شروع فرایند و زمان لازم برای تخلیه‌ی محصولات آن کامیون. محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند که هر کامیون خروجی دقیقاً به یک درب ارسال تخصیص یابد. محدودیت ۱۴ رابطه‌ی صحیح بین متغیرهای y_{jn} و q_{ij} را برای کامیون‌های خروجی تعریف می‌کند. این محدودیت مشابه محدودیت ۱۰ است که برای کامیون‌های خروجی تعریف شده است. محدودیت ۱۵ زمان شروع فرایند بارگیری هر کامیون خروجی را برابر با مجموع زمان‌های تکمیل کامیون قبلی در آن درب و جایگزینی کامیون‌ها قرار می‌دهد. محدودیت ۱۶ بیان می‌کند که زمان تکمیل بارگیری هر کامیون خروجی برابر با مجموع زمان شروع بارگیری و زمان لازم برای بارگذاری محصولات مورد نیاز آن است. محدودیت ۱۷ بیان می‌کند زمان تکمیل بارگذاری کامیون خروجی j در صورتی که از کامیون ورودی i محصولی دریافت کند (مقدار u_{ijmn} برابر ۱ باشد) باید بزرگ‌تر یا مساوی جمع جبری زمان تکمیل تخلیه‌ی کامیون ورودی i ، مدت زمان لازم برای انتقال محصولات بین درب‌های m و n (که به ترتیب کامیون‌های ورودی i و j بدان‌ها تخصیص یافته‌اند) و همچنین مدت زمان لازم برای بارگذاری محصولات انتقالی r_{ij} باشد. محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب، تأخیر کامیون‌های ورودی و خروجی را تعریف می‌کنند. محدودیت ۲۰ زمان تکمیل کل فرایند را بزرگ‌تر یا مساوی با زمان اتمام بارگذاری کلیه کامیون‌های خروجی قرار می‌دهد.

۳.۳. اعتبارسنجی مدل

تابع هدف کمینه‌سازی زمان اتمام کل [۲] و مجموع دیرکرد کامیون‌های ورودی و خروجی به صورت جمع جبری [۱۵] مورد استفاده‌ی محققین قرار گرفته است. در این مقاله برای آن که بتوانیم رویکرد استوارتری ارائه کنیم از مدل چندهدفه استفاده کرده‌ایم و سه الگوریتم فراابتکاری نیز برای حل آن پیشنهاد کرده‌ایم. در این قسمت برای نشان دادن ویژگی‌های مسئله، یک مثال با مقیاس کوچک با استفاده از مدل ریاضی حل می‌شود. اطلاعات کامل مربوط به این مثال در جدول ۱ آمده است.^{۲۵}

در این بخش در واقع مدل سه‌هدفه به صورت یک مدل تک‌هدفه با هر یک از توابع هدف با استفاده از حل‌گر سیپلکس حل می‌شود. در جدول ۲ اطلاعات حاصل از حل بهینه‌ی مثال، با در نظر گرفتن هر یک از توابع هدف ثبت شده است. در این جدول در سطر اول جواب بهینه با در نظر گرفتن تابع هدف ۱، در سطر دوم

جدول ۱. اطلاعات مربوط به مثال با سایز کوچک.

r_{ij}						DI_i	DO_j	tmn	
۳۹	۰	۰	۰	۰	۰	۳۰۰	۶۰۰	۱۰۰	۱۱۰
۲۶	۰	۱۳	۴۳	۰	۰	۱۶۰	۷۵۰	۱۱۰	۱۰۰
۱۱	۰	۰	۱۷	۷	۰	۱۹۰	۸۶۰		
۳۲	۱۹	۰	۰	۱۸	۲۵	۴۷۰	۳۵۰	DT	
۰	۳۴	۵۰	۳۷	۶	۴۸	۲۷۰	۴۱۰	۷۵	
۰	۲۳	۷	۰	۲۶	۳	۱۱۰	۲۹۷		

جدول ۲. پاسخ‌های بهینه برای مثال با سایز کوچک، با حل مدل براساس سه تابع هدف به صورت جداگانه.

تخصیص و توالی				توابع هدف		
درب ارسال ۲	درب ارسال ۱	درب دریافت ۲	درب دریافت ۱	z_1	z_2	z_3
{۲ → ۵ → ۴}	{۶ → ۳ → ۱}	{۵ → ۲ → ۱}	{۴ → ۶ → ۳}	۴۹۹	۵۸۴	۶۶۵
—	{۱ → ۲ → ۳ → ۴ → ۵ → ۶}	{۶ → ۵}	{۲ → ۳ → ۱ → ۴}	۲۷۰۱	۵۲	۱۳۶۸
{۶ → ۴ → ۲}	{۵ → ۱ → ۳}	{۴ → ۶ → ۲}	{۵ → ۳ → ۱}	۲۱۴	۵۳۷	۸۲۴

۸	۶	*	۱	۳	۵	۲	*	۷	۴
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

بارکش های ورودی

۱	۲	۶	۵	۴	*	۳	۸	۷
---	---	---	---	---	---	---	---	---

بارکش های خروجی

شکل ۲. نحوه نمایش پاسخ به صورت جایگشت اعداد به همراه کاراکتر خاص جدا کننده.

درب دریافت ۱

۸	۶
---	---

درب ارسال ۱

۱	۲	۶	۵	۴
---	---	---	---	---

درب دریافت ۲

۱	۳	۵	۲
---	---	---	---

درب ارسال ۲

۳	۸	۷
---	---	---

درب دریافت ۳

۷	۴
---	---

شکل ۳. نحوه تخصیص و ترتیب خدمت‌گیری کامیون‌ها.

$$z_1 = \max(L_1, L_2, \dots, L_O) \quad (21)$$

$$z_2 = \sum_{i=1}^I \max(0, E_i - DI_i) \quad (22)$$

$$z_3 = \sum_{j=1}^O \max(0, L_j - DO_j) \quad (23)$$

۲.۴. الگوریتم NSGA-II

یک روش متداول برای حل مسائل با چندین تابع هدف، الگوریتم NSGA^{۲۷} است که مبتنی بر الگوریتم ژنتیک است. این الگوریتم روشی کارآمد برای حل مسائل با چند تابع هدف است، اما از دو جهت ضعف دارد: ۱. پیچیدگی محاسباتی؛ ۲. انتخاب ذره‌های غالب. از این رو روش اصلاح شده‌ی این الگوریتم تحت عنوان NSGA-II توسط دپ و همکاران^[۱۵] توسعه داده شد که در ادامه گام‌های این الگوریتم تشریح می‌شود.

جواب بهینه با در نظر گرفتن تابع هدف ۲ و نهایتاً در سطر سوم جواب بهینه با در نظر گرفتن تابع هدف ۳ آورده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود پاسخ‌های به دست آمده نشان‌دهنده تناقض و رقابت بین توابع هدف است.

