نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

ISSN: 2345-2269

سال دهم، شماره بیستم، بهار و تابستان ۱۴۰۱، صفحه ۱۵۳-۱۶۹
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2023.21652.1970

فرمول‌بندی مسأله‌ی برداشت و توزیع یکپارچه‌ی سفارش‌ها در یک انبار با چند برداشت‌کننده به‌طریق برداشت دسته‌ای

مهرداد علی‌پور[۱]، یحیی زارع مهرجردی[۲*]، علی مصطفایی‌پور[۳]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، پردیس فنی و صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲. استاد گروه مهندسی صنایع، پردیس فنی و صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، پردیس فنی و صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۳۹۹/۲/۲۹
پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۰
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
دسته‌بندی سفارش‌ها
برداشت دسته‌ای سفارش‌ها
مسیریابی وسایل نقلیه
الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر

خلاصه

سفارش‌های دریافت شده از سوی مشتریان در شرکت‌های خرده‌فروش، پیش از تحویل به مشتریان باید از سطح انبار برداشت شوند. فرآیند برداشت سفارش‌ها در انبار پرهزینه‌ترین و زمان‌برترین فرآیند انبار است و معمولاً به‌منظور کاهش مسافت و زمان برداشت، سفارش‌ها دسته‌بندی و در مسیرهای مشترک برداشت می‌شوند. از سوی دیگر، گسترش اینترنت و تجارت الکترونیک باعث افزایش قابل توجه تعداد و کاهش اندازه‌ی سفارش‌های صادر شده و در نتیجه‌ی آن پیچیده‌تر شدن فرآیند دسته‌بندی و برداشت سفارش‌ها در انبار شده است. علاوه‌بر موارد فوق، درنظر گرفتن سیاست‌های مناسب به‌منظور توزیع سفارش‌ها بین مشتریان به‌گونه‌ای‌که در آن مواردی نظیر زمان و هزینه‌ی توزیع سفارش‌ها و موعدهای تحویل مشتریان لحاظ شود، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است و اتخاذ این سیاست‌ها به‌صورت یکپارچه با عملیات برداشت می‌تواند باعث کاهش قابل توجهی در هزینه‌ها و افزایش سطح سرویس ارائه شده به مشتریان شود. در این پژوهش، مسائل برداشت دسته‌ای و توزیع سفارش‌ها در انبار به‌صورت یکپارچه درنظر گرفته شد و یک مدل ریاضی خطی صحیح-مختلط برای این مسأله ارائه گردید که در آن، هدف کمینه کردن مجموع دیرکرد در تحویل سفارش‌های مشتریان است. برای حل مدل ارائه شده نیز یک الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی محلی تکرار شونده ارائه گردید. برای اعتبارسنجی مدل فقط از ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، آزمایش‌های عددی با استفاده از مسائل نمونه‌ی ساختگی انجام و نشان داده شد که الگوریتم ارائه شده از توانایی لازم برای رسیدن به جواب‌های خوب برای مسأله در مدت‌زمان معقول برخوردار است. باتوجه به اینکه حل‌کننده‌ی دقیق قادر نیست در مدت‌زمان معقول برای حتی نمونه‌های کوچک از مسأله به جواب بهینه دست یابد، یک حد بالا تعریف شد و نتایج حاصل از الگوریتم با حد بالا مقایسه گردید. از طریق مقایسات انجام شده مشخص شد که علی‌رغم افزایش قابل توجه اندازه‌ی مسائل نمونه، کیفیت جواب‌های به‌دست آمده توسط الگوریتم فراابتکاری در مقایسه با حد بالا افت کمی پیدا می‌کند، اما همچنان از کیفیت مطلوبی برخوردار است.

۱. مقدمه

امروزه گسترش اینترنت و تجارت الکترونیک سبب شده است که تعداد سفارش‌های صادرشده از سوی مشتریان افزایش و اندازه‌ی آن‌ها (تعداد اقلام در هر سفارش) کاهش یابد که درنتیجه‌ی آن،

* نویسنده مسئول: یحیی زارع مهرجردی
تلفن: ۰۳۵-۳۱۲۳۲۴۲۴؛ پست الکترونیکی: yzare@yazd.ac.ir

خرده‌فروشان اینترنتی ناگزیر هستند سفارش‌های بسیاری با اندازه‌های کوچک را در مدت‌زمان محدود پردازش کنند و به مشتریان تحویل دهند [۱]. برداشت سفارش که به‌معنی جمع‌آوری اقلام یک سفارش از قفسه‌های انبار است، یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین فرآیندهای انبار است [۲]. در یک سیستم برداشت سفارش با تعداد زیادی از سفارش‌های کوچک، دسته‌بندی سفارش‌ها پیش از برداشت و جمع-آوری سفارش‌های هر دسته در یک مسیر مشترک می‌تواند منجربه کاهش قابل توجه در مسافت طی شده به‌منظور برداشت سفارش‌ها و در نتیجه‌ی آن کاهش زمان برداشت سفارش‌ها در انبار شود [۳]. ازاین‌رو، دسته‌بندی سفارش‌ها پیش از برداشت یک فعالیت حیاتی در راستای افزایش اثربخشی عملیات انبار محسوب می‌شود [۴]؛ اما به‌کارگیری این روش نیازمند تعیین مجموعه‌ای از دسته‌های سفارش است که کلیه‌ی سفارش‌های مشتریان را پوشش دهند و در عین‌حال بتواند باعث کمینه شدن مسافت (زمان) موردنیاز برای برداشت سفارش‌ها شود. این مسأله تحت عنوان مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها عنوان می‌شود و حل آن از پیچیدگی بالایی برخوردار است.

توسعه‌ی روش‌های کارا به‌منظور حل مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته است. علاوه‌بر این، در اختیار داشتن یک سیستم توزیع مطمئن و اثربخش که با درنظر گرفتن مواردی نظیر موعدهای تحویل مشتریان، محل‌های سکونت مشتریان و همچنین هزینه و زمان ارسال بتواند سیاست‌های مناسبی به‌منظور تحویل سفارش‌ها به مشتریان اتخاذ کند نیز به‌منظور حفظ توانایی رقابت با شرکت‌های دیگر ضروری است [۵].

باتوجه به موارد عنوان شده، دو عملیات برداشت و توزیع سفارش‌ها از اهمیت به‌سزایی در سیستم انبار خرده‌فروشان اینترنتی برخوردار هستند. علاوه‌بر این، در پژوهش‌های پیشین نشان داده شده است که برنامه‌ریزی برداشت و توزیع سفارش‌ها به‌صورت یکپارچه و هم‌زمان با هم می‌تواند باعث افزایش قابل توجه در سرویس ارائه شده به مشتریان و کاهش قابل توجهی در هزینه‌های انبار شود [۶] که در دنیای رقابتی امروز از اهمیت بالایی برخوردار است.

پرسش اصلی این است که مسأله برداشت دسته‌ای سفارش‌ها و مسیریابی توزیع سفارش‌ها با استفاده از وسایل نقلیه به‌صورت یکپارچه در یک انبار با چند برداشت‌کننده چگونه مدل‌سازی می شود؟ در این راستا، مسائل برداشت دسته‌ای سفارش‌ها و مسیریابی توزیع سفارش‌ها با استفاده از وسایل نقلیه به‌صورت یکپارچه درنظر گرفته و مدل‌سازی می‌شوند. یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح-مختلط[1] به‌منظور اتخاذ تصمیمات مرتبط با برداشت دسته‌ای سفارش‌ها و مسیریابی توزیع سفارش‌ها به‌صورت یکپارچه و با هدف کمینه کردن مجموع دیرکردها در تحویل سفارش‌های مشتریان ارائه می‌شود.

ساختار این مقاله به این‌صورت است که در بخش دوم، پیشینه تحقیق ارائه شده است. بخش سوم مفروضات مدل‌سازی و مدل پیشنهادی برای مسأله‌ی برداشت دسته‌ای و توزیع بکپارچه‌ی سفارش‌ها در انبار ارائه می‌شود. در بخش چهارم، نحوه‌ی طراحی الگوریتم حل پیشنهادی برای مدل یکپارچه توضیح داده می‌شود و در بخش پنجم، عملکرد این الگوریتم پیشنهادی برای حل مدل یکپارچه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش ششم که بخش پایانی مقاله است، نتیجه‌گیری انجام می‌شود و پیشنهادهایی نیز برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲. پیشینه‌ی پژوهش

در این بخش پژوهش‌هایی که مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها را به‌تنهایی یا همراه با سیاست‌های مرتبط با برداشت سفارش‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در پژوهش‌های پیشین، برای حل مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها عموماً روش‌های ابتکاری، دقیق و فراابتکاری به‌کار گرفته شده‌اند. اغلب پژوهش‌هایی که از روش حل دقیق برای مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها استفاده کرده‌اند، پژوهش‌هایی هستند که برای نمونه‌های کوچک از مسأله کاربرد دارند. بوزر و کایل [۷] یک مدل ریاضی خطی صحیح-مختلط را برای دسته‌بندی سفارش‌ها ارائه کردند و نتایج آن را با الگوریتم ابتکاری ارائه شده در پژوهش روبن و جاکوبز [۸] مقایسه کردند. تانگ و همکاران [۹] یک مدل برنامه‌ریزی خطی را با ترکیب مدل آزادشده‌ی دسته‌بندی و روش تولید ستون ارائه کردند. آن‌ها یک کارخانه‌ی تولید استیل با تولید پیوسته را برای مطالعه‌ی موردی درنظر گرفتند و آزمایش‌هایی را با درنظر گرفتن اطلاعات واقعی و اطلاعات ساختگی انجام دادند. میوتر و اونکان [۱۰] یک الگوریتم تولید ستون را برای حل دقیق مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها با درنظر گرفتن سه روش مسیریابی S-شکل[2] و نقطه‌ی میانی[3] پیشنهاد دادند. آن‌ها از تکنیک‌های استخر ستون[4] و آزادسازی زیر مسأله‌ی تولید ستون[5] برای تسریع الگوریتم استفاده کردند. الگوریتم ارائه شده در این مقاله قادر است مسائلی با ۱۰۰ سفارش را به‌صورت مؤثری حل کند. واله و همکاران [۱۱] با استفاده از تئوری گراف یک مدل ریاضی عدد صحیح را برای دسته‌بندی و مسیریابی برداشت سفارش‌ها ارائه کردند. نویسندگان مقاله سپس یک الگوریتم شاخه و برش[6] را برای حل مدل ریاضی ارائه شده پیشنهاد کردند.

باتوجه به این‌که روش‌های حل دقیق تنها برای نمونه‌های کوچک از مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها قابلیت کاربرد دارند، الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری توسعه داده شده‌اند. الگوریتم صرفه‌جویی که توسط کلارک و رایت [۱۲] برای مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه ارائه شد، به‌عنوان یک الگوریتم پایه در حل مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها

1. Mixed Integer Linear Programming
2. S-Shape Routing
3. Midpoint Routing
4. Column Pool
5. Column Generation
6. Branch and Cut