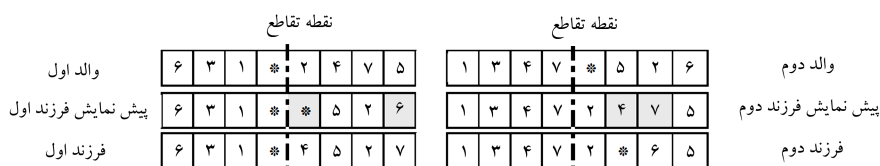
۴. روش حل مسئله

۴.۱. شیوه نمایش یک راه حل

نحوه نمایش یک پاسخ^{۲۶} در کیفیت پاسخ‌های به دست آمده توسط الگوریتم‌ها تأثیر به‌سزایی دارد. در این پژوهش برای نمایش یک بردار پاسخ (کروزوم) از جایگشت اعداد به همراه کاراکتر خاص جداکننده استفاده می‌شود. در این شیوه، دو رشته از اعداد جایگشتی ایجاد می‌شود که رشته‌ی اول تخصیص و توالی کامیون‌های ورودی و رشته‌ی دوم تخصیص و توالی کامیون‌های خروجی را نشان می‌دهد. رشته‌ی اول دارای $R + I - 1$ رقم (یک واحد کم‌تر از مجموع تعداد کامیون‌های ورودی و تعداد درب‌های دریافت) از 1 تا $R + I - 1$ است که هر رقم در آن فقط و فقط یک بار ظاهر می‌شود. از این میان ارقام بزرگ‌تر از I به‌عنوان جداکننده شناخته می‌شود که نشان‌گر تخصیص کامیون‌هاست. همچنین در رشته‌ی دوم به تعداد $S + O - 1$ رقم (یک واحد کم‌تر از مجموع تعداد کامیون‌های خروجی و تعداد درب‌های ارسال) از 1 تا $S + O - 1$ بدون تکرار ایجاد می‌شود که ارقام بزرگ‌تر از O به‌عنوان جداکننده در نظر گرفته می‌شوند و تخصیص کامیون‌های خروجی را مشخص می‌کنند.

در شکل ۲ این نحوه نمایش پاسخ برای باراندازی که ۸ کامیون ورودی، ۸ کامیون خروجی، ۳ درب دریافت و ۲ درب ارسال دارد نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳ توالی و تخصیص حاصله از این نحوه نمایش نشان داده شده است.

با استفاده از شیوه تشریح شده برای نمایش یک پاسخ، به راحتی تخصیص و توالی کامیون‌ها مشخص شده و می‌توان زمان‌های اتمام پردازش کامیون‌های ورودی و خروجی را برای یک بردار پاسخ به دست آورد. با تعیین زمان‌های تکمیل پردازش هر کامیون مقادیر سه تابع هدف به ترتیب با استفاده از روابط ۲۱ تا ۲۳ محاسبه خواهد شد.



شکل ۴. عملگر ترکیب یک نقطه‌یی.



شکل ۵. عملگر جهش (جابجایی جفتی).

۲.۲.۴. عملگر جهش

جهش نیز عملگر دیگری است که جواب‌های ممکن دیگری را ایجاد می‌کند. در الگوریتم‌های ژنتیک بعد از این که یک عضو در جمعیت جدید به وجود آمد هر ژن آن با احتمال جهش، جهش می‌یابد. در جهش ممکن است ژنی از مجموعه ژن‌های جمعیت حذف شود یا ژنی که تا به حال در جمعیت وجود نداشته به آن اضافه شود. جهش یک ژن به معنای تغییر تصادفی آن ژن است. در اینجا روش جایگزینی جفتی^{۲۹} برای اپراتور جهش در نظر گرفته شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شیوه مکان دو ژن که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند تعویض می‌شود.

برای مشاهده‌ی جزئیات بیشتر پیاده‌سازی این الگوریتم به مرجع^[۱۵] مراجعه کنید.

۳.۴. الگوریتم SPEA-II

الگوریتم‌های SPEA^{۳۰} و SPEA-II هر دو الگوریتم‌های کارایی هستند که از یک آرشیو خارجی^{۳۱} برای ذخیره‌ی پاسخ‌های نامغلوبی که در طی جست‌وجوی الگوریتم یافت می‌شود استفاده می‌کنند. در الگوریتم SPEA ضعف‌هایی در محاسبه‌ی مقادیر قوت و برابری وجود داشت. همچنین معیار ثانویه‌ی برای مقایسه‌ی پاسخ‌های نامغلوب در آن گنجانده نشده بود. از این رو زیتزلر و همکاران^[۱۹] نسخه‌ی ثانویه‌ی این الگوریتم را که ضعف‌های اشاره شده را رفع کرده بود ارائه کردند. چارچوب کاری الگوریتم SPEA-II در ادامه تشریح می‌شود:

- NE : بیشترین اندازه آرشیو پاسخ‌های نامغلوب E ؛
- NP : اندازه جمعیت؛
- K : پارامتر محاسبه‌ی تراکم $(k = \sqrt{NE + NP})$.

گام ۱. یک جمعیت از پاسخ‌های اولیه‌ی P ایجاد کنید و قرار دهید $\phi = E$.

گام ۲. برابری هر پاسخ i در مجموعه‌ی $E_t \cup P_t$ را مطابق رابطه‌ی ۲۴ محاسبه کنید.

گام ۱.۲. ابتدا برابری خام پاسخ i را از رابطه‌ی ۲۴ محاسبه کنید:

$$R(i) = \sum_{j \in P_t \cup E_t \text{ \& } j > i} s(j) \quad (24)$$

که در آن علامت $i > j$ به معنای غلبه‌ی پاسخ j بر پاسخ i است. همچنین $s(i)$ مقدار قوت پاسخ را نشان می‌دهد که از رابطه‌ی ۲۵ به دست می‌آید:

گام ۱. ایجاد جمعیت اولیه‌ی تصادفی P با اندازه جمعیت N ، قرار دهید $t = 0$.

گام ۲. به‌کارگیری عملگرهای ترکیب و جهش روی P به منظور ایجاد جمعیت فرزندان Q با اندازه‌ی N .

گام ۳. اگر شرایط خاتمه محقق شده است، الگوریتم متوقف شده و P_t برگردانده می‌شود.

گام ۴. قرار دهید $R_t = P_t \cup Q_t$.

گام ۵. الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب سریع به منظور شناسایی جبهه‌های نامغلوب F_1, \dots, F_k در R_t به کار گرفته می‌شود. برای مشاهده‌ی جزئیات الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب به مرجع^[۱۸] مراجعه شود.

گام ۶. به‌ازای $i = 1, \dots, k$ گام‌های زیر را انجام دهید:

گام ۱.۶. فاصله‌ی ازدحامی پاسخ‌ها در جبهه‌ی F_i محاسبه می‌شود.

گام ۲.۶. جمعیت P_{t+1} به صورت زیر ایجاد می‌شود:

حالت ۱. اگر $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$ ، سپس قرار دهید $P_{t+1} = P_t \cup F_i$.

حالت ۲. اگر $|P_{t+1}| + |F_i| > N$ ، سپس تعداد $N - |P_{t+1}|$ از پاسخ‌های با کم‌ترین مقادیر فاصله‌ی ازدحامی را از F_i به P_{t+1} اضافه کنید.

گام ۷. با استفاده از انتخاب رقابت دوتایی براساس فاصله ازدحامی، والدین را از P_{t+1} انتخاب کنید. عملگرهای ترکیب و جهش را روی P_{t+1} اعمال کنید تا جمعیت Q_{t+1} با اندازه N ایجاد شود.

گام ۸. قرار دهید $t = t + 1$ ، و به گام ۳ بروید.

۱.۲.۴. عملگر ترکیب

مهم‌ترین عملگر در الگوریتم‌های ژنتیک، عملگر ترکیب است. ترکیب فرایندی است که در آن نسل قدیمی کروموزوم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند تا نسل تازه‌یی از کروموزوم‌ها به وجود بیاید. جفت‌هایی که در قسمت انتخاب به‌عنوان والد در نظر گرفته شدند در این قسمت ژن‌هایشان را با هم مبادله می‌کنند و اعضای جدید به وجود می‌آورند. ترکیب در الگوریتم ژنتیک باعث از بین رفتن پراکنندگی یا تنوع ژنتیکی جمعیت می‌شود زیرا اجازه می‌دهد ژن‌های خوب یکدیگر را بیابند. اپراتور ترکیب در نظر گرفته شده برای کروموزوم‌های تعریف شده، ترکیب یک نقطه‌یی^{۲۸} است که در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شیوه ترکیب ابتدا تمامی ژن‌های قبل از نقطه‌ی تقاطع از والد اول و تمامی ژن‌های پس از نقطه‌ی تقاطع از والد دوم به فرزند اول کپی شده و پیش‌نمایش فرزند اول ایجاد می‌شود. سپس به منظور ایجاد یک توالی شدنی در صورتی که ژن‌هایی تکرار شده باشند (مانند ژن‌های * و ۶ در پیش‌نمایش فرزند اول و ژن‌های ۴ و ۷ در پیش‌نمایش فرزند دوم)، این ژن‌ها با توالی پیشین ژن‌های باقی مانده از والد جایگزین می‌شوند. فرزند دوم نیز به صورت مشابه تولید می‌شود.

NP : ساین جمعیت؛

N : تعداد شبکه‌ها در هر محور تابع هدف.

گام ۱. با یک جمعیت اولیه تصادفی (P_0) شروع می‌کنیم و آرشو خارجی E_t را برابر تهی و شمارنده $t = 0$ تنظیم می‌کنیم.

گام ۲. فضای جواب را به n^k ابرمکعب 2^k تقسیم کنید، به طوری که n تعداد شبکه‌ها در هر محور از توابع هدف و k تعداد اهداف است.

گام ۳. آرشو جواب‌های نامغلوب E_t را با جواب‌های جدید از P_t ترکیب کنید و مشابه آنچه در ادامه آمده است عمل کنید.

حالت اول: اگر یک جواب جدید توسط حداقل یکی از جواب‌های موجود در آرشو E_t مغلوب شد، جواب جدید را کنار بگذارید.

حالت دوم: اگر یک جواب جدید بر چند جواب در E_t غلبه کرد جواب‌های مغلوب را از آرشو حذف کنید و جواب جدید را به آرشو E_t اضافه کنید، و اعضای ابرمکعب‌ها را به روز کنید.

حالت سوم: اگر یک جواب جدید توسط هیچ پاسخی در E_t مغلوب نشد و بر هیچ جوابی در E_t غلبه نکرد، این جواب را به E_t اضافه کنید؛ اگر $|E_t| = N_{E+1}$ بود به تصادف یک ابرمکعب را انتخاب کنید (انتخاب با استفاده از چرخه‌ی رولت انجام می‌شود به طوری که ابرمکعب‌های شلوغ‌تر احتمال انتخاب بیشتر دارند) و یک پاسخ موجود در آن را به تصادف انتخاب کنید و آن را حذف کنید، اعضای ابرمکعب‌ها را به روز کنید.

گام ۴. اگر معیار توقف برآورده شد توقف کنید و E_t نهایی را نشان بدهید.

گام ۵. با تنظیم $P_t = \phi$ جواب‌هایی از E_t را برای ترکیب و جهش براساس تراکم اطلاعات از ابرمکعب‌ها انتخاب کنید. این انتخاب با استفاده از چرخه‌ی رولت انجام شده به طوری که احتمال انتخاب ابرمکعب‌های با جمعیت کم‌تر، بیشتر است. از ترکیب و جهش به منظور تولید NP فرزند استفاده کنید و آن را در P_{t+1} کپی کنید.

گام ۶. t را به $t + 1$ تنظیم کنید و به گام ۳ بروید.

لازم به ذکر است در این الگوریتم نیز از همان شیوه‌ی ترکیب و جهش که قبلاً در بخش ۲.۴ تشریح شد، استفاده می‌شود. برای مشاهده‌ی جزئیات بیشتر پیاده‌سازی الگوریتم PESA-II می‌توانید به مرجع^[۱۲] مراجعه کنید.

۵. تحلیل آزمایش‌ها

۵.۱. مسائل آزمایشی

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده، ۳۰ مسئله‌ی نمونه به طور تصادفی ایجاد شده است. محدوده‌ی پارامترهای مسائل تولید شده به این صورت است: تعداد واحد کالاهایی که از کامیون ورودی i به کامیون خروجی j منتقل می‌شود، در محدوده $[0, 200]$ است. تعداد کامیون‌های ورودی و خروجی در بازه $[5, 22]$ است. تعداد درب‌های دریافت و ارسال نیز در محدوده‌ی $[2, 9]$ در نظر گرفته شده است. زمان جایگزینی کامیون‌ها برابر ۷۵ واحد زمانی، واحد زمان بارگذاری و تخلیه‌ی محصولات نیز برابر یک واحد زمانی در نظر گرفته شده است. اطلاعات جزئی‌تر برای هر یک از مسائل در جدول ۳ آمده است. در این جدول I تعداد کامیون‌های ورودی، O تعداد کامیون‌های خروجی، R تعداد درب ورودی، S تعداد درب خروجی و نهایتاً Q تعداد محصول انتقالی در بارانداز است.