در انبار نیز بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. سای و همکاران [۱۳] چند مدل ریاضی را برای دسته‌بندی سفارش‌ها و مسیریابی برداشت آن‌ها در انبار با درنظر گرفتن هزینه‌ی برداشت، دیرکرد و زودکرد ارائه کردند و الگوریتم ژنتیک چندگانه‌ای را برای حل هم‌زمان این دو مسأله ارائه کردند. این الگوریتم شامل الگوریتم ژنتیک دسته‌بندی و الگوریتم ژنتیک فروشنده‌ی دوره‌گرد است. آن‌ها همچنین از شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت برای ارزیابی الگوریتم با درنظر گرفتن سفارش‌های مختلف و طرح‌های مختلف انبار استفاده کردند. چیریکی و ونگ [۱۴] نیز الگوریتم‌های ژنتیکی را برای برداشت دسته‌ای سفارش‌ها با درنظر گرفتن الگوریتم مسیریابی S-شکل ارائه کردند و آزمایش‌های عددی الگوریتم‌ها را با درنظر گرفتن حداکثر ۶۰ سفارش انجام دادند. آن‌ها نتایج عددی الگوریتم ژنتیک متمایل به اقلام[1] و الگوریتم ژنتیک[2] گروهی ارائه شده را با الگوریتم دوم صرفه‌جویی کلارک و رایت مقایسه کردند و مشاهده کردند که الگوریتم ژنتیک گروهی نتایج بهتری ارائه می‌دهد. در الگوریتم ژنتیک متمایل به اقلام برای دسته‌بندی سفارش‌ها، نمایش کروموزوم بر پایه‌ی سفارش‌ها است و هر کروموزوم به تعداد سفارش‌ها ژن دارد، اما در نمایش گروهی نمایش کروموزوم بر پایه‌ی دسته‌ها است و طول کروموزوم‌ها متغیر است. ژانگ و همکاران [۱۵] مسائل دسته‌بندی و تحویل برخط سفارش‌ها را درنظر گرفتند. آن‌ها ابتدا یک مدل ریاضی از نسخه‌ی برون‌خط این مسأله به‌منظور نمایش ساختار مسأله ارائه کردند. در این تحقیق هر سفارش موعد ارسال معینی دارد و هدف بیشینه کردن تعداد سفارش‌هایی که قبل از موعد ارسالشان برداشت می‌شوند و همچنین کمینه کردن مجموع زمان سرویس دسته‌ها است. همچنین در مدل ارائه شده چند برداشت‌کننده در یک راهروی مستطیل شکل با راهروهای موازی درنظر گرفته شد که با استفاده از الگوریتم مسیریابی S-شکل دسته‌ها را برداشت می‌کنند. نویسندگان یک الگوریتم بر پایه‌ی قوانین برای حل نسخه‌ی برخط مسأله ارائه کردند که در آن از دو قانون دسته‌بندی بر اساس شباهت سفارش‌ها و دسته‌بندی بر اساس میزان ضروری بودن سفارش‌ها و همچنین از قوانین تخصیص موجود در ادبیات موضوع استفاده می‌کند. در این پژوهش از داده‌های ساختگی به‌منظور ارزیابی نتایج الگوریتم استفاده شد. کوچ و واشر [۱۶] یک الگوریتم ژنتیک گروهی برای دسته‌بندی کردن سفارش‌ها پیشنهاد کردند. آن‌ها همچنین عملگرهای متناسب الگوریتم ژنتیک گروهی را طراحی کردند و برتری این نوع الگوریتم ژنتیک را نسبت‌به الگوریتم ژنتیک بر پایه‌ی اقلام نشان دادند. منندز و همکاران [۱۷] از یک الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر برای حل مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها در انباری با راهروهای موازی و با هدف کمینه کردن طولانی‌ترین زمان برداشت دسته‌ها استفاده کردند. آن‌ها به‌منظور مسیریابی برداشت سفارش‌ها از رویکرد ترکیبی بزرگ‌ترین شکاف و S-شکل بهره جستند. زولج و همکاران [۱۸] یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی را با ترکیب دو الگوریتم جست‌وجوی همسایگی بزرگ تطبیق‌پذیر[3] و جست‌وجوی ممنوع برای حل نمونه‌های بزرگ مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها در انبار ارائه کردند و نشان دادند که این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های پیشین در مدت‌زمان کمتر جواب‌های بهتری ارائه می‌کند. سرجیبوزان و تاسان [۱۹] نیز دو الگوریتم بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها با یک برداشت‌کننده پیشنهاد کردند. نویسندگان با استفاده از مسائل نمونه‌ی ساختگی و همچنین مطالعه‌ی موردی در یک مرکز توزیع نشان دادند که الگوریتم پیشنهاد شده برای حل نمونه‌های بزرگ و واقعی از مسأله به‌خوبی عمل می‌کند.

درنظر گرفتن یک یا چند فرآیند مرتبط با برداشت سفارش‌ها به‌صورت یکپارچه با مسأله‌ی دسته‌بندی در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه نویسندگان قرار گرفته است. هن [۲۰] مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها را با درنظر گرفتن چند برداشت‌کننده مورد مطالعه قرارداد و دو الگوریتم نزول همسایگی متغیر و جست‌وجوی همسایگی را برای حل آن با هدف کمینه کردن دیرکرد کل در برداشت سفارش‌ها ارائه کرد. او دو الگوریتم مسیریابی S-شکل و بزرگ‌ترین شکاف و رویکرد ذخیرش بر اساس طبقه را مورد استفاده قرارداد. هن آزمایش‌های الگوریتم را با درنظر گرفتن یک انبار تک بلوکه با ۹۰۰ مکان ذخیرش انجام داد و نتیجه گرفت که الگوریتم نزول همسایگی متغیر بهتر از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی عمل می‌کند. شولز و همکاران [۲۱] از اولین نویسندگانی بودند که تمامی فرآیندهای مرتبط با دسته‌بندی سفارش‌ها شامل تخصیص دسته‌ها به برداشت‌کننده‌ها، تعیین توالی برداشت دسته‌ها و مسیریابی برداشت دسته‌ها را در کنار دسته‌بندی سفارش‌ها برای یک انبار دو بلوکه و با چند برداشت‌کننده درنظر گرفتند. آن‌ها یک مدل ریاضی برای این مسأله ارائه کردند و آن را برای نمونه‌های کوچک از مسأله به‌طور دقیق حل کردند و برای حل نمونه‌های بزرگ‌تر نیز یک رویکرد نزول همسایگی متغیر را پیشنهاد کردند. ون گیلس و همکاران [۲۲] در پژوهش خود نشان دادند که درنظر گرفتن هم‌زمان ذخیره کردن، دسته‌بندی سفارش‌ها، ناحیه‌بندی برداشت و مسیریابی برداشت می‌تواند به مقدار قابل توجهی اثربخش باشد و هزینه‌ها را کاهش دهد. نویسندگان این پژوهش با استفاده تکنیک‌های آماری اثبات کردند که این مسأله‌ها با یکدیگر در ارتباط هستند. آن‌ها در بررسی نتایج عددی از سیاست‌های مختلف ذخیره کردن، دسته‌بندی، ناحیه‌بندی و مسیریابی بهره بردند. ارجمند و همکاران [۲۳] سه الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی آنیل کردن[4] و ترکیبی ژنتیک-شبیه سازی آنیل کردن برای حل هم‌زمان دو مسأله‌ی برداشت و مسیریابی سفارش‌ها در انبار ارائه کردند. کانو و همکاران [۲۴]، نویسندگان یک مدل ریاضی چندهدفه را برای حل هم‌زمان سه مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها، مسیریابی برداشت و تعیین توالی برداشت دسته‌ها طراحی کردند. در این پژوهش انبارهای تک‌بلوکه و

1. Item-Oriented Genetic Algorithm
2. Group-Oriented Genetic Algorithm
3. Adaptive Large Neighborhood Search
4. Simulated Annealing

دوبلوکه با سطوح بالا و پایین درنظر گرفته شد. در این پژوهش پیچیدگی محاسباتی حل مدل ریاضی مورد بحث قرار گرفت و پیشنهادهایی برای طراحی الگوریتم مناسب ارائه شد. فرسچی و همکاران [۲۵] در یکی از پژوهش‌های اخیر مسائل تخصیص مکان‌های ذخیرش و دسته‌بندی سفارش‌ها را در یک انبار غیراستاندارد درنظر گرفتند. در مسأله‌ی تخصیص مکان‌های ذخیرش، هدف بیشینه کردن شباهت کالاهایی که در کنار یکدیگر ذخیرش می‌شوند و در مسأله‌ی دسته‌بندی هدف کمینه کردن مسافت طی شده به‌منظور برداشت سفارش‌ها است. در این تحقیق یک الگوریتم ابتکاری بر پایه‌ی تئوری گراف برای حل مسأله ارائه شده است. کوبلر و همکاران [۲۶] یک مدل ریاضی برای تخصیص پویای کالاها به مکان‌های ذخیرش ارائه کردند که در آن دسته‌بندی سفارش‌ها و مسیریابی برداشت نیز درنظر گرفته می‌شود. هدف این مدل کمینه کردن مسافت برداشت سفارش‌ها و جابجا کردن کالاها در انبار است. در این تحقیق یک الگوریتم ابتکاری تکرارشونده برای حل مدل طراحی شده است.

همان‌طور که در پژوهش‌های اخیر مرتبط با بخش تولید از زنجیره-ی تأمین، از مزایای مدل‌سازی یکپارچه‌ی تولید و توزیع محصولات بهره برده می‌شود [۲۷، ۳۶، ۳۷]، در حوزه‌ی مسائل برداشت سفارش‌ها در انبار نیز، مدل‌سازی یکپارچه‌ی برداشت و توزیع سفارش‌ها نیز اخیراً مورد توجه نویسندگان قرار گرفته است. کوهن و همکاران [۵] یک مدل ریاضی برای مسأله‌ی یکپارچه‌ی برداشت و توزیع سفارش‌ها با هدف کمینه کردن دیرکرد در تحویل سفارش‌ها و با درنظر گرفتن چند برداشت‌کننده در انبار ارائه کردند. در این مدل ریاضی فرض می‌شود که کلیه‌ی دسته‌های موجه سفارش‌ها در اختیار است و از طریق تخصیص این دسته‌ها به برداشت‌کننده‌ها، دسته‌بندی سفارش‌ها تعیین می‌شوند. همچنین تصمیم‌گیری در مورد تخصیص دسته‌ها به وسایل نقلیه و مسیریابی وسایل نقلیه در مدل ارائه شده صورت می‌پذیرد. در این مدل هر وسیله‌ی نقلیه وظیفه‌ی توزیع یک دسته از سفارش‌ها را برعهده دارد و فرض می‌شود که وسایل نقلیه‌ی کافی برای این منظور در دسترس است. به‌منظور حل مدل ارائه شده یک الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی بزرگ تطبیقی ارائه می‌شود.

همان‌طور که پیش از این عنوان شد، در این مقاله مسائل برداشت دسته‌ای سفارش‌ها و مسیریابی توزیع سفارش‌ها با استفاده از وسایل نقلیه به‌صورت یکپارچه درنظر گرفته می‌شوند و یک مدل ریاضی خطی برای آن ارائه می‌شود. می‌توان گفت در میان پژوهش‌های بررسی شده، پژوهش کوهن و همکاران [۵] نزدیک‌ترین پژوهش به تحقیق انجام شده در این پژوهش است که البته تحقیق انجام شده در پژوهش کوهن و همکاران [۵] از جهاتی با پژوهش حاضر تفاوت دارد. در مدل پژوهش [۵]، ظرفیت نامحدود برای وسایل نقلیه درنظر گرفته می‌شود که باعث می‌شود وجود تنها یک مسیر از هر وسیله‌ی نقلیه برای توزیع سفارش‌ها بین مشتریان کافی باشد؛ اما در مدل این مقاله، وسایل نقلیه با ظرفیت محدود درنظر گرفته می‌شود که در نتیجه‌ی آن، نیاز می‌شود هر وسیله‌ی نقلیه در چند مسیر مجزا سفارش‌ها را به مشتریان تحویل دهد. این تفاوت در عین‌حال که باعث می‌شود مدل پژوهش حاضر نسبت‌به مدل پژوهش [۵] واقعی‌تر باشد، سبب می‌شود مدل مقاله‌ی حاضر از پیچیدگی بالاتری نیز برخوردار باشد. علاوه‌بر این، در مدل مقاله‌ی حاضر مجموع دیرکرد در تحویل سفارش‌ها به‌عنوان تابع هدف درنظر گرفته می‌شود، درحالی‌که در پژوهش [۵]، از تابع هدف جریمه‌ی دیرکرد استفاده شده است. همچنین، مدل ارائه شده در پژوهش کوهن و همکارانش، به‌دلیل استفاده از الگوریتم ابتکاری مسیریابی برداشت، قابلیت حل با استفاده از نرم‌افزارهای حل دقیق را ندارد، درحالی‌که مدل تحقیق حاضر به‌گونه‌ای تنظیم شده است که این قابلیت را داشته باشد. جدول (۱) به مقایسه تحقیق حاضر با پژوهش های مرتبط نسبتاً اخیر می‌پردازد.

باتوجه به جدول (۱)، تحقیق حاضر موارد توامان چند برداشت‌کننده، برداشت دسته‌ای و یکپارچه را در قالب یک مدل ریاضی ارائه می‌کند و با ارائه الگوریتم فراابتکاری جدید به حل مسأله می‌پردازد. این ترکیب ویژگی‌های نوآوری مدل حاضر را تضمین می‌کند. به‌هرحال، نوآوری‌های مسأله‌ی تعریف شده در این مقاله نسبت‌به پژوهش‌های پیشین به‌شرح زیر است:

۱. درنظرگرفتن زمان‌بندی و مسیریابی توزیع سفارش‌ها توسط وسایل نقلیه به‌صورت یکپارچه با مسأله‌ی برداشت دسته‌ای سفارش‌ها درانبار
۲. ارائه‌ی مدل ریاضی برای مسیریابی برداشت سفارش‌ها به روش S شکل و درنظرگرفتن آن به‌صورت بخشی از مدل ریاضی مسأله‌ی یکپارچه‌ی برداشت دسته‌ای و توزیع سفارش‌ها

۳. تعریف مسأله و مدل‌سازی

تعریف مسأله

در این تحقیق عملیات برداشت و توزیع سفارش‌ها در انبار که می‌تواند انبار یک خرده‌فروش آنلاین، انبار یک تأمین‌کننده‌ی قطعات در سیستم تولیدی و غیره باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد و باتوجه به نیاز به پاسخ‌گویی سریع‌تر به سفارش‌ها در چنین سیستم‌هایی، مراحل برداشت و توزیع یکپارچه‌ی سفارش‌ها به‌صورت یکپارچه درنظرگرفته می‌شود و یک مدل ریاضی خطی صحیح-مختلط به‌منظور مدل‌سازی این مسأله ارائه می‌شود. یک الگوریتم فراابتکاری بر پایه‌ی جست‌وجوی محلی تکرارشونده برای حل مسأله ارائه خواهد شد که از دو مرحله‌ی بهبود و اختلال تشکیل می‌شود.