در واقع تعداد پاسخ‌هایی را که توسط i مغلوب می‌شود محاسبه می‌کند.

$$s(i) = |\{j | j \in P_t \cup E_t \text{ \& } i \succ j\}| \quad (25)$$

گام ۲.۲. تراکم پاسخ i را چنین محاسبه کنید:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (26)$$

σ_i^k فاصله‌ی بین پاسخ i و k امین همسایگی نزدیک به آن است.

گام ۳.۲. نهایتاً مقدار برازندگی از جمع مقدار برازندگی خام و تراکم پاسخ i به دست می‌آید:

$$F(i) = R(i) + D(i) \quad (27)$$

گام ۳. تمام پاسخ‌های نامغلوب موجود در مجموعه‌ی $P_t \cup E_t$ را به E_{t+1} کپی کنید. دو حالت ممکن است رخ دهد:

حالت اول: اگر $|E_{t+1}| > N_E$ ، به تعداد $|E_{t+1}| - N_E$ پاسخ را با روش تکراری حذف پاسخ با معیار σ^k حذف می‌کنیم. در واقع پاسخی که کمینه فاصله‌ی σ^k را از دیگر پاسخ‌ها دارد در ابتدا حذف می‌شود. با این حال، اگر چند پاسخ دارای کم‌ترین فاصله باشند، دومین کم‌ترین فاصله می‌تواند مشخص شود و به همین صورت تا نهایتاً پاسخ‌های اضافی حذف شوند (این معیار باعث می‌شود که پاسخ‌های مشابه یا نزدیک به هم که اهمیتی در تراکم پاسخ‌ها ایجاد نمی‌کنند حذف شوند).

حالت دوم: اگر $|E_{t+1}| \leq N_E$ ، به تعداد $N_E - |E_{t+1}|$ پاسخ مغلوب شده را براساس مقادیر برازندگی آن‌ها از مجموعه $P_t \cup E_t$ به مجموعه E_{t+1} انتقال می‌دهیم.

گام ۴. اگر شرایط خاتمه فراهم شده باشد، الگوریتم متوقف شده و پاسخ‌های E_{t+1} را برمی‌گرداند.

گام ۵. با استفاده از روش رقابت دوتایی^{۳۲} والدین را از مجموعه‌ی E_{t+1} انتخاب می‌کنیم.

گام ۶. اپراتورهای ترکیب و جهش را روی والدین به کار برده و به تعداد NP فرزند تولید می‌کنیم. فرزندان را به مجموعه P_{t+1} کپی کرده و به مقدار شمارنده یک واحد اضافه می‌کنیم ($t = t + 1$) و به گام ۲ می‌رویم.

لازم به ذکر است در این الگوریتم نیز از همان شیوه‌ی ترکیب و جهش که در بخش ۲.۴ شرح داده شد استفاده می‌شود.^[۱۹]

۴.۴. الگوریتم PESA-II

یکی از شناخته‌ترین الگوریتم‌های چندهدفه، نسخه‌ی دوم الگوریتم چندهدفه‌ی انتخاب مبتنی بر ناحیه‌ی پارتو^{۳۳} (PESA-II) است که در آن برای تولید پاسخ‌های جدید از عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. نسخه‌ی اولیه‌ی این الگوریتم که توسط کورن و همکاران^[۲۰] ارائه شد دارای ضعف‌هایی در نحوه‌ی انتخاب بود. از این جهت نسخه‌ی تکمیلی این الگوریتم تحت عنوان PESA-II در سال ۲۰۰۱ (توسط کورن و همکاران^[۲۱]) ارائه شد. در ادامه مراحل الگوریتم PESA-II تشریح می‌شود:

NE : بزرگ‌ترین ساین آرشو پاسخ‌های غیرمغلوب E ؛

جدول ۳. اطلاعات مسائل نمونه تولید شده.

شماره مسئله	I	O	R	S	Q
۱	۶	۹	۲	۳	۳۱۴۶
۲	۷	۸	۳	۳	۳۲۱۳
۳	۸	۷	۳	۲	۲۶۹۴
۴	۹	۶	۴	۲	۲۳۹۶
۵	۱۰	۵	۳	۲	۳۰۸۲
۶	۸	۱۲	۳	۴	۴۴۴۵
۷	۹	۱۱	۴	۴	۳۶۳۳
۸	۱۰	۱۰	۴	۳	۴۸۱۳
۹	۱۱	۹	۳	۵	۵۴۷۸
۱۰	۱۲	۸	۴	۳	۴۴۰۷
۱۱	۱۱	۱۴	۴	۵	۷۶۰۸
۱۲	۱۲	۱۳	۴	۶	۸۳۸۹
۱۳	۱۳	۱۲	۵	۴	۸۰۶۲
۱۴	۱۴	۱۱	۶	۴	۷۲۶۶
۱۵	۱۵	۱۰	۵	۴	۹۲۸۶
۱۶	۱۳	۱۷	۴	۷	۸۵۴۸
۱۷	۱۴	۱۶	۵	۷	۱۰۶۷۰
۱۸	۱۵	۱۵	۶	۵	۱۱۲۴۶
۱۹	۱۶	۱۴	۶	۶	۱۲۳۶۶
۲۰	۱۷	۱۳	۶	۵	۸۹۹۵
۲۱	۱۶	۱۹	۶	۷	۱۴۷۳۰
۲۲	۱۷	۱۸	۷	۷	۱۶۵۴۶
۲۳	۱۸	۱۷	۷	۶	۱۴۷۷۳
۲۴	۱۹	۱۶	۸	۶	۱۴۷۴۵
۲۵	۲۰	۱۵	۸	۵	۱۶۹۳۶
۲۶	۱۸	۲۲	۷	۸	۱۹۵۰۹
۲۷	۱۹	۲۱	۷	۹	۲۱۳۰۶
۲۸	۲۰	۲۰	۸	۷	۲۱۸۵۲
۲۹	۲۱	۱۹	۸	۸	۱۷۸۲۷
۳۰	۲۲	۱۸	۹	۶	۱۹۷۳۳

پاسخ‌های پارتو ضرورت می‌یابد. در این مقاله سه معیار که تاکنون برای ارزیابی پاسخ‌های پارتو در مقالات مختلف [۲۳، ۲۲، ۱۷] کاربرد داشته انتخاب شده است. در رابطه‌های (۲۹) و (۳۲) که در ادامه می‌آید، f_{1i} ، f_{2i} و f_{3i} به ترتیب مقادیر تابع هدف ۱، ۲، ۳ برای پاسخ i در پارتوی نهایی هر الگوریتم هستند. همچنین n تعداد پاسخ‌های نامغلوب هر پارتو را نشان می‌دهد.

۱.۲.۵. اندازه فاصله (SM)^{۳۵}

این معیار پراکنندگی پاسخ‌ها در یک پارتو را نشان می‌دهد و توسط رابطه‌ی ۲۸ محاسبه می‌شود:

$$SM = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (28)$$

که در آن:

$$d_i = \min_j \{ |f_{1i} - f_{1j}| + |f_{2i} - f_{2j}| + |f_{3i} - f_{3j}| \} \quad (29)$$

$i, j = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (30)$$

در واقع مقادیر کم‌تر برای SM مناسب‌تر است و نشان‌دهنده پراکنندگی کم‌تر پاسخ‌های پارتو است.

۲.۲.۵. میانگین فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل (MID)^{۳۶}

این اندازه نزدیکی پاسخ‌های پارتو به نقطه‌ی ایده‌آل (f_1^{best} ، f_2^{best} ، f_3^{best}) را نشان می‌دهد. در واقع میانگین فاصله‌ی اقلیدسی پاسخ‌ها را از نقطه‌ی ایده‌آل محاسبه می‌کند. این مقدار از رابطه‌ی ۳۱ به دست می‌آید:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \quad (31)$$

به طوری که:

$$c_i = \sqrt{(f_{1i} - f_1^{best})^2 + (f_{2i} - f_2^{best})^2 + (f_{3i} - f_3^{best})^2} \quad (32)$$

f_1^{best} ، f_2^{best} و f_3^{best} بهترین مقادیر هر تابع هدف است که توسط الگوریتم‌ها به دست آمده است. هر پارتو که مقدار کم‌تری از MID داشته باشد مناسب‌تر و با کیفیت‌تر است.

۳.۲.۵. اندازه کیفیت (QM)^{۳۷}

برای محاسبه اندازه کیفیت به شرح زیر عمل می‌کنیم:

ابتدا پاسخ‌های پارتو به دست آمده از تمامی الگوریتم‌ها را با یکدیگر تلفیق می‌کنیم. سپس از میان آن‌ها پاسخ‌های نامغلوب را نگه داشته و بقیه (پاسخ‌های مغلوب) را حذف می‌کنیم. سپس سهم هریک از الگوریتم‌ها را در تولید پاسخ‌های

به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها سطوح ذکر شده در جدول ۴ بررسی و آزمایش شد. نهایتاً پارامترها به این صورت تنظیم شد: تعداد نسل‌ها ۵۰۰، تعداد جمعیت ۱۵۰، احتمال ترکیب ۰/۷۲ و احتمال جهش ۰/۲۸.

۲.۵. معیارهای مقایسه

برای مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه، معرفی معیارهایی برای ارزیابی

جدول ۴. سطوح پارامترهای الگوریتم‌های NSGA-II، SPEA-II و PESA-II.

سطوح				پارامتر
۱	۲	۳	۴	
۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	تعداد نسل
۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۰۰	تعداد جمعیت
(۰/۷۲، ۰/۲۸)	(۰/۸، ۰/۲)	(۰/۸۵، ۰/۱۵)	(۰/۹۱، ۰/۰۹)	احتمال ترکیب، احتمال جهش

جدول ۵. نتایج محاسباتی مقادیر معیارهای عملکرد برای سه الگوریتم NSGA-II، PESA-II و SPEA-II.