جدول (۱): مقایسه تحقیق حاضر با پژوهش‌های مرتبط اخیر

پژوهشگر و سال	عنوان پژوهش	یک برداشت‌کننده	چند برداشت‌کننده	برداشت دسته‌ای	برداشت دسته‌ای یکپارچه	روش ابتکاری	مدل‌سازی ریاضی	فراابتکاری	روش مسیریابی	زمان‌بندی
شولس و اسجر(۲۰۱۷)	برداشت دسته‌ای و مسیر برداشت‌کننده در سیستم‌های برداشت با سفارش دسته‌ای	X		X				X	فراابتکاری با ترکیب‌الگوریتم‌های ابتکاری	
موتینگی و مبوهوا(۲۰۱۷)	بهینه‌سازی سفارش دسته‌ای در سیستم‌های برداشت سفارش با استفاده از الگوریتم ژنتیک	X		X				X	هیبریدالگوریتم‌های ابتکاری	
زولج، کرامر و اشنایدر(۲۰۱۸)	رویکرد هیبرید جست‌وجوی محلی تطبیق‌پذیر و جست‌وجوی تابو برای مسأله سفارش دسته‌ای	X		X				X	Sشکل-بزرگترین شکاف	
وان گیلس و همکاران (۲۰۱۸)	افزون‌سازی کارایی برداشت سفارش از طریق یکپارچه‌سازی عملیات ذخیره، دسته بندی، و برداشت سفارش با منظور-کردن سیاست مسیریابی			X		X			۵ روش ابتکاری موجود	
ژهانگ و همکاران (۲۰۱۹)	برداشت و ارسال یکپارچه آنلاین با منظورکردن اثرات یادگیری برداشت‌کننده در سوپرمارکت محلی آنلاین آفلاین				X		X		الگوریتم آنلاین	
وان گیلس و همکاران (۲۰۱۹)	فرمول‌بندی و حل مسأله یکپارچه برداشت دسته‌ای، مسیریابی و زمان‌بندی برداشت‌کننده در یک انبار قطعات				X				الگوریتم جست‌وجوی ملی	X
بریانت و همکاران (۲۰۲۰)	یک رویکرد مؤثر و جامع برای مسأله توامان برداشت، سفارش و مسیر حرکت برداشت‌کننده			X	X		X		X	
کانوا و همکاران (۲۰۲۰)	مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مسائل توامان سفارش دسته‌ای، توالی، و مسیر حرکت برداشت‌کننده در سیستم‌های برداشت سفارش دسته‌ای		X		X		X		X	
تحقیق حاضر (۲۰۲۲)	ارائه مدل ریاضی برای مسأله‌ی یکپارچه‌ی برداشت دسته‌ای و توزیع سفارش‌ها دریک انبار برداشت با چند برداشت‌کننده	X	X	X	X	X	X		استفاده از الگوریتم ابتکاری برای حل مسأله‌مسیریابی برداشت سفارش ها به روش S شکل	X

باتوجه به اهمیت و تأثیر قابل توجه تأخیر در تحویل سفارش‌ها مشتریان بر روی رضایت مشتریان، کمینه کردن مجموع دیرکرد در تحویل سفارش‌ها مشتریان به‌عنوان تابع هدف مدل درنظر گرفته می‌شود. مجموعه‌های به‌کار برده شده در مدل به‌شرح زیر است:

$M = \{1,2,\dots,\bar{M}\}$ مجموعه‌ی مشتریان

$M^0 = \{0,1,2,\dots,\bar{M}\}$ مجموعه‌ی مشتریان و دپو

$N = \{1,2,\dots,\bar{N}\}$ مجموعه‌ی دسته‌های سفارش

$P = \{1,2,\dots,\bar{P}\}$ مجموعه‌ی برداشت‌کننده‌ها

$V = \{1,2,\dots,\bar{V}\}$ مجموعه‌ی وسایل نقلیه

$T = \{1,2,\dots,\bar{T}\}$ مجموعه‌ی مسیرهای توزیع

$A = \{1,2,\dots,\bar{A}\}$ مجموعه‌ی راهروهای برداشت

$L = \{1,2,\dots,\bar{L}\}$ مجموعه‌ی مکان‌های برداشت

اندیس‌های به‌کار رفته در مدل عبارتند از:

$i,j \in M$ اندیس مشتریان و دپوی انبار

$k,k' \in N$ اندیس دسته‌های سفارش

$r \in P$ اندیس برداشت‌کننده‌ها

$q \in V$ اندیس وسایل نقلیه

$t \in T$ اندیس مسیرهای توزیع

$g \in A$ اندیس راهروهای برداشت

$h \in L$ اندیس مکان‌های برداشت در هر راهرو

پارامترهای مدل به‌شرح زیر است:

v_{travel} سرعت حرکت برداشت‌کننده‌ها (متر بر دقیقه)

v_{pick} سرعت برداشت (تعداد آیتم بر دقیقه)

v_{dist} سرعت متوسط حرکت وسایل نقلیه

b_i تعداد اقلام موجود در سفارش مشتری i

dd_i موعد تحویل سفارش مشتری i

C_b ظرفیت هر دسته‌ی برداشت (حداکثر تعداد اقلام)

$d_{i,j}$ فاصله‌ی بین مشتری i و j

t^b_{setup} زمان راه‌اندازی برداشت هر دسته

t^v_{setup} زمان بارگیری و راه‌اندازی هر وسیله‌ی نقلیه

W فاصله‌ی بین دو راهروی برداشت

L طول هر راهروی برداشت

r طول هر مکان یا ردیف برداشت در هر راهرو

$a = \frac{L}{r}$ تعداد مکان‌ها یا ردیف‌های برداشت در هر سمت راهرو

μ_{ig} اگر سفارش متعلق به مشتری i حداقل یک قلم کالا برای برداشت در راهروی برداشت g داشته باشد برابر با یک و در غیر این‌صورت برابر با صفر است

γ_{igh} اگر سفارش i حداقل یک قلم کالا برای برداشت در ردیف h از راهروی برداشت g داشته باشد برابر با یک و در غیر این‌صورت برابر با صفر است

M_{big} یک عدد بزرگ

متغیرهای تصمیم مدل عبارتند از:

x_{ik} متغیر صفر و یک تخصیص سفارش مشتری i به‌دسته‌ی k

y_{kr} متغیر صفر و یک تخصیص دسته‌ی k به برداشت‌کننده‌ی r

z_{iqt} متغیر صفر و یک تخصیص سفارش مشتری i به مسیر t از وسیله‌ی نقلیه‌ی q

u_{ijqt} متغیر صفر و یک عبور وسیله‌ی نقلیه‌ی q از مکان مشتری i به مکان مشتری j در مسیر توزیع tام

STP_k زمان شروع برداشت دسته‌ی k

CTP_k زمان اتمام برداشت دسته‌ی k

STL_{qt} زمان شروع بارگیری برای مسیر t از وسیله‌ی نقلیه‌ی q

DT_i زمان تحویل سفارش مشتری i

dis_k مسافت برداشت دسته‌ی k که توسط روش مسیریابی S-شکل تعیین می‌شود

τ_i دیرکرد در تحویل سفارش مشتری i

α_k تعداد راهروهایی که حداقل یک آیتم از دسته‌ی k برای برداشت در آن‌ها وجود دارد

α^l_k شماره‌ی اولین راهرویی (نزدیک‌ترین راهرو به دپو) که دسته‌ی k حداقل یک قلم کالا برای برداشت در آن دارد

α^f_k شماره‌ی آخرین راهرویی (دورترین راهرو از دپو) که دسته‌ی k حداقل یک قلم کالا برای برداشت در آن دارد

β_{kg} اگر دسته‌ی k حداقل یک قلم کالا برای برداشت در راهروی برداشت g داشته باشد برابر با یک و در غیر این‌صورت برابر با صفر است

θ^f_k فاصله‌ی دورترین مکان برداشت دسته‌ی k از راهروی راهروی عرضی نزدیک به دپو

π^f_{kg} شماره‌ی آخرین ردیف برداشتی که برداشت‌کننده به‌منظور برداشت دسته‌ی k در راهروی g باید از آن عبور کند

δ_k متغیر صحیح کمکی: اگر تعداد راهروهای برداشت دسته‌ی k یک عدد زوج باشد برابر با یک و در غیر این‌صورت برابر با صفر است

مدل ریاضی یکپارچه‌ی برداشت و توزیع سفارش‌ها به‌صورت زیر است:

$$min \sum_{i=1}^{\bar{M}} \tau_i \qquad (۱)$$

Subject to:

$$\sum_{k=1}^{\bar{N}} x_{ik} = 1, \qquad \forall i \in M, i \geq 1 \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{\bar{M}} x_{ik} \leq \bar{M} \sum_{i=1}^{\bar{M}} x_{i,k-1}, \qquad \forall k \in N, k \geq 2 \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{\bar{M}} b_i x_{ik} \leq C_b, \qquad \forall k \in N \qquad (۴)$$

$$\sum_{r=1}^{\bar{P}} y_{kr} = 1, \qquad \forall k \in N \qquad (۵)$$

$$STP_k \geq CTP_{k'} - M_{big}(2 - y_{kr} - y_{k',r}), \quad \forall k,k' \in N, r \in P, k > k' \qquad (۶)$$

$$CTP_k \geq STP_k + dis_k/v_{travel} + \sum_{i=1}^{m} b_i x_{ik} \Big/ v_{pick} + t^b_{setup}, \quad \forall k \in N, r \in P \qquad (۷)$$

$$\sum_{q=1}^{\bar{V}} \sum_{t=1}^{\bar{T}} z_{iqt} = 1, \quad \forall i \in M, i \geq 1 \qquad (۸)$$

$$z_{jqt} = \sum_{i=0, i\neq j}^{\bar{M}} u_{ijqt}, \quad \forall j \in M, q \in V, t \in T \qquad (۹)$$

$$z_{jqt} = \sum_{i=0, i\neq j}^{\bar{M}} u_{jiqt}, \quad \forall j \in M, q \in V, t \in T \qquad (۱۰)$$

$$z_{0qt} \geq z_{iqt}, \quad \forall i \in M, q \in V, t \in T \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{i=1}^{\bar{M}} z_{iqt} \leq M_{big} \sum_{i=1}^{\bar{M}} z_{i,q,t-1}, \quad \forall q \in V, t \in T, t \geq 2 \qquad (۱۲)$$

$$STL_{qt} \geq CTP_k - M_{big}(2 - x_{ik} - z_{iqt}), \quad \forall i \in M, q \in V, t \in T, k \in N \qquad (۱۳)$$

$$STL_{qt} \geq DT_i + d_{i0}/v_{travel} - M_{big}(1 - z_{i,q,t-1}), \quad \forall i \in M, q \in V, t \in T, t \geq 2 \qquad (۱۴)$$

$$DT_j \geq DT_i + d_{ij}/v_{travel} - M_{big}(1 - u_{ijqt}), \quad \forall i, j \in M, q \in V, t \in T \qquad (۱۵)$$

$$DT_i \geq STL_{qt} + d_{0,i}/v_{travel} - M_{big}(1 - z_{iqt}), \quad \forall i \in M, q \in V, t \in T \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{i=1}^{\bar{M}} b_i \sum_{t=1}^{\bar{M}} z_{iqt} \leq C_v, \quad \forall q \in V \qquad (۱۷)$$

$$\tau_i \geq DT_i - dd_i, \quad \forall i \in M \qquad (۱۸)$$

$$STP_k, CTP_k, STL_{qt}, \tau_i \geq 0, \quad \forall i \in M, k \in N, q \in V, t \in T \qquad (۱۹)$$

$$x_{ik}, y_{kr}, z_{iqt}, u_{ijqt} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in M, k \in N, r \in P, q \in V, t \in T \qquad (۲۰)$$