شماره مسئله	MID			QM			SM		
	NSGA-II	PESA-II	SPEA-II	NSGA-II	PESA-II	SPEA-II	NSGA-II	PESA-II	SPEA-II
۱	۲۵۰,۸۲۱	۲۸۳,۶۰۵	۲۳۸,۳۳۸	۰,۷۹۳	۰,۷۵۹	۰,۸۲۸	۷۰,۰۶۸	۴۱,۸۰۰	۴۰,۲۶۱
۲	۹۵۷,۹۶۱	۸۷۹,۰۱۹	۷۳۵,۱۱۷	۰,۶۴۳	۰,۳۲۱	۰,۵۰۰	۵۹,۸۱۲	۴۳,۲۷۳	۹۷,۹۶۱
۳	۱۷۶۷,۲۵۵	۱۸۶۲,۲۸۴	۱۸۰۰,۱۸۵	۰,۴۹۰	۰,۳۵۱	۰,۴۹۷	۱۵۸,۵۳۳	۱۱۷,۹۱۸	۱۲۶,۵۹۷
۴	۵۱۷,۸۵۸	۷۴۷,۲۸۵	۵۳۰,۲۷۴	۰,۵۷۴	۰,۵۱۱	۰,۱۴۹	۴۴,۴۳۸	۶۳,۰۴۷	۶۴,۰۸۱
۵	۱۲۲۳,۰۸۹	۱۲۵۲,۳۴۳	۱۲۱۸,۴۷۰	۰,۵۲۹	۰,۴۴۸	۰,۲۹۹	۸۴,۴۲۷	۴۸,۲۵۳	۷۱,۳۳۹
۶	۱۹۴۵,۸۱۶	۲۱۱۸,۹۲۵	۲۱۳۹,۴۱۶	۰,۳۴۰	۰,۵۲۸	۰,۲۴۵	۲۶۰,۹۲۴	۹۶,۲۴۸	۱۷۰,۰۲۶
۷	۱۱۷۸,۹۵۸	۱۰۳۷,۰۹۴	۱۱۶۴,۷۲۸	۰,۴۱۰	۰,۴۲۶	۰,۲۲۱	۱۰۰,۲۱۳	۱۱۰,۶۵۳	۵۹,۲۳۷
۸	۱۲۶۶,۵۹۴	۹۷۰,۹۳۹	۱۲۶۳,۹۱۸	۰,۵۴۳	۰,۴۰۰	۰,۰۸۶	۱۱۰,۸۳۴	۱۴۰,۷۲۸	۷۹,۵۸۹
۹	۱۵۱۸,۲۸۶	۱۷۱۱,۶۶۴	۱۴۸۸,۸۷۵	۰,۶۷۰	۰,۲۲۷	۰,۲۷۳	۴۹,۳۶۷	۶۴,۴۰۸	۶۷,۲۷۳
۱۰	۱۶۰۵,۵۷۰	۱۵۵۹,۵۴۶	۱۳۵۷,۶۸۴	۰,۲۴۰	۰,۳۱۳	۰,۴۸۰	۱۱۱,۸۴۰	۱۳۲,۱۸۴	۱۰۸,۶۵۵
۱۱	۹۴۷,۴۹۰	۱۰۵۰,۱۱۹	۱۱۲۸,۷۶۳	۰,۴۳۲	۰,۳۰۶	۰,۲۷۹	۵۹,۱۹۰	۶۸,۳۴۴	۸۲,۱۶۲
۱۲	۱۹۸۹,۶۱۵	۲۰۹۹,۷۳۵	۱۸۹۳,۲۸۱	۰,۳۰۲	۰,۲۳۳	۰,۴۷۵	۱۲۶,۲۱۱	۱۲۳,۱۶۵	۱۱۶,۹۷۷
۱۳	۲۰۱۷,۹۱۵	۱۷۶۵,۹۲۹	۱۷۳۳,۷۲۶	۰,۰۰۰	۰,۵۶۸	۰,۴۳۲	۱۳۲,۰۰۹	۹۸,۰۰۷	۱۱۰,۴۱۴
۱۴	۲۱۷۰,۶۶۸	۱۹۳۸,۳۳۵	۱۸۷۳,۶۲۷	۰,۳۶۸	۰,۲۴۵	۰,۳۹۴	۸۷,۶۰۲	۱۲۱,۶۰۸	۹۶,۶۶۲
۱۵	۲۶۸۹,۷۱۱	۲۷۷۲,۹۶۶	۲۴۸۳,۵۸۵	۰,۵۲۰	۰,۳۱۲	۰,۱۹۲	۱۰۶,۹۴۷	۱۵۹,۵۴۱	۱۸۷,۲۲۶
۱۶	۱۶۵۵,۴۳۶	۱۳۹۳,۳۶۸	۶۵۴,۷۲۶	۰,۴۵۷	۰,۲۴۱	۰,۳۱۰	۹۵,۰۳۳	۱۴۱,۶۲۹	۵۴,۶۴۲
۱۷	۱۲۸۰,۴۵۰	۱۶۱۸,۱۰۹	۸۵۳,۳۳۷	۰,۲۲۷	۰,۳۲۸	۰,۴۴۵	۸۸,۶۴۹	۱۶۹,۳۱۲	۱۳۳,۹۰۲
۱۸	۲۸۲۳,۲۶۷	۳۲۰۹,۳۶۳	۲۸۲۳,۹۸۹	۰,۴۴۰	۰,۱۵۴	۰,۴۰۶	۱۶۰,۰۸۶	۱۸۲,۸۷۳	۱۲۶,۸۴۷
۱۹	۱۸۵۱,۵۹۵	۲۱۱۲,۸۵۰	۲۱۶۹,۰۲۵	۰,۵۸۵	۰,۱۶۲	۰,۲۵۴	۸۴,۳۶۳	۱۲۸,۰۳۶	۱۳۵,۹۵۰
۲۰	۳۸۰۹,۱۱۵	۳۷۹۷,۶۹۰	۳۵۴۶,۲۹۱	۰,۲۴۹	۰,۲۸۹	۰,۴۶۲	۱۷۶,۴۸۶	۱۶۶,۴۹۹	۱۶۸,۵۳۳
۲۱	۲۶۹۴,۵۶۷	۲۲۸۱,۳۸۰	۲۵۳۴,۱۵۹	۰,۲۹۲	۰,۴۱۶	۰,۲۹۲	۱۵۷,۸۱۳	۱۷۱,۴۹۵	۱۱۳,۵۸۹
۲۲	۱۶۳۰,۸۷۱	۱۱۲۶,۱۸۰	۱۳۵۷,۰۱۷	۰,۱۸۰	۰,۶۱۸	۰,۲۰۲	۱۹۵,۰۴۵	۱۱۲,۹۴۷	۹۷,۵۵۴
۲۳	۲۳۳۲,۶۶۵	۱۵۶۴,۸۱۰	۲۶۸۶,۶۹۷	۰,۲۸۶	۰,۴۸۴	۰,۲۳۰	۱۴۰,۸۷۳	۲۸۲,۳۴۵	۱۹۹,۴۳۲
۲۴	۳۴۴۵,۷۵۷	۳۵۰۴,۴۱۷	۳۱۰۷,۶۰۹	۰,۳۷۲	۰,۰۹۱	۰,۵۴۳	۱۹۶,۹۷۲	۲۳۲,۲۹۹	۱۳۲,۹۴۴
۲۵	۱۷۹۱,۸۳۳	۱۷۱۵,۴۸۹	۱۳۵۸,۷۲۹	۰,۲۵۷	۰,۲۰۴	۰,۵۳۹	۲۰۷,۲۹۵	۱۶۶,۳۰۵	۱۲۳,۰۳۲
۲۶	۲۰۵۰,۷۹۷	۳۰۴۳,۹۶۰	۲۰۶۱,۶۲۶	۰,۲۳۹	۰,۰۰۰	۰,۷۶۱	۱۴۶,۳۷۰	۱۳۹,۹۳۴	۱۶۴,۰۹۱
۲۷	۵۴۱۷,۳۶۸	۵۸۱۱,۰۵۸	۵۲۷۳,۱۳۸	۰,۴۳۳	۰,۱۹۴	۰,۳۷۲	۲۴۰,۳۸۴	۲۴۳,۲۳۶	۲۲۴,۸۷۳
۲۸	۳۵۱۴,۹۱۲	۲۳۳۹,۰۲۴	۲۰۴۸,۴۹۸	۰,۰۹۸	۰,۳۶۸	۰,۵۳۴	۳۵۹,۹۱۱	۱۸۸,۴۹۵	۱۷۲,۷۱۵
۲۹	۲۰۸۱,۲۱۰	۱۶۱۳,۷۹۱	۲۳۲۷,۳۰۱	۰,۰۸۳	۰,۵۷۹	۰,۳۳۹	۱۸۸,۵۹۸	۱۴۸,۰۹۶	۱۶۷,۷۴۲
۳۰	۴۹۶۱,۸۷۳	۵۴۳۸,۰۹۳	۴۴۵۷,۱۳۹	۰,۴۱۷	۰,۰۰۰	۰,۵۸۳	۲۱۸,۹۴۳	۱۸۱,۰۲۹	۲۰۰,۳۹۹
میانگین	۲۱۱۲,۹۷۷	۲۰۸۷,۳۱۲	۱۹۴۳,۶۴۲	۰,۳۸۲	۰,۳۳۶	۰,۳۸۷	۱۴۰,۶۴۱	۱۳۶,۱۲۴	۱۲۳,۱۵۷
تعداد دفعات برتری	۷	۶	۱۷	۱۱	۷	۱۲	۸	۹	۱۳

برای هر یک از الگوریتم‌های NSGA-II، PESA-II و SPEA-II نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات بخش پیشین، مقادیر کم‌تر برای معیارهای MID و SM، و همچنین مقادیر بیشتر برای QM مطلوب است. بنابراین با توجه به نتایج این جدول الگوریتم SPEA-II عملکرد بهتری از الگوریتم‌های PESA-II و NSGA-II در مقادیر میانگین حاصل از تمامی معیارهای عملکرد نشان داده است. همچنین با توجه به مقادیر سطر آخر در جدول ۵، مشاهده می‌شود که الگوریتم SPEA-II از لحاظ تعداد دفعاتی که مقدار بهتری برای سه معیار مقایسه در ۳۰ مسئله به دست آورده است، نیز عملکرد بهتری داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم SPEA-II برای حل مدل چندهدفه‌ی پیشنهادی کیفیت عملکرد بهتری دارد. همچنین از میان دو الگوریتم دیگر، الگوریتم NSGA-II نتایج بهتری کسب کرده است.