در تابع هدف (۱) مجموع دیرکرد در تحویل سفارش‌ها کمینه می‌شود. محدودیت (۲) اطمینان حاصل می‌کند که هر سفارش تنها به یک دسته‌ی برداشت اختصاص پیدا کند. محدودیت (۳) به‌منظور جلوگیری از تشکیل دسته‌ای است که دسته‌ی ماقبل آن هنوز تشکیل نشده است. درواقع این محدودیت باعث می‌شود دسته‌ها به‌صورت متوالی باز شوند. محدودیت (۴) ظرفیت برداشت در هر دسته را رعایت می‌کند. محدودیت (۵) برای این منظور است که هر دسته از سفارش‌ها به دقیقاً یک برداشت‌کننده اختصاص داده شود. رابطه‌ی (۶) زمان شروع برداشت دسته‌هایی که برداشت‌کننده‌ی مشترک دارند را به‌صورت متوالی محاسبه می‌کند. در طرف راست این نامعادله، زمانی که دسته‌های k و k' هر دو به یک برداشت‌کننده اختصاص یافته باشد، عبارت $M(2 - y_{kr} - y_{k',r})$ برابر با صفر می‌شود و رابطه‌ی $STP_k \geq CTP_{k'}$ برقرار می‌شود که یعنی برداشت دسته‌ی k پس از تکمیل برداشت دسته‌ی k' آغاز می‌شود. رابطه‌ی (۷) زمان اتمام برداشت دسته‌ها را محاسبه می‌کند. در طرف راست این نامعادله، $\mathrm{dis_k/v_{travel}}$ زمان موردنیاز برای حرکت برداشت‌کننده در راهروها به‌منظور برداشت اقلام سفارش k و $\sum_{i=1}^{m} b_i x_{ik}/v_{pick}$ میزان زمان موردنیاز برای برداشت اقلام دسته‌ی k را محاسبه می‌کند. این مقادیر با زمان راه‌اندازی دسته و زمان شروع برداشت دسته جمع می‌شوند و زمان اتمام برداشت دسته را به محاسبه می‌کند. محدودیت (۸) سفارش هر مشتری را به دقیقاً یک مسیر توزیع از یک وسیله‌ی نقلیه اختصاص می‌دهد. محدودیت (۹) اطمینان حاصل می‌کند که اگر سفارش یک مشتری به مسیر توزیعی از یک وسیله‌ی نقلیه‌ی اختصاص یابد، آن وسیله‌ی نقلیه حتماً از مکانی (انبار یا مکان یک مشتری دیگر) به مشتری مربوط به سفارش موردنظر سفر کند. رابطه‌ی (۱۰) نیز برای این منظور است که اگر وسیله‌ی نقلیه‌ای در مسیری سفارش یک مشتری را تحویل می‌دهد، درادامه‌ی مسیر حتماً از آن مشتری به مکان دیگری (انبار یا مشتری دیگر) سفر کند. محدودیت (۱۱) برای اطمینان از این مطلب است که اگر حداقل یک سفارش به مسیر توزیعی از یک وسیله‌ی نقلیه اختصاص‌یافته باشد، وسیله‌ی نقلیه‌ی موردنظر برای توزیع سفارش‌های مربوط به آن مسیر توزیع، حتماً از انبار خارج شود. رابطه‌ی (۱۲) برای این منظور است که مسیرهای توزیع هر وسیله به‌ترتیب و به‌صورت متوالی تشکیل شوند. نامعادله‌ی (۱۳) زمان شروع بارگیری وسایل نقلیه را محاسبه می‌کند. در طرف راست این نامساوی، درصورتی‌که سفارش i به‌دسته‌ی k اختصاص یافته باشد و دسته‌ی k در مسیر t از وسیله‌ی نقلیه‌ی q توزیع شود، عبارت $M(2 - x_{ik} - z_{iqt})$ برابر با صفر می‌شود و رابطه‌ی $STL_{qt} \geq CTP_k$ برقرار می‌شود. محدودیت (۱۴) این نکته را بیان می‌کند که بارگیری برای مسیر توزیع مشخصی از یک وسیله‌ی نقلیه زمانی می‌تواند شروع شود که وسیله‌ی نقلیه از سفر قبلی خود به انبار بازگشته باشد. در طرف راست این نامعادله، $DT_i + d_{i0}/v_{travel}$ زمان بازگشت وسیله‌ی نقلیه به انبار را با فرض اینکه i آخرین مشتری عبوری باشد نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) زمان تحویل سفارش‌های مشتریان را محاسبه می‌کند. به این‌صورت که محدودیت (۱۶) زمان تحویل سفارش اولین مشتری که هر وسیله‌ی نقلیه از آن عبور می‌کند را محاسبه می‌کند و محدودیت (۱۵) زمان تحویل سفارش‌های مشتریان بعدی را محاسبه می‌کند. این محدودیت‌ها همچنین از ایجاد زیرتور در جواب به‌دست آمده جلوگیری می‌کنند. رابطه‌ی (۱۷) به‌منظور رعایت محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه کاربرد دارد. محدودیت (۱۸) دیرکرد را در تحویل سفارش‌ها به مشتریان محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۹) محدودیت غیر منفی بودن متغیرهای زمان شروع برداشت دسته‌ها، دیرکرد و محدودیت (۲۰) نیز مربوط به صفر و یک بودن متغیرهای تخصیص سفارش‌ها به‌دسته‌ها، تخصیص دسته‌ها به برداشت‌کننده‌ها، تخصیص سفارش‌ها به مسیرهای توزیع و متغیرهای مسیریابی توزیع است.

متغیر dis_k که در محدودیت (۷) به‌کار رفته است، متغیر مسافت

طی شده به‌منظور برداشت دسته‌ی k است. مقدار این متغیر با استفاده از رویکرد مسیریابی S-شکل تعیین می‌شود. باتوجه به این‌که نحوه‌ی تخصیص سفارش‌ها به‌دسته‌ها توسط مدل ارائه شده تعیین می‌شود و مسافت طی شده برای برداشت دسته‌ها متأثر از نحوه‌ی تخصیص سفارش‌ها به‌دسته‌ها است، باید محدودیت‌هایی را به مدل اضافه کنیم که باتوجه به نحوه‌ی تخصیص سفارش‌ها به‌دسته‌ها، مسافت طی شده برای برداشت دسته‌ها تعیین شود. به‌منظور طراحی محدودیت‌های موردنیاز برای مسیریابی S-شکل، از رابطه‌ای که توسط ژانگ و همکارانش [۲۸] برای تعیین مسیر به روش S-شکل ارائه شده است استفاده می‌شود. براساس رابطه‌ی ارائه شده در این پژوهش، مسافت طی شده برای برداشت یک دسته از سفارش‌ها از طریق یک تابع چندضابطه‌ای محاسبه می‌شود. به این‌صورت که، درصورتی‌که تعداد راهروهایی که حداقل یک برداشت در آن‌ها وجود دارد برابر ۱ باشد:

$$dis_k = (\alpha_k^l - 1)W + 2\theta_k^f + (\alpha_k^f - 1)W \quad (۲۱)$$

درصورتی‌که تعداد راهروهایی که حداقل یک برداشت در آن‌ها وجود دارد یک عدد صحیح زوج باشد:

$$(\alpha_k^l - 1)W + \alpha_k L + (\alpha_k - 1)W + (\alpha_k^f - 1)W \quad (۲۲)$$

و درصورتی‌که تعداد رارهروهایی که حداقل یک برداشت در آن‌ها وجود دارد یک عدد صحیح فرد باشد:

$$(\alpha_k^l - 1)W + (\alpha_k - 1)L + 2\theta_k^f + (\alpha_k - 1)W + (\alpha_k^f - 1)W \quad (۲۳)$$

به‌منظور محاسبه‌ی مسافت طی شده برای برداشت دسته‌ها، معادلات بالا به روابط خطی تبدیل می‌شوند و به مدل اصلی اضافه می‌شوند.

۴. الگوریتم فراابتکاری حل مدل یکپارچه‌ی برداشت و توزیع

پیچیدگی حل مسأله‌ی برداشت و توزیع یکپارچه‌ی سفارش‌ها در انبار سبب می‌شود که تنها حل نمونه‌های کوچک از این مسأله با استفاده از نرم‌افزارهای حل دقیق مدل‌های ریاضی امکان‌پذیر باشد و حل نمونه‌های بزرگ‌تر از این مسأله نیازمند طراحی الگوریتمی مناسب برای مسأله است. در این بخش یک الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرار شونده برای حل مدل یکپارچه ارائه می‌شود. الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده یکی از الگوریتم‌های جدید است که برای حل بسیاری از مسائل تحقیق‌درعملیات تطبیق داده شده است. ازجمله‌ی این مسائل می‌توان به انواع مختلف مسأله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه، مسأله‌ی زمان‌بندی تک‌ماشین و مسأله‌ی زمان‌بندی ماشین‌های موازی اشاره کرد. الگوریتمی که در این بخش ارائه می‌شود، توسعه‌یافته‌ی الگوریتمی است که شوبرت و همکاران [۲۹] برای حل مسأله‌ی یکپارچه‌ی برداشت تکی و توزیع سفارش‌ها به‌کار بردند، درادامه مراحل کلی الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرار شونده‌ی ارائه شده بیان می‌شود.

۴-۱. مراحل کلی الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرار شونده

الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده با یک جواب اولیه، δ_{ini}، شروع به‌کار می‌کند. ابتدا با استفاده از رویکرد بهبود، جواب اولیه بهبود داده می‌شود تا یک جواب بهینه‌ی محلی به‌دست آید. جواب بهینه‌ی محلی به‌دست آمده به‌عنوان اولین جواب حاکم[1]، δ_{inc}، و همچنین بهترین جواب فعلی الگوریتم، δ_{best}، درنظر گرفته می‌شود. سپس حلقه‌ی اصلی الگوریتم شروع می‌شود و دو رویکرد بهبود و آشفتگی به‌صورت متوالی تا زمانی که شرایط توقف خاصی برقرار شود و حلقه به پایان برسد به‌کار برده می‌شوند. در رویکرد آشفتگی جواب حاکم به‌صورت تصادفی تغییر می‌کند تا از افتادن الگوریتم در دام بهینه‌ی محلی جلوگیری شود. در هر تکرار از حلقه‌ی الگوریتم، اگر جواب به‌دست آمده پس از به‌کار بردن رویکردهای بهبود و آشفتگی از بهترین جواب فعلی الگوریتم بهتر باشد، جواب به‌دست آمده به‌عنوان بهترین جواب فعلی الگوریتم و همچنین جواب حاکم درنظر گرفته می‌شود. در غیر این‌صورت بهترین جواب فعلی الگوریتم تغییری نمی‌کند. جواب به‌دست آمده پس از رویکردهای بهبود و آشفتگی، درصورتی‌که بدتر از جواب حاکم الگوریتم باشد نیز با درنظر گرفتن ضریب مشخصی جایگزین جواب حاکم می‌شود. شبه‌کد الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده‌ی مورد استفاده، در جدول (۲) نشان داده شده است. درادامه‌ی این بخش جزئیات مربوط به قسمت‌های مختلف الگوریتم نظیر رویکرد بهبود، رویکرد اختلال، شرایط پذیرش و شرایط توقف ارائه می‌شود.

جدول (۲): شبه‌کد الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده

ورودی: داده‌های مسأله
خروجی: بهترین جواب به‌دست‌آمده، δ_{best}، و تابع هدف آن $f(\delta_{best})$
۱: ایجاد جواب اولیه δ_{ini}
۲: بهبود جواب اولیه با استفاده از رویکرد بهبود و به‌دست آمدن جواب حاکم δ_{inc}
۳: تعیین جواب حاکم به‌عنوان بهترین جواب یافت شده δ_{best}
۴: *تا زمانی که* شرایط توقف برقرار نشده انجام بده:
۵: ایجاد آشفتگی در جواب حاکم و به‌دست آمدن جواب $\bar{\delta}$
۶: بهبود جواب $\bar{\delta}$ و به‌دست آمدن جواب δ^*
۷: *اگر* تابع هدف δ^* بهتر از تابع هدف δ_{best} است:
۸: تعیین δ^* به‌عنوان بهترین جواب یافت شده (δ_{best})
۹: تعیین δ^* به‌عنوان جواب حاکم (δ_{inc})
۱۰: *در غیر این‌صورت اگر* شرایط خاص بین توابع هدف δ^* و δ_{inc} برقرار است:
۱۲: درنظر گرفتن δ^* به‌عنوان جواب حاکم (δ_{inc})
۱۳: *پایان شرط*
۱۴: *پایان حلقه*

1. Incumbent Solution

تولید جواب اولیه: به‌منظور تولید جواب اولیه، از یک رویکرد ابتکاری دومرحله‌ای استفاده می‌شود که در مرحله‌ی اول یک جواب اولیه برای مسأله‌ی مسیریابی توزیع سفارش‌ها به‌دست می‌آورد و در مرحله‌ی دوم از جواب اولیه‌ی به‌دست آمده به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند و یک جواب اولیه برای مسأله‌ی برداشت دسته‌ای سفارش‌ها به‌دست می‌آورد.

در مرحله‌ی اول، به‌منظور به‌دست آوردن جواب اولیه برای مسأله‌ی مسیریابی توزیع، از قانون نزدیک‌ترین موعد تحویل[1] [۳۰] استفاده می‌شود. در این روش، سفارش‌ها به‌ترتیب غیرنزولی موعدهای تحویل‌شان مرتب می‌شوند و به‌ترتیب هریک به انتهای مسیر وسیله‌ی نقلیه‌ای اختصاص داده می‌شوند که کوتاه‌ترین مسیر توزیع فعلی را دارد. زمانی که ظرفیت یک مسیر از وسیله‌ی نقلیه‌ای تکمیل شود مسیر دیگری افتتاح می‌شود و سفارش موردنظر به ابتدای مسیر جدید اضافه می‌شود. برای اینکه جواب به‌دست آمده با استفاده از این روش یک جواب شدنی باشد، زمان تکمیل برداشت سفارش‌ها نیز باید درنظر گرفته شود. زمان تکمیل برداشت سفارش‌ها حائز اهمیت است زیرا سفارش‌ها تنها درصورتی امکان ارسال دارند که برداشت آن‌ها تکمیل شده باشد؛ اما زمان تکمیل برداشت سفارش‌ها در این مرحله از الگوریتم که مختص قسمت مسیریابی توزیع سفارش‌ها است، مشخص نیست. برای تخمین زمان تکمیل سفارش‌ها فرض می‌شود متناظر با هر وسیله‌ی نقلیه یک برداشت‌کننده در انبار باشد (تعداد برداشت‌کننده‌ها و وسایل نقلیه برابر باشند) و هر برداشت‌کننده سفارش‌های متعلق به‌وسیله‌ی نقلیه‌ی متناظر را با همان ترتیبی که وسیله‌ی نقلیه توزیع می‌کند برداشت کند. با استفاده از این رویکرد، زمان تکمیل برداشت سفارش‌ها تخمین زده می‌شود که می‌توان با استفاده از آن‌ها زمان آماده به ارسال بودن هر دسته از سفارش‌ها که توسط یک وسیله در مسیر مشترک ارسال می‌شوند را تخمین زد. زمان‌های آماده به ارسال بودن دسته‌های توزیع به‌عنوان زمان شروع توزیع آن‌ها درنظر گرفته می‌شود. زمان‌های شروع توزیع دسته‌ها در جواب اولیه‌ی به‌دست آمده برای مسأله‌ی مسیریابی توزیع سفارش‌ها درنظر گرفته می‌شوند و در نتیجه‌ی آن، علاوه‌بر مسیریابی توزیع سفارش‌ها، زمان‌بندی توزیع سفارش‌ها توسط وسایل نقلیه نیز مشخص می‌شود.

در مرحله‌ی دوم، جواب اولیه‌ی به‌دست آمده برای مسأله‌ی مسیریابی توزیع به‌عنوان ورودی برای مسأله‌ی برداشت دسته‌ای سفارش‌ها درنظر گرفته می‌شود. درواقع، زمان‌های شروع توزیع دسته‌ها که در مرحله‌ی اول به‌دست آمد به‌عنوان موعد تحویل سفارش‌ها در مسأله‌ی برداشت دسته‌ای سفارش‌ها درنظر گرفته می‌شود و این مسأله حل می‌شود. برای حل این مسأله، باید از روشی استفاده شود که توانایی حل مسأله‌ی دسته‌بندی سفارش‌ها با درنظر گرفتن موعدهای تحویل سفارش‌ها را داشته باشد. برای این منظور، بار دیگر از رویکرد نزدیک‌ترین موعد تحویل استفاده می‌شود. البته این روش تضمینی نمی‌کند که در جواب به‌دست آمده موعد تحویل سفارش‌ها لزوماً رعایت شود، اما تلاش می‌کند که تا حد ممکن این محدودیت رعایت شود. پس از حل مسأله‌ی برداشت دسته‌ای سفارش‌ها، زمان تکمیل برداشت سفارش‌ها و دسته‌های برداشت مشخص می‌شود. سپس برای هر سفارش، درصورتی‌که زمان تکمیل برداشت آن سفارش از زمان شروع توزیع دسته‌ی توزیعی که سفارش به آن تعلق دارد (زمان‌های تخمین زده شده در مرحله‌ی اول) بیشتر باشد، اختلاف آن‌ها به‌عنوان تأخیر آن سفارش درنظر گرفته می‌شود. اگر جواب حاصل، تأخیری برابر با صفر داشته باشد، از ترکیب این جواب و جواب مسأله‌ی مسیریابی توزیع سفارش‌ها یک جواب موجه برای مسأله‌ی یکپارچه به‌دست می‌آید. اگر جواب به‌دست آمده برای مسأله‌ی برداشت دسته‌ای سفارش‌ها تأخیری مثبت داشته باشد، هر دسته‌ی توزیعی که سفارش یا سفارش‌هایی از آن دارای تأخیر هستند، زمان شروع توزیعش به اندازه‌ی لازم (براساس میزان تأخیر سفارش‌های موجود در آن دسته) به تعویق می‌افتند و همه دسته‌هایی که بعد از آن دسته و توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی مشترک توزیع می‌شوند نیز زمان شروع توزیعشان به تعویق می‌افتد.

مرحله‌ی بهبود: در این الگوریتم، فضای جواب مسأله با استفاده از یک توالی از همسایگی‌های $N_1, N_2, \dots, N_l$ جست‌وجو می‌شود. مراحل این الگوریتم به این‌صورت است که الگوریتم با یک جواب اولیه‌ی δ شروع می‌شود و این جواب به‌عنوان بهترین جواب فعلی درنظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از همسایگی اول، N_1، یک بهینه‌ی محلی به‌دست می‌آید. اگر این جواب بهینه‌ی محلی از بهترین جواب فعلی بهتر باشد، این جواب به‌عنوان بهترین جواب فعلی درنظر گرفته می‌شود و مجدداً با استفاده از رویکرد همسایگی N_1 یک بهینه‌ی محلی به‌دست می‌آید. در غیر این‌صورت از رویکرد همسایگی دوم، N_2، برای جست‌وجوی فضای جواب بهره برده می‌شود. هر زمان که یک بهینه‌ی محلی به‌دست آمده جایگزین بهترین جواب فعلی شود، الگوریتم با جست‌وجوی فضای جواب با استفاده از N_1 ادامه پیدا می‌کند. همچنین زمانی که فضای جواب با استفاده از همسایگی آخر، N_l، جست‌وجو شود و جواب به‌دست آمده از بهترین جواب فعلی بهتر نباشد الگوریتم متوقف می‌شود. جواب نهایی δ^* که با استفاده از این روش به‌دست می‌آید یک جواب بهینه‌ی محلی با درنظر گرفتن کلیه‌ی همسایگی‌ها است.

به‌منظور بهبود جواب‌ها، از دو الگوریتم نزول همسایگی متغیر در دو مرحله استفاده می‌شود که الگوریتم اول برای مسأله‌ی مسیریابی توزیع سفارش‌ها و الگوریتم دوم برای مسأله‌ی برداشت دسته‌ای سفارش‌ها است. شبه‌کد رویکرد بهبود دو مرحله‌ای در جدول (۳) نشان داده شده است. به‌دلیل ساختار مسائل دسته‌بندی برداشت و مسیریابی توزیع، هریک از الگوریتم‌های نزول همسایگی متغیر به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که فقط روی مسأله‌ی مربوط به خودشان تأثیر بگذارند. هر تغییری در جواب مسأله‌ی مسیریابی توزیع فقط روی این مسأله تأثیر می‌گذارد و به‌همین دلیل در این مرحله تغییرات با خیال راحت‌تری

1. Earliest Due Date

ایجاد می‌شوند؛ اما هر تغییری در جواب مسأله‌ی دسته‌بندی برداشت سفارش‌ها زمان تکمیل برداشت سفارش‌ها را نیز تغییر می‌دهد و باعث تغییر در زمان شروع مسیرهای توزیع می‌شود؛ بنابراین، هر تغییری در جواب مسأله‌ی دسته‌بندی برداشت سفارش‌ها بر روی هر دو مسأله تأثیر می‌گذارد و برای رسیدن مجدد به یک جواب شدنی زمان بیشتری را می‌طلبد. باتوجه به این نکته، ابتدا جواب مسأله‌ی مسیریابی توزیع بهبود می‌یابد و تا زمانی که یک جواب بهینه‌ی محلی حاصل نشده باشد، تغییری در جواب مسأله‌ی دسته‌بندی برداشت ایجاد نمی‌شود. در الگوریتم نزول همسایگی متغیری که برای بهبود مسأله‌ی مسیریابی توزیع سفارش‌ها استفاده می‌شود، از چهار همسایگی متفاوت به‌شرح زیر استفاده می‌کنیم:

- همسایگی اول: یک توالی از سفارش‌ها از یک دسته‌ی توزیع برداشته می‌شود و در نقطه‌ی دیگری از همان دسته‌ی توزیع قرار می‌گیرد.
- همسایگی دوم: دو دسته‌ی توزیع مختلف که به وسایل نقلیه‌ی مختلف اختصاص داده‌شده‌اند با یکدیگر جابجا می‌شوند.
- همسایگی سوم: یک توالی با حداکثر دو سفارش از یک دسته‌ی توزیع برداشته می‌شود و به‌دسته‌ی توزیع جدیدی که برای همان وسیله ساخته می‌شود اختصاص می‌یابد.
- همسایگی چهارم: دو سفارش از دو دسته‌ی توزیع مختلف متعلق به یک وسیله‌ی نقلیه‌ی مشترک درصورتی‌که محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه را نقض نکنند باهم جابجا می‌شوند.

جدول (۳): شبه‌کد رویکرد بهبود دومرحله‌ای

ورودی: داده‌های مسأله و جواب δ با تابع هدف $f(\delta)$ خروجی: جواب بهینه‌ی محلی δ^* با تابع هدف $f(\delta^*)$
۱: مقدار $f(\delta^*)$ را برابر با $f(\delta)$ قرار بده ۲: *تا زمانی که* $f(\delta) < f(\delta^*)$، انجام بده: ۳: δ^* را برابر با δ قرار بده $(\delta^* = \delta)$ ۴: با استفاده از الگوریتم نزول همسایگی متغیر اول δ را بهبود بده و δ را برابر با جواب بهبودیافته قرار بده ۵: با استفاده از الگوریتم نزول همسایگی متغیر دوم δ را بهبود بده و δ را برابر با جواب بهبودیافته قرار بده ۶: *پایان*

شکل (۱) کاربرد همسایگی سوم را به‌صورت شماتیک بر روی مسأله‌ای شامل دو برداشت‌کننده و دو وسیله‌ی نقلیه نشان می‌دهند. در شکل (۱)، جواب مسأله‌ی مسیریابی قبل و بعد از استفاده از همسایگی سوم نشان داده شده است. در مثال شکل (۱)، سفارش‌ها با شماره‌های ۷ و ۸ از دسته‌ی توزیع (۷،۸،۶) که به‌وسیله‌ی نقلیه‌ی ۲ اختصاص داده شده‌اند جدا می‌شوند. سفارش باقی‌مانده از این دسته‌ی توزیع تنها سفارش شماره‌ی ۶ است که اکنون می‌تواند بسیار زودتر از قبل، توزیع آن آغاز شود زیرا این سفارش توسط یک برداشت‌کننده در ابتدای شروع برداشت سفارش‌ها برداشت شده است. در این حالت، دسته‌ی توزیع جدید (۷،۸) به‌عنوان دسته‌ی توزیع دوم وسیله‌ی نقلیه‌ی دوم درنظر گرفته می‌شود و می‌تواند پس از تکمیل برداشت سفارش ۸ توزیع شود. همان‌طور که از شکل (۱) مشخص است، زمان شروع این دسته‌ی توزیع مشابه زمان شروع توزیع دسته‌ی (۷،۸،۶) قبل از تغییر در جواب است. بدیهی است که مدت‌زمان لازم برای توزیع دسته‌ی (۷،۸) کوتاه‌تر از مدت‌زمان موردنیاز برای توزیع دسته‌ی (۷،۸،۶) است. بنابراین توزیع دسته بعدی یعنی دسته‌ی (۴،۵) اکنون می‌تواند زودتر شروع شود و این باعث می‌شود که هر دو سفارش آن زودتر تحویل داده شوند.

در همسایگی‌های اول و سوم به‌ترتیب یک دسته از یک وسیله‌ی نقلیه، در همسایگی دوم دو دسته از دو وسیله‌ی نقلیه‌ی مختلف و در همسایگی چهارم دو دسته از یک وسیله‌ی نقلیه دستخوش تغییر می‌شود و سایر دسته‌های وسایل نقلیه تغییری نمی‌کنند. همچنین در جواب مسأله‌ی دسته‌بندی برداشت سفارش‌ها نیز تغییری حاصل نمی‌شود.

برای مسأله‌ی دسته‌بندی برداشت سفارش‌ها همسایگی‌های زیر درنظر گرفته می‌شود:

- همسایگی اول: دو دسته‌ی برداشت که به برداشت‌کننده‌های مختلف اختصاص داده‌شده‌اند با یکدیگر جابجا می‌شوند.
- همسایگی دوم: یک توالی با حداکثر دو سفارش از یک دسته‌ی برداشت جدا می‌شود و به‌دسته‌ی برداشت جدیدی که برای همان برداشت‌کننده ساخته می‌شود اختصاص می‌یابد.
- همسایگی سوم: دو سفارش از دو دسته‌ی برداشت مختلف متعلق به یک برداشت‌کننده‌ی مشترک درصورتی‌که محدودیت ظرفیت دسته‌ها نقض نشود باهم جابجا می‌شوند.

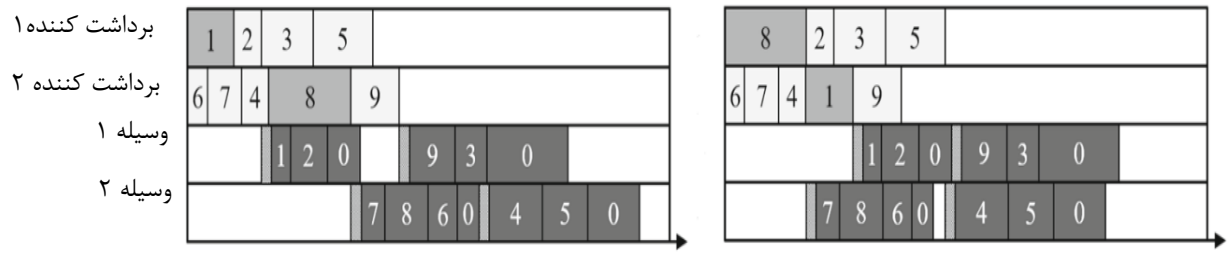
شکل (۲) کاربرد همسایگی اول مسأله‌ی برداشت را برای یک نمونه از مسأله نشان می‌دهد. در این مثال سفارش‌های ۱ و ۸ که هریک به‌تنهایی تشکیل یک دسته را می‌دهند، با یکدیگر جابجا شوند. این جابجایی باعث می‌شود که زمان تکمیل برداشت سفارش ۱ افزایش یابد و در نتیجه‌ی آن، زمان شروع توزیع دسته‌ای که این سفارش در آن قرارگرفته است نیز افزایش یابد. با این تغییر زمان شروع توزیع دسته‌ی (۹،۳) دیگر به زمان تکمیل برداشت سفارش ۹ وابسته نیست و براساس زمان بازگشت وسیله‌ی نقلیه‌ی اول از توزیع دسته‌ی قبلی یعنی دسته‌ی (۱،۲) مشخص می‌شود. بنابراین، شروع توزیع دسته‌ی (۹،۳) نیز به تعویق می‌افتد. همچنین می‌توان از شکل (۲) به‌وضوح دید که با جابجایی دسته‌های (۱) و (۸) زمان شروع توزیع دسته‌های مربوط به این وسیله‌ی نقلیه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد زیرا با این تغییر زمان تکمیل برداشت سفارش ۸ کاهش می‌یابد.