نامغلوب نهایی به دست می‌آوریم. هر قدر اندازه کیفیت برای یک الگوریتم بیشتر باشد، نشان می‌دهد که الگوریتم مذکور سهم بیشتری برای تولید پاسخ‌های نامغلوب نهایی داشته است و بنابراین پاسخ‌های الگوریتم مورد نظر کیفیت بهتری دارند.

۳.۵. آزمایشات و تحلیل نتایج آن‌ها

الگوریتم‌های فراابتکاری توسعه یافته همگی در نرم‌افزار MATLAB نسخه Intel Core i۳ ۲,۴۰ GHz با پردازنده رایانه در یک رایانه با حافظه رم ۴GB اجرا شده است. الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده برای هر مسئله‌ی نمونه اجرا شده و مقادیر معیارهای مقایسه برای آن‌ها در جدول ۵ آورده شده است. این جدول، مقادیر به دست آمده برای معیارهای MID، QM و SM را

در این شکل‌ها محور ۱ z مقدار تابع هدف اول (زمان تکمیل کل)، محور ۲ z مقدار تابع هدف دوم (مجموع دیرکردهای کامیون‌های ورودی) و ۳ z مقدار تابع هدف سوم (مجموع دیرکردهای کامیون‌های خروجی) را نشان می‌دهند.

۶. نتیجه‌گیری

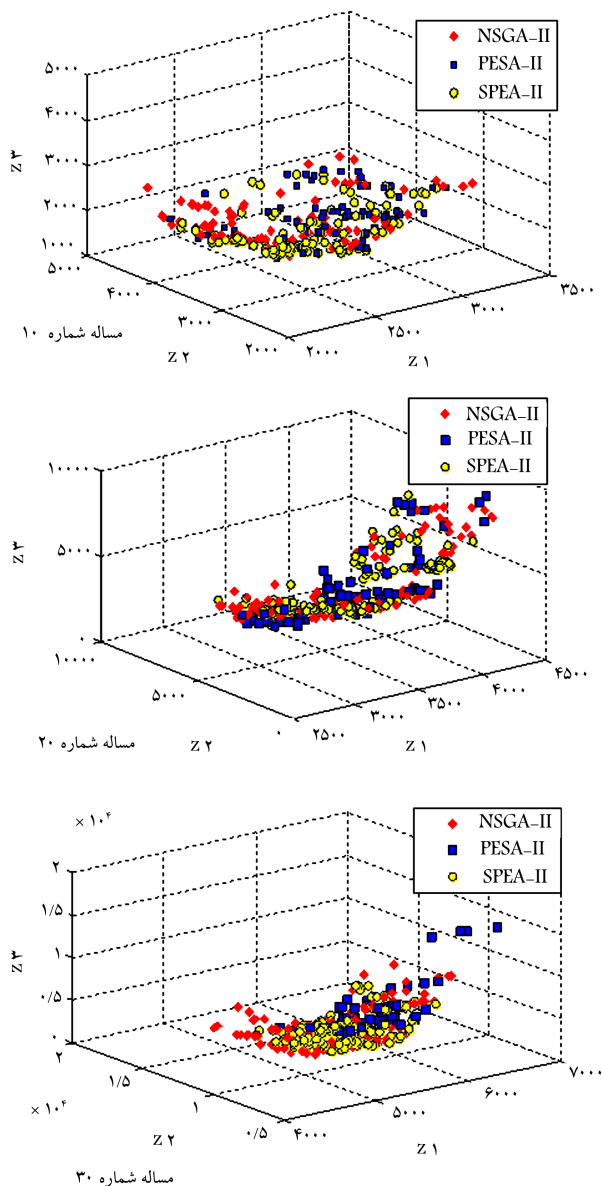
در این مقاله به مدل‌سازی مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون‌ها در یک سیستم توزیع بارانداز با در نظر گرفتن چند تابع هدف پرداخته شد. این مسائل که کامیون‌های ورودی و خروجی به کدامین درب‌ها (در یک سیستم بارانداز با چندین درب ورودی و خروجی) تخصیص یابد و توالی خدمت‌دهی به آن‌ها به چه صورت انجام گیرد، جزو تصمیمات عملیاتی در استقرار یک سیستم بارانداز است. در این پژوهش یک مدل ریاضی ارائه شد که می‌تواند ضمن تعیین تخصیص کامیون‌ها به درب‌ها، زمان‌بندی عملیات تخلیه و بارگذاری کامیون‌ها را نیز مشخص کند، به طوری که هم‌زمان معیارهای زمان اتمام کل، دیرکرد کامیون‌های ورودی، و دیرکرد کامیون‌های خروجی کمینه شود. در حل مسئله‌ی چندهدفه، از آنجا که حل دقیق بسیار وقت‌گیر خواهد بود و نیاز به اجرای چندین باره هر مسئله‌ی نمونه دارد، سه الگوریتم فراابتکاری چندهدفه شامل NSGA-II، PESA-II و SPEA-II پیشنهاد شد. تعداد ۳۰ مسئله‌ی نمونه برای ارزیابی عملکرد این الگوریتم‌ها با توجه به شیوه‌های رایج در پیشینه‌ی تحقیق تولید و با هر یک از الگوریتم‌ها حل شد. برای مقایسه‌ی پاسخ الگوریتم‌های پیشنهادی، سه معیار عملکرد شامل MID، SM و QM به کار گرفته شد. بر این اساس مشاهده شد که الگوریتم SPEA-II می‌تواند پاسخ‌هایی تولید کند که از لحاظ معیارهای کیفی در نظر گرفته‌شده، کیفیت مطلوب‌تری دارند. این نتیجه‌گیری با نتیجه‌ی حاصل از تحقیقات پیشین^[۱۶] مطابقت دارد. در مطالعه‌ی یادشده نیز نتیجه‌ی حاصل، نشان از برتری نسبی الگوریتم SPEA-II نسبت به الگوریتم‌های NSGA-II و SPGA-II دارد. در مورد نتایج مدیریتی حاصل از این تحقیق می‌توان به این نکته اشاره کرد که برای هر یک از مسائل نمونه تصمیم‌گیرنده‌ی نهایی که می‌تواند مدیر یک مرکز بارانداز باشد، با توجه به اهمیتی که به هر یک از توابع هدف پیشنهادی می‌دهد می‌تواند از میان پاسخ‌های نامغلوب به دست آمده از الگوریتم‌ها، پاسخی را که ترجیح می‌دهد انتخاب کند. ممکن است در مواردی زمان اتمام کل از اهمیت بیشتری برخوردار باشد و در مواردی با توجه به هزینه‌هایی که تأخیر کامیون‌ها می‌تواند به دنبال داشته باشد، هر یک از تأخیرات کامیون‌های ورودی یا خروجی اهمیت بیشتری برای مدیریت بارانداز داشته باشند.