مرحله‌ی آشفتگی (اختلال): با استفاده از رویکرد آشفتگی، جواب مسأله به‌صورت تصادفی دچار تغییر می‌شود. نوع تغییری که در این مرحله ایجاد می‌شود تأثیر زیادی بر روی عملکرد کلی الگوریتم خواهد داشت. اگر تغییر ایجاد شده خیلی کوچک باشد، به‌کارگیری مجدد الگوریتم بهبود منجربه بازگشت به جواب بهینه‌ی محلی قبل خواهد

شد و اگر تغییر ایجاد شده خیلی بزرگ باشد، الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده تبدیل به یک الگوریتم بهبود با شروع‌های مجدد تصادفی خواهد شد.

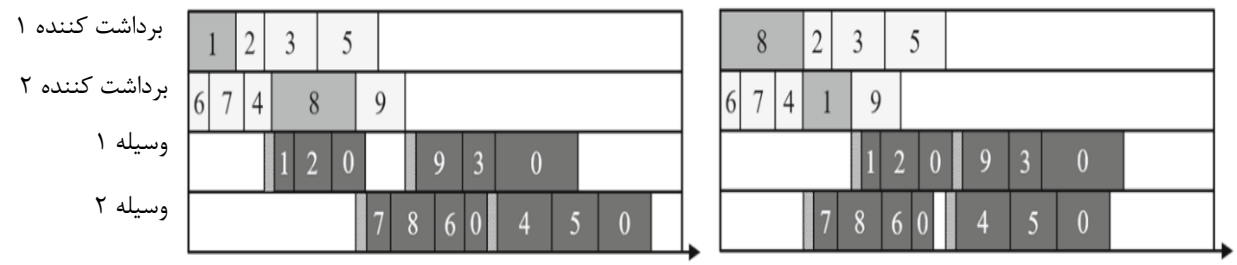
رویکرد اختلالی که در الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده‌ی این بخش درنظر گرفته می‌شود به این‌صورت است که دو توالی از سفارش‌ها از دو برداشت‌کننده‌ی مجزا درصورتی‌که محدودیت ظرفیت مربوط به‌دسته‌های مربوط به آن‌ها نقض نشود با هم جابجا می‌شوند. رویکرد اختلال براساس تغییر در جواب مسأله‌ی برداشت دسته‌ای سفارش‌ها طراحی می‌شود زیرا این نوع تغییر خودبه‌خود باعث تغییر در جواب مسأله‌ی مسیریابی توزیع نیز می‌شود و در مقایسه با تغییر در جواب مسأله‌ی مسیریابی توزیع تغییر بزرگتر و مناسب‌تری است. تعداد سفارش‌هایی که در توالی‌های انتخاب‌شده از سفارش‌ها درنظر گرفته می‌شود به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود و مشخصاً هر چه طول توالی‌ها بیشتر باشد درجه‌ی بزرگتری از تغییر را خواهیم داشت. نحوه‌ی به‌کار بردن رویکرد اختلال را بر روی نمونه‌ای از جواب مسأله نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سه سفارش متوالی که به برداشت‌کننده‌ی اول اختصاص یافته‌اند با دو سفارش متوالی که متعلق به برداشت‌کننده‌ی دوم هستند جابجا می‌شوند؛ بنابراین، زمان اتمام برداشت برای هر ۵ سفارش دستخوش تغییر می‌شود و در نتیجه‌ی آن زمان شروع توزیع کلیه‌ی دسته‌ها نیز تغییر می‌کند. اولین سفر وسیله‌ی نقلیه‌ی اول به تعویق می‌افتد زیرا زمان تکمیل برداشت سفارش ۲ افزایش یافته است؛ اما در نتیجه‌ی آن دسته‌ی (۹،۳) می‌تواند زودتر توزیع شود. با به‌کار بردن رویکرد اختلال، هر دو دسته‌ی متعلق به‌وسیله‌ی نقلیه‌ی دوم این امکان را خواهند داشت که زودتر توزیع شوند. زمان شروع توزیع دسته‌ی (۷،۸،۶) به‌دلیل کاهش زمان اتمام برداشت سفارش ۸ کاهش می‌یابد. دسته‌ی بعدی نیز چون بلافاصله پس از بازگشت وسیله‌ی نقلیه از توزیع دسته‌ی (۷،۸،۶) قابل توزیع است، زودتر می‌تواند توزیع شود.

شرایط پذیرش جواب و توقف الگوریتم: وجود شرایطی برای پذیرش جواب‌های بدتر از جواب فعلی الگوریتم پس از به‌کار بردن رویکردهای بهبود و آشفتگی می‌تواند کمک کند که الگوریتم در دام بهینه‌ی محلی گرفتار نشود. شرایط پذیرش درنظر گرفته شده برای الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده‌ی این بخش به این‌صورت است که اگر در چندین تکرار متوالی تابع هدف بهبود نیابد و تابع هدف جواب به‌دست آمده از تابع هدف بهترین جواب فعلی الگوریتم فاصله‌ی زیادی نداشته باشد، این جواب مورد پذیرش قرار می‌گیرد. به‌طور دقیق‌تر، جواب δ با تابع هدف $f(\delta)$ درصورتی مورد پذیرش قرار می‌گیرد که $f(\delta)$ از $(1+\alpha).f(\delta_{best})$ بزرگتر نباشد. δ_{best} بهترین جواب فعلی الگوریتم است و α درصد مجاز پذیرش جواب است. در شروع الگوریتم، به‌منظور عدم پذیرش جواب‌های بدتر از بهترین جواب فعلی الگوریتم، مقدار α برابر صفر تعیین می‌شود. زمانی که پس از η تکرار متوالی جوابی مورد پذیرش قرار نگیرد مقدار α افزایش می‌یابد تا از گرفتار شدن احتمالی الگوریتم در بهینه‌ی محلی جلوگیری شود. شرایط توقف الگوریتم نیز به این‌صورت است که اگر در تعداد معینی از تکرار الگوریتم، جواب فعلی الگوریتم تغییری نکند الگوریتم متوقف می‌شود.



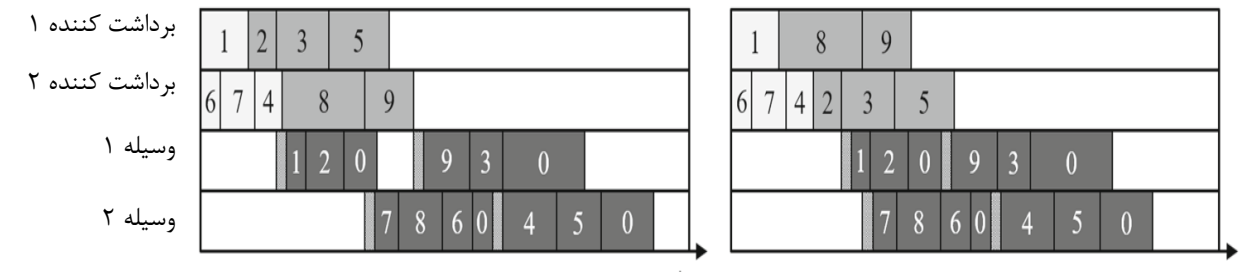
قبل از به‌کاربردن همسایگی **بعد از به‌کاربردن همسایگی**

شکل (۱): مسأله‌ی نمونه قبل و بعد از اعمال همسایگی سوم مسیریابی توزیع سفارش‌ها



قبل از به‌کار بردن همسایگی **بعد از به‌کار بردن همسایگی**

شکل (۲): مسأله‌ی نمونه قبل و بعد از اعمال همسایگی سوم مسیریابی توزیع سفارش‌ها



قبل از ایجاد اختلال **بعد از ایجاد اختلال**

شکل (۳): مسأله‌ی نمونه قبل و بعد از اعمال رویکرد اختلال

۵. روش حل

در این بخش، با استفاده تولید مسائل نمونه و آزمایش‌های عددی عملکرد الگوریتم فراابتکاری ارائه شده برای مدل یکپارچه‌ی برداشت و توزیع سفارش‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌منظور حل دقیق مسائل نمونه از حل‌کننده‌ی دقیق گوربی[1] از سرور بهینه‌سازی نئوس[2] و به‌منظور حل مسائل نمونه با استفاده از الگوریتم ابتکاری از نرم‌افزار متلب نسخه‌ی R2018b استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که هر مسأله‌ی نمونه حداکثر به مدت ۸ ساعت مجاز به حل بر روی سرور بهینه‌سازی نئوس است. درادامه، ابتدا نحوه‌ی تولید مسائل نمونه و سپس نتایج عددی ارائه می‌شود.

۵-۱. نحوه‌ی تولید مسائل نمونه

حل‌کننده‌ی دقیق تنها قادر به حل نمونه‌های بسیار کوچک از مدل یکپارچه در مدت‌زمان ۸ ساعت است که این نمونه‌ها به‌منظور استفاده برای ارزیابی عملکرد الگوریتم فراابتکاری از طریق مقایسه‌ی نتایج الگوریتم و حل دقیق مدل کافی نیستند و تنها می‌توان از چنین مسائل کوچکی برای بررسی درستی و اعتبار مدل ریاضی استفاده کرد؛ بنابراین، در این قسمت ابتدا با درنظر گرفتن مسأله‌ی نمونه‌ای با تعداد ۵ سفارش، ۲ برداشت‌کننده و ۲ وسیله‌ی نقلیه، تابع هدف به‌دست آمده از الگوریتم فراابتکاری و حل دقیق مقایسه می‌شوند و درستی مدل ارائه شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم مسائل نمونه‌ای در ابعاد واقعی از مسأله درنظر گرفته می‌شود و نتایج به‌دست آمده از الگوریتم فراابتکاری با یک حد بالایی که برای مسأله تعریف می‌شود مقایسه می‌شود. برای تولید این مسائل نمونه، سه مقدار مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ به‌عنوان تعداد سفارش‌های مشتریان، سه مقدار مختلف ۲، ۳ و ۵ به‌عنوان تعداد برداشت‌کننده‌ها و چهار مقدار ۴، ۶، ۸ و ۱۰ به‌عنوان تعداد وسایل نقلیه درنظر گرفته می‌شود. سه مسأله‌ی نمونه به‌ازای هریک از ترکیب‌های مقادیر ذکر شده برای تعداد سفارش‌ها، تعداد برداشت‌کننده‌ها و تعداد وسایل نقلیه ساخته می‌شود که در مجموع ۱۰۸ مسأله‌ی نمونه را به‌وجود می‌آورد. برای تولید مسأله‌ی نمونه‌ی کوچک با ۵ سفارش و سایر مسائل نمونه در ابعاد واقعی از پارامترهای عنوان شده در جدول (۴) استفاده می‌شود. پارامترهای تولید مسائل نمونه مطابق با پژوهش [۲۹] درنظر گرفته شده‌اند.

۵-۲. نتایج عددی حل مدل

با درنظر گرفتن مسأله‌ی نمونه‌ای کوچک با ۵ سفارش، ۲ برداشت‌کننده و ۲ وسیله‌ی نقلیه که در بخش قبل مطرح شد، الگوریتم فراابتکاری ارائه شده و حل دقیق به جواب‌های یکسانی با مجموع دیرکردی برابر با ۵۳/۶۳ دقیقه دست یافتند. انطباق جواب‌های به‌دست آمده از حل دقیق و الگوریتم فراابتکاری برای این مسأله‌ی نمونه نشان‌دهنده‌ی درستی و اعتبار مدل ارائه شده است. علاوه‌بر این، به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم با استفاده از مسائل نمونه در ابعاد واقعی، یک حد بالا برای مسأله تعریف می‌شود و این حد بالا برای هریک از مسائل نمونه محاسبه می‌شود. درادامه نحوه‌ی به‌دست آوردن حد بالا و مقایسه‌ی نتایج الگوریتم فراابتکاری با حد بالای به‌دست آمده توضیح داده می‌شود.

نحوه‌ی تعیین حد بالا: به‌منظور به‌دست آوردن حد بالا، این‌طور فرض می‌شود که هریک از سفارش‌ها به‌صورت تکی برداشت و به‌صورت تکی نیز ارسال شوند. با این فرض، به‌دست آوردن حد بالا برای مسأله، معادل حل یک مسأله‌ی فلوشاپ دومرحله‌ای[3] متشکل از چند ماشین در هر مرحله و با هدف کمینه کردن مجموع دیرکرد در تحویل سفارش‌ها خواهد بود. در این مسأله‌ی فلوشاپ، زمان پردازش هر سفارش در مرحله‌ی اول برابر با مجموع زمان راه‌اندازی برداشت سفارش و زمان برداشت تکی سفارش و زمان پردازش هر سفارش در مرحله‌ی دوم برابر با مجموع زمان راه‌اندازی وسیله‌ی نقلیه و زمان ارسال آن سفارش در یک مسیر مجزا از انبار به مکان مشتری مرتبط خواهد بود. به‌منظور حل این مسأله‌ای فلوشاپ دومرحله‌ای از الگوریتم ابتکاری موعدهای تحویل اصلاح‌شده[4] بهره برده می‌شود که برای اولین‌بار توسط براه [۳۱] مطرح شد. در پژوهش‌های پیشین نشان داده شده است که این روش برای حل مسأله‌ی فلوشاپ چندمرحله‌ای بسیار خوب عمل می‌کند [۲۹]. نحوه‌ی عملکرد این الگوریتم به این‌صورت است که به‌منظور تعیین توالی پردازش سفارش‌ها بر روی ماشین‌ها در یک مرحله‌ی پردازش، سفارش‌ها براساس موعد تحویل اصلاح‌شده‌ی آن‌ها مرتب

1. Gurobi
2. NEOS Optimization Server
3. Two Stage Flowshop
4. Modified Due Dates

می‌شوند و سفارشی که کمترین مقدار موعد تحویل اصلاح‌شده را دارد، به یکی از ماشین‌های بی‌کار اختصاص می‌یابد. موعد تحویل اصلاح‌شده‌ی هر سفارش برابر با بیشینه‌ی موعد تحویل آن سفارش و زودترین زمان ممکن برای تکمیل پردازش آن سفارش است.

مقایسه‌ی نتایج الگوریتم فراابتکاری با حد بالا: نتایج حل مسائل نمونه‌ی مدل یکپارچه‌ی دوم با استفاده از الگوریتم فراابتکاری و همچنین حدهای به‌دست آمده برای مسائل نمونه در جدول (۵) آورده شده است. سه ستون اول این جدول پارامترهای مسائل نمونه (تعداد سفارش، تعداد برداشت‌کننده و تعداد وسایل نقلیه) را نشان می‌دهد و ستون‌های بعدی به‌ترتیب متوسط تابع هدف به‌دست آمده توسط الگوریتم (مجموع دیرکرد در تحویل سفارش‌ها)، متوسط حد بالای به‌دست آمده، متوسط بهبود حد بالا توسط الگوریتم و مدت‌زمان اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول (۵) مشاهده می‌شود، در مسائل نمونه با ۵۰ سفارش متوسط بهبود حد بالا توسط الگوریتم حداقل ۲۸ درصد، حداکثر ۵۸ درصد و به‌طور میانگین برابر با ۴۸ درصد است. در مسائل نمونه با ۱۰۰ سفارش نیز حداقل ۱۶ درصد، حداکثر ۵۳ درصد و به‌طور میانگین برابر ۳۹ درصد است. همچنین در مسائل نمونه با ۲۰۰ سفارش، میزان بهبود حد بالا حداقل ۱۸ درصد، حداکثر ۵۲ درصد و به‌صورت میانگین برابر با ۳۶ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با وجود اینکه اندازه‌ی مسائل نمونه چهار برابر می‌شود، اما میزان بهبود حد بالا توسط الگوریتم در بزرگ‌ترین مسائل نمونه نسبت‌به کوچک‌ترین آن‌ها حداکثر به میزان ۲۵ درصد کاهش می‌یابد که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی عملکرد خوب الگوریتم فراابتکاری ارائه شده برای حل مدل یکپارچه‌ی دوم باشد. نمودار شکل (۴)، عملکرد الگوریتم در بهبود حد بالا را برای اندازه‌های مختلف مسائل نمونه با درنظر گرفتن ترکیب‌های مختلف تعداد برداشت‌کننده‌ها و تعداد وسایل نقلیه نشان می‌دهد. نکته‌ای که از نمودار قابل برداشت است این است که پارامترهای تعداد برداشت‌کننده و تعداد وسایل نقلیه تأثیر زیادی بر روی میزان بهبود حد بالا توسط الگوریتم دارند. از نمودار قابل مشاهده است که با افزایش نسبت تعداد برداشت‌کننده‌ها به وسایل نقلیه (از طریق افزایش تعداد برداشت‌کننده‌ها یا کاهش تعداد وسایل نقلیه)، میزان بهبود حد بالا توسط الگوریتم افزایش می‌یابد و با کاهش این نسبت (از طریق کاهش تعداد برداشت‌کننده‌ها یا افزایش تعداد وسایل نقلیه)، میزان بهبود حد بالا توسط الگوریتم کاهش می‌یابد. این رفتار یک عملکرد منطقی و مورد انتظار از الگوریتم است زیرا زمانی که تعداد برداشت‌کننده‌ی بیشتری در دسترس است، زمان‌های توزیع سفارش‌ها اهمیت بیشتری نسبت‌به زمان‌های برداشت سفارش‌ها پیدا می‌کنند و تعیین‌کننده خواهند بود. در این حالت اگر تعداد وسایل نقلیه‌ی کمتری در اختیار باشد، از طریق توزیع سفارش‌ها در مسیرهای مشترک می‌توان به بهبود بیشتری در مقایسه با توزیع تکی سفارش‌ها دست یافت. بالعکس، اگر تعداد برداشت‌کننده‌ی کمتری در دسترس باشد، زمان‌های توزیع سفارش‌ها در مقایسه با زمان‌های برداشت سفارش‌ها تعیین‌کننده نخواهند بود و از طریق توزیع سفارش‌ها در مسیرهای مشترک به میزان بهبود کمتری می‌توان دست یافت. از نمودار شکل (۴) مشخص است که بیشترین میزان بهبود حد بالا توسط الگوریتم (بیش از ۵۰ درصد) مربوط به مسائل نمونه‌ای است که بیشترین تعداد برداشت‌کننده (۵ برداشت‌کننده) و کمترین تعداد وسایل نقلیه (۴ وسیله‌ی نقلیه) را دارند. همچنین کمترین میزان بهبود در حد بالا (کمتر از ۲۰ درصد) در مسائل نمونه‌ای دیده می‌شود که کمترین تعداد برداشت‌کننده (۲ برداشت‌کننده) و بیشترین تعداد وسایل نقلیه (۱۰ وسیله‌ی نقلیه) را دارند.

باتوجه به مقادیر زمان اجرای الگوریتم فراابتکاری در ستون آخر جدول (۵)، متوسط زمان اجرای الگوریتم فراابتکاری برای مسائل نمونه با ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سفارش به‌ترتیب برابر با ۱۴۵ ثانیه، ۳۵۰ ثانیه و ۱۰۸۰ ثانیه است که باتوجه به اندازه‌های مسائل نمونه که نمونه‌های بزرگی به‌حساب می‌آیند و همچنین باتوجه به اینکه حل‌کننده‌ی دقیق در مدت‌زمان ۸ ساعت قادر به رسیدن به جواب موجه برای چنین نمونه‌هایی نیست، زمان‌های قابل قبولی به‌نظر می‌رسند.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

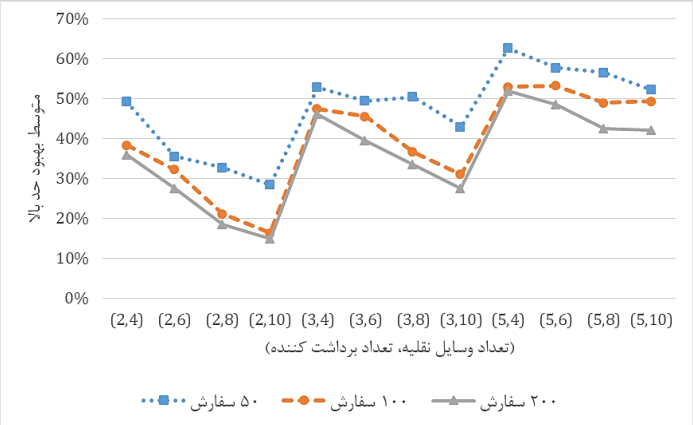
در این پژوهش، عملیات برداشت و توزیع سفارش‌ها در انبار که می‌تواند انبار یک خرده‌فروش آنلاین، انبار یک تأمین‌کننده‌ی قطعات در سیستم تولیدی و غیره باشد مورد بررسی قرار گرفت و باتوجه به نیاز به پاسخگویی سریع‌تر به سفارش‌ها در چنین سیستم‌هایی، مراحل برداشت و توزیع یکپارچه‌ی سفارش‌ها به‌صورت یکپارچه درنظر گرفته شد و یک مدل ریاضی خطی صحیح-مختلط به‌منظور مدل‌سازی این مسأله ارائه شد. مدل ارائه شده از پیچیدگی بالایی برخوردار است و حل‌کننده‌های دقیق تنها قادر به حل نمونه‌های بسیار کوچک از آن در مدت‌زمان معقول هستند که این نمونه‌ها به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم از طریق مقایسه با حل دقیق کافی نیستند. بنابراین، یک الگوریتم فراابتکاری بر پایه‌ی جست‌وجوی محلی تکرارشونده برای حل آن ارائه شد که از دو مرحله‌ی بهبود و اختلال تشکیل می‌شود. مرحله‌ی بهبود الگوریتم خود یک الگوریتم نزول همسایگی متغیر است که از چند همسایگی برای بهبود مسأله‌ی برداشت و چند همسایگی برای بهبود مرحله‌ی توزیع استفاده می‌کند.

جدول (۴): مقادیر پارامترهای مورد استفاده در تولید مسائل نمونه

پارامتر	مقدار پارامتر	پارامتر	مقدار پارامتر
تعداد اقلام در هر سفارش	توزیع یکنواخت در مجموعه‌ی {۲۵، ...، ۶، ۵}	سرعت برداشت اقلام	۶ قلم بر دقیقه
مکان‌های مشتریان و انبار	به‌صورت تصادفی در ناحیه‌ای مستطیل شکل به طول و عرض ۱۰۰ کیلومتر	سرعت حرکت وسیله‌ی نقلیه	۵۰ کیلومتر بر ساعت
مکان انبار	در مرکز ناحیه‌ی مستطیل شکل به طول و عرض ۱۰۰ کیلومتر	ظرفیت دسته‌ی برداشت	۴۵ قلم کالا
سرعت حرکت برداشت‌کننده	۴۸ متر بر دقیقه	ظرفیت وسایل نقلیه	۷۵ قلم کالا

جدول (۵): نتایج حل مدل یکپارچه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری و مقایسه با حد بالا

تعداد سفارش	تعداد برداشت‌کننده	تعداد وسایل نقلیه	متوسط تابع هدف الگوریتم	متوسط حد بالا	متوسط بهبود حد بالا	متوسط زمان الگوریتم (ثانیه)
۵۰	۲	۴	۱۹۵/۴	۳۸۸/۱	٪۴۹/۳	۱۳۱
	۲	۶	۱۴۷/۹	۲۲۹/۵	٪۳۵/۵	۱۴۱
	۲	۸	۱۳۰/۹	۱۹۴/۹	٪۳۲/۸	۱۴۹
	۲	۱۰	۱۱۷/۶	۱۶۴/۲	٪۲۸/۵	۱۵۰
	۳	۴	۱۵۵/۱	۳۳۱/۷	٪۵۲/۸	۱۵۷
	۳	۶	۱۱۹/۵	۲۳۶/۲	٪۴۹/۵	۱۴۳
	۳	۸	۸۵	۱۷۱/۱	٪۵۰/۵	۱۳۶
	۳	۱۰	۷۴	۱۲۹/۸	٪۴۲/۹	۱۳۷
	۵	۴	۱۲۷/۷	۳۴۱/۱	٪۶۲/۶	۱۶۰
	۵	۶	۹۲/۶	۲۲۰/۲	٪۵۷/۷	۱۲۵
	۵	۸	۷۰/۸	۱۶۲/۸	٪۵۶/۵	۱۶۵
	۵	۱۰	۵۶/۵	۱۱۸/۵	٪۵۲/۲	۱۴۳
۱۰۰	۲	۴	۹۰۲/۸	۱۴۶۵	٪۳۸/۳	۳۴۲
	۲	۶	۶۶۹/۹	۹۸۹/۸	٪۳۲/۳	۳۴۵
	۲	۸	۶۴۲/۴	۸۱۴/۴	٪۲۱/۱	۳۸۶
	۲	۱۰	۵۶۹/۵	۶۸۱	٪۱۶/۳	۳۲۴
	۳	۴	۷۵۳/۱	۱۴۳۲/۵	٪۴۷/۴	۳۵۲
	۳	۶	۵۱۰/۵	۹۳۸/۴	٪۴۵/۶	۳۵۴
	۳	۸	۴۵۸/۲	۷۲۳/۳	٪۳۶/۶	۳۳۹
	۳	۱۰	۳۸۸/۵	۵۶۳/۴	٪۳۱	۳۵۴
	۵	۴	۶۷۲/۸	۱۴۳۰/۶	٪۵۲/۹	۳۳۱
	۵	۶	۴۴۱/۶	۹۴۴/۱	٪۵۳/۲	۳۳۲
	۵	۸	۳۴۱/۷	۶۶۹/۳	٪۴۸/۹	۳۷۴
	۵	۱۰	۲۵۵/۶	۵۰۵	٪۴۹/۳	۳۷۱
۲۰۰	۲	۴	۳۷۸۴/۱	۵۹۲۲	٪۳۵/۹	۹۹۳
	۲	۶	۳۰۲۰/۴	۴۱۶۳/۹	٪۲۷/۵	۱۰۱۶
	۲	۸	۲۶۶۸/۱	۳۲۷۲	٪۱۸/۵	۱۰۹۱
	۲	۱۰	۲۴۱۴/۳	۲۸۳۷/۴	٪۱۴/۹	۱۱۸۱
	۳	۴	۳۱۰۹/۲	۵۷۷۴/۳	٪۴۶/۱	۹۷۰
	۳	۶	۲۳۸۷/۱	۳۹۴۱/۳	٪۳۹/۴	۱۲۴۰
	۳	۸	۲۰۶۱/۵	۳۰۹۶/۵	٪۳۳/۴	۱۱۳۸
	۳	۱۰	۱۸۰۸/۹	۲۴۹۴/۱	٪۲۷/۴	۱۰۳۴
	۵	۴	۲۷۴۳/۴	۵۷۰۶/۴	٪۵۲/۰	۱۰۷۶
	۵	۶	۲۰۴۹	۳۹۷۱/۹	٪۴۸/۴	۱۱۳۹
	۵	۸	۱۶۵۹/۲	۲۸۸۳/۹	٪۴۲/۵	۱۰۱۵
	۵	۱۰	۱۳۴۰/۷	۲۳۱۸/۱	٪۴۲/۱	۱۰۶۷