برای تحقیقات آتی در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی کامیون‌ها، ظرفیت محدود انبار موقت، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه جدیدتر به منظور حل این مسئله پیشنهاد می‌شود.

پانویس‌ها

1. inbound trucks
2. outbound truck
3. Eastman Kodak
4. Goodyear GB Ltd

5. Dots
6. LLC
7. Toyota
8. makespan
9. receiving door
10. shipping door



شکل ۶. نمودار پارتو برای مسائل شماره ۱۰، ۲۰ و ۳۰.

برای این که تصور شهودی بهتری از پاسخ‌های نامغلوب به دست آمده از الگوریتم‌های فراابتکاری ایجاد شود، پاسخ‌های پارتو حاصل از الگوریتم‌ها برای سه مسئله از مسائل نمونه (مسائل ۱۰، ۲۰ و ۳۰) در شکل ۶ نشان داده شده است.

11. shipping dock
12. just in time
13. genetic algorithm
14. differential evolution
15. particle swarm optimization
16. hybrid
17. post-distribution
18. pre-distribution
19. domination
20. non-dominated
21. pareto-optimal frontier
22. makespan
23. GAMS 23.4
24. CPLEX

۲۵. در اطلاعات این مثال و سایر مسائل نمونه از داده‌های سایر مقالات الگوبرداری شده است. برای نمونه زمان جایگزینی کامیون‌ها و همچنین زمان لازم برای بارگذاری و تخلیه‌ی محصولات در سایر مقالات نیز به ترتیب برابر با ۷۵ و ۱ واحد زمانی در نظر گرفته شده است.

26. solution representation
27. non-dominated sorting genetic algorithm
28. one point crossover
29. paired wise interchange (Swap)
30. strength pareto evolutionary algorithm
31. external archive
32. binary tournament
33. pareto envelope based selection algorithm
34. hypercube
35. spacing metric
36. mean ideal distance
37. quality metric

منابع (References)

1. Van Belle, J., Valckenaers, P. and Cattrysse, D. "Cross-docking: State of the art", *Omega*, **40**(6), pp. 827-846 (2012).
2. Boysen, N. and Fliedner, M. "Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda", *Omega*, **38**(6), pp. 413-422 (2010).
3. Yu, W. and Egbelu, P.J. "Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage", *European Journal of Operational Research*, **184**(1), pp. 377-396 (2008).
4. Vahdani, B. and Zandieh, M. "Scheduling trucks in cross-docking systems: Robust meta-heuristics", *Computers & Industrial Engineering*, **58**(1), pp. 12-24 (2010).
5. Boloori Arabani, A.R., Fatemi Ghomi, S.M.T. and Zandieh, M. "Meta-heuristics implementation for scheduling of trucks in a cross-docking system with temporary storage", *Expert Systems with Applications*, **38**(3), pp. 1964-1979 (2011).
6. Boloori Arabani, A.R., Fatemi Ghomi, S.M.T. and Zandieh, M. "A multi-criteria cross-docking scheduling with just-in-time approach", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **49**, pp. 741-756 (2010).
7. Mohtashami, A. "Scheduling trucks in cross docking systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks", *Applied Soft Computing*, **36**, pp. 468-486 (2015).
8. Keshtzari, M., Naderi, B., Mehdizadeh, E. "An improved mathematical model and a hybrid metaheuristic for truck scheduling in cross-dock problems", *Computers & Industrial Engineering*, **91**, pp. 197-204 (2016).
9. Rahmzadeh Tootkaleh, S., Fatemi Ghomi, S.M.T. and Sajadieh, S.M. "Cross dock scheduling with fixed outbound trucks departure times under substitution condition", *Computers & Industrial Engineering*, **92**, pp. 50-56 (2016).
10. Lee, K., Kim, B.S. and Joo, C.M. "Genetic algorithms for door-assigning and sequencing of trucks at distribution centers for the improvement of operational performance", *Expert Systems with Applications*, **39**(17), pp. 12975-12983 (2012).
11. Joo, Ch.M. and Kim, B.S. "Scheduling compound trucks in multi-door cross-docking terminals", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **64**(5-8), pp. 977-988 (2013).
12. Liao, T.W., Egbelu, P.J. and Chang, P.C. "Simultaneous dock assignment and sequencing of inbound trucks under a fixed outbound truck schedule in multi-door cross docking operations", *International Journal of Production Economics*, **141**(1), pp. 212-229 (2013).
13. Boysen, N., Briksorn, D. and Tschöke, M. "Truck scheduling in cross-docking terminals with fixed outbound departures", *OR Spectrum*, **35**, pp. 479-504 (2013).
14. Boysen, N. "Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals", *Computers & Operations Research*, **37**(1), pp. 32-41 (2010).
15. Van Belle, J., Valckenaers, P., Vanden Berghe, G. and Cattrysse, D. "A tabu search approach to the truck scheduling problem with multiple docks and time windows", *Computers & Industrial Engineering*, **66**(4), pp. 818-826 (2013).
16. Boloori Arabani, A., Zandieh, M. and Ghomi, S.M.T.F. "Multi-objective genetic-based algorithms for a cross-docking scheduling problem", *Applied Soft Computing*, **11**(8), pp. 4954-4970 (2011).
17. Boloori Arabani, A., Zandieh, M. and Fatemi Ghomi, S.M.T. "A cross-docking scheduling problem with sub-population multi-objective algorithms", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **58**(5-8), pp. 741-761 (2012).
18. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**(2), pp. 182-197 (2002).
19. Zitzler, E., Laumanns, M. and Thiele, L. "SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm", *In Proceedings of the Evolutionary Methods for Design*, Barcelona, Spain (2000).
20. Corne, D.W., Knowles, J.D. and Oates, M.J. "The pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization", *In Proceedings of the Sixth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, pp. 18-20 (2000).
21. Corne, D.W., Jerram, N.R., Knowles, J.D. and Oates, M.J. "PESA-II: Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization", *In Proceedings of*

- the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)* (2001).
22. Karimi, N. and Davoudpour, H. "A high performing metaheuristic for multi-objective flowshop scheduling problem", *Computers & Operations Research, Part B*, **52**(0), pp. 149-156 (2014).
23. Nabipoor Afruzi, E., Najafi, A.A., Roghanian, E. and Mazinani, M. "A multi-objective imperialist competitive algorithm for solving discrete time, cost and quality trade-off problems with mode-identity and resource-constrained situations", *Computers & Operations Research*, **50**(0), pp. 80-96 (2014).