شکل (۳): مقایسه‌ی میزان بهبود حد بالا توسط الگوریتم برای مسائل نمونه‌ی مختلف

برای ارزیابی الگوریتم فراابتکاری حل مدل یکپارچه، مسائل نمونه‌ی ساختگی ایجاد شد. باتوجه به اینکه حل‌کننده‌ی دقیق قادر نیست در مدت‌زمان معقول برای حتی نمونه‌های کوچک از مسأله به جواب بهینه دست یابد، یک حد بالا تعریف شد و نتایج حاصل از الگوریتم با حد بالا مقایسه شد. از طریق مقایسات انجام شده مشخص شد که علی‌رغم افزایش قابل توجه اندازه‌ی مسائل نمونه، کیفیت جواب‌های به‌دست آمده توسط الگوریتم فراابتکاری در مقایسه با حد بالا افت کمی پیدا می‌کند، اما همچنان از کیفیت مطلوبی برخوردار است.

مسأله‌ی برداشت و توزیع یکپارچه‌ی سفارش‌ها که در این پژوهش درنظر گرفته شد یک مسأله‌ی آفلاین است. به این معنی که قبل از تصمیم‌گیری به‌منظور برداشت و توزیع سفارش‌ها، کلیه‌ی اطلاعات مربوط به سفارش‌ها مانند تعداد اقلام در هر سفارش، موعد تحویل سفارش و مکان مشتری مرتبط مشخص است؛ اما در واقعیت سفارش‌ها به‌صورت پویا در طی زمان در دسترس قرار می‌گیرند و اطلاعات مربوط به آن‌ها مشخص می‌شود که یعنی با یک مسأله‌ی آنلاین روبه‌رو هستیم. درنظر گرفتن مدل ارائه شده در این مقاله در حالت آنلاین و ارائه‌ی یک الگوریتم آنلاین مناسب برای حل آن می‌تواند یک زمینه‌ی مستعد برای انجام تحقیقات آتی باشد. علاوه‌بر مورد مطرح‌شده در بالا، ارائه‌ی یک الگوریتم ابتکاری که به‌طور خاص برای حل مسأله‌ی تولید و توزیع یکپارچه‌ی سفارش‌ها طراحی‌شده باشد و بتواند در مدت‌زمان کمی جواب‌های خوبی برای مسأله به‌دست آورد نیز یکی دیگر از زمینه‌های تحقیق به‌شمار می‌رود. درنهایت، درنظرگرفتن مدل ارائه شده در این تحقیق همراه با تغییرات لازم برای حالت آفلاین و سطح یادگیری برداشت‌کننده نیز می‌تواند حوزه تحقیقاتی مناسب دیگری باشد.

مراجع

[1] Henn, S., Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse (2012). Computers & Operations Research. 39(11): p. 2549-2563.

[2] Chew, E.P. and L.C. Tang, Travel time analysis for general item location assignment in a rectangular warehouse (1999). European Journal of Operational Research. 112(3): p. 582-597.

[3] De Koster, R., T. Le-Duc, and K.J. Roodbergen, Design and control of warehouse order picking: A literature review (2007). European journal of operational research. 182(2): p. 481-501.

[4] De Koster, M.B.M., E.S. Van der Poort, and M. Wolfers, Efficient orderbatching methods in warehouses (1999). International Journal of Production Research. 37(7): p. 1479-1504.

[5] Kuhn, H., D. Schubert, and A. Holzapfel, Integrated Order Batching and Vehicle Routing Operations in Grocery Retail–A General Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm. European Journal of Operational Research, 2020.

[6] Moons, S., et al., The value of integrating order picking and vehicle routing decisions in a B2C e-commerce environment (2019). International Journal of Production Research. 57(20): p. 6405-6423.

[7] Bozer, Y.A. and J.W. Kile, Order batching in walk-and-pick order picking systems (2008). International Journal of Production Research. 46(7): p. 1887-1909.

[8] Ruben, R.A. and J.F. Robert, Batch construction heuristics and storage assignment strategies for walk/ride and pick systems (1999). Management Science. 45(4): p. 575-596.

[9] Tang, L., et al., A combination of Lagrangian relaxation and column generation for order batching in steelmaking and continuous-casting production (2011). Naval Research Logistics (NRL). 58(4): p. 370-388.

[10] Muter, İ. and T. Öncan, An exact solution approach for the order batching problem (2015). IIE Transactions. 47(7): p. 728-738.

[11] Valle, C.A., J.E. Beasley, and A.S. da Cunha, Optimally solving the joint order batching and picker routing problem (2017). European Journal of Operational Research. 262(3): p. 817-834.

[12] Clarke, G. and J.W. Wright, Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points (1964). Operations research. 12(4): p. 568-581.

[13] Tsai, C.Y., J. Liou, J H, and T.M. Huang, Using a multiple-GA method to solve the batch picking problem: considering travel distance and order due time (2008). International Journal of Production Research. 46(22): p. 6533-6555.

[14] Chirici, L. and K.-S. Wang, Tackling the storage problem through genetic algorithms (2014). Advances in Manufacturing. 2(3): p. 203-211.

[15] Zhang, J., X. Wang, and K. Huang, Integrated on-line scheduling of order batching and delivery under B2C e-commerce (2016). Computers & Industrial Engineering. 94: p. 280-289.

[16] Koch, S. and G. Wäscher, A grouping genetic algorithm for the Order Batching Problem in distribution warehouses (2016). Journal of Business Economics. 86(1-2): p. 131-153.

[17] Menéndez, B., et al., Variable Neighborhood Search strategies for the Order Batching Problem (2016). Computers & Operations Research.

[18] Žulj, I., S. Kramer, and M. Schneider, A hybrid of adaptive large neighborhood search and tabu search for the order-batching problem (2018). European Journal of Operational Research. 264(2): p. 653-664.

[19] Cergibozan, Ç. and A.S. Tasan, Genetic algorithm based approaches to solve the order batching problem and a case study in a distribution center (2020). Journal of Intelligent Manufacturing: p. 1-13.

[20] Henn, S., Order batching and sequencing for the minimization of the total tardiness in picker-to-part warehouses (2015). Flexible Services and Manufacturing Journal. 27(1): p.۱۱۴-۸۶ .

[21] Scholz, A., D. Schubert, and G. Wäscher, Order picking with multiple pickers and due dates–Simultaneous solution of Order Batching, Batch Assignment and Sequencing, and Picker Routing Problems (2017). European Journal of Operational Research (۲)۲۶۳ p. 461-478.

[22] Van Gils, T., et al., Increasing order picking efficiency by integrating storage, batching, zone picking, and routing

policy decisions (2018). International Journal of Production Economics. 197: p. 243-261.

[23] Ardjmand, E., O.S. Bajgiran, and E. Youssef, Using list-based simulated annealing and genetic algorithm for order batching and picker routing in put wall based picking systems (2019). Applied Soft Computing. 75: p. 106-119.

[24] Cano, J.A., A.A. Correa-Espinal, and R.A. Gómez-Montoya, Mathematical programming modeling for joint order batching, sequencing and picker routing problems in manual order picking systems (2020). Journal of King Saud University-Engineering Sciences. 32(3): p. 219-228.

[25] Pferschy, U. and J. Schauer, Order batching and routing in a non-standard warehouse (2018). Electronic Notes in Discrete Mathematics. 69: p. 125-132.

[26] Kübler, P., C.H. Glock, and T. Bauernhansl, A new iterative method for solving the joint dynamic storage location assignment, order batching and picker routing problem in manual picker-to-parts warehouses (2020). Computers & Industrial Engineering. 147: p. 106645.

[۲۷] خدابنده, م., س.ر. حجازی, و م. راستی-برزکی, یک الگوریتم ژنتیک برای مسأله زمانبندی یکپارچه تولید و توزیع با درنظر گرفتن مسیریابی در زنجیره تامین. نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید, ۲۰۱۳. ۱(۲): p. 167-181.

[28] Zhang, J., et al., On-line order batching and sequencing problem with multiple pickers: A hybrid rule-based algorithm (2017). Applied Mathematical Modelling:۴۵ . 271-284.

[29] Schubert, D., A. Scholz, and G. Wäscher, Integrated order picking and vehicle routing with due dates (2018). OR Spectrum. 40(4): p. 1109-1139.

[30] Baker, K.R. and J. Bertrand, An investigation of due-date assignment rules with constrained tightness (1981). Journal of Operations Management. 1(3): p. 109-120.

[31] Brah, S.A., A comparative analysis of due date based job sequencing rules in a flow shop with multiple processors (1996). Production Planning & Control. 7(4): p. 362-373.

[32] ZhangJ. et al. The online integrated order picking and delivery considering pickers' learning effects for an O2O community supermarket, Transp. Res. E (2019)

[33] Van GilsT. et al. Formulating and solving the integrated batching, routing, and pickeer scheduling problem in a real-life spare parts warehouse European J. Oper. Res. (2019)

[34] BriantO. et al. An efficient and general approach for the joint order batching and picker routing problem European J. Oper. Res. (2020)

[35] CanoJ.A. et al. Mathematical programming modeling for joint order batching, sequencing and picker routing problems in manual order picking systems J. King Saud Univ., Eng. Sci.(2020)

[۳۶] شفائی،ا.، اکبری جوکار،م. ر.، رفیعی، م. (۱۴۰۰). بررسی اثرات استفاده از مدل VRP بر کاهش هزینه‌های توزیع قطعات یدکی بین خودروهای امدادی. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید, ۱۴۰۰. ۱۸(۱): صفحه ۱۲۵-۱۱۱.

[۳۷] جعفرخان، ف. و س. یعقوبی، (۱۳۹۵). ارائه مدل ریاضی استوار و الگوریتم حل ابتکاری برای مسأله یکپارچه تولید-مسیریابی-موجودی محصولات فاسد شدنی با انتقال جانبی. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، جلد ۴، شماره ۲، صفحه ۱۹۵-۲۱۱.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2022, Volume 10., No. 20., pp. 153-169
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2023.21652.1970

Mathematical Modeling of Integrated Order Batching and Distribution Scheduling in a Warehouse with Multiple Pickers Using Batch Picking

M. Alipour[1], Y. Zare Mehrjerdi[2*], A. Mostafaeipour[3]

[1.] Ph.D. Student, industrial engineering, Department of Industrial Engineering, Technical and Industrial Campus, Yazd University, Yazd, Iran
[2.] Professor, Department of Industrial Engineering, Technical and Industrial Campus, Yazd University, Yazd, Iran
[3.] Associate Professor of Industrial Engineering Department, Technical and Industrial Campus, Yazd University, Yazd, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received: 2020/05/18
Accepted: 2022/03/11

***Keywords*:**

Order Batching
Batch Picking
Vehicle Routing
Iterated Local Search

ABSTRACT

The orders received from customers in retail companies must be picked in the warehouse before delivery to customers. Order picking is the most costly and time-consuming process in a warehouse and customer orders are usually batched and picked in common tours to reduce travel distance and picking time. On the other hand, the widespread use of the internet and e-commerce has significantly increased the number and decreased the size of orders issued by customers and as a result, the order batching and picking operations in the warehouse has become more complicated. Besides, adopting appropriate policies to distribute orders among customers by taking into account issues such as the time and cost of distributing orders and due dates, is of great importance. Moreover, considering the operations of order picking and distribution in an integrated manner can significantly reduce costs and increase the level of service provided to customers.

In this research, the order batching and distribution operations are considered integratedly and a mathematical model is proposed to address the integrated problem by considering minimization of total tardiness as objective function. respectively. For model validation purposes, an iterated local search metaheuristic approach is proposed to solve the proposed model. By using the generated data, it has been shown that the metaheuristic algorithm is able to obtain quality solutions for the problem.

Due to the fact that an optimization solver is unable to optimize a small size problem in a realistic time, an upper bound was defined for the purpose of comparing the algorithm results with that. Our comparison of results indicates that for relatively larger sized sample problem the quality of obtained solutions by meta-heurietsic algorithm, in comparion with upper bound, having suitable quality as expected.

[*] Corresponding author. Y. Zare Mehrjerdi
Tel.:035-31232424; E-mail address: yzare@yazd.ac.ir