دسترسی در سایتِ http://jnrm.srbiau.ac.ir
سال هفتم، شماره سی و سوم، آذر و دی ۱۴۰۰
شماره شاپا: ۲۵۸۸-۵۸۸X

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات
پژوهش‌های نوین در ریاضی

مدل‌سازی ریاضی دوهدفه برای شبکه حمل‌ونقل سبز جهت ارسال محصول به آخرین مشتری با تأکید بر نقش صندوق‌های قفل‌دار خودکار

امیرحسین زاهدی انارکی[۱]، رضا توکلی مقدم[۲*]، رامین صادقیان[۳]

[۱و۳] گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
[۲] گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴

چکیده

توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» و ارائه ساختاری مفهومی-ریاضی جهت ایجاد ارتباط و هم‌افزایی بین مفاهیم تئوری این حوزه با مسائل بهینه سازی کلاسیک لجستیک شهری است. این مسئله یک شبکه دو سطحی مکان‌یابی‌مسیریابی متشکل از یک انبار شهری (یا توزیع‌کننده)، مشتریان و مکان‌های بالقوه جهت استقرار دو نوع تسهیل (صندوق قفل‌دار خودکار و میکرو توزیع‌کننده) است و مشتریان قادرند محصول خود را پس از سفارش بر اساس مطلوبیت خود در درب منزل و یا از صندوق‌های قفل‌دار خودکار بصورت ۲۴ ساعته با کسب تخفیف دریافت نمایند.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی‌مسیریابی دوسطحی سبز، ارسال محصول به آخرین مشتری، صندوق قفل‌دار خودکار، الگوریتم تجزیه بندرز، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر.

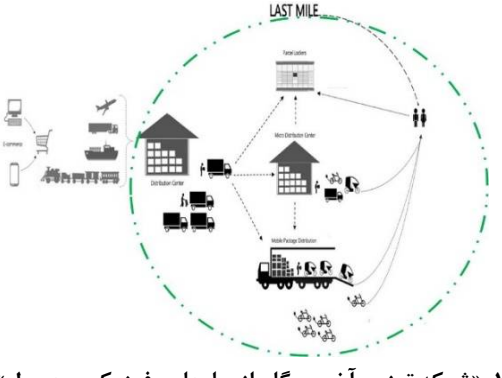
* عهده‌دار مکاتبات: Email: tavakoli@ut.ac.ir

۱- مقدمه

سطوح مختلفی از فرآیند جابجایی کالا در طول سالیان اخیر دستخوش تغییرات و بهبودهایی قرار گرفته است که منجر به کم هزینه‌تر و کارآمدتر اداره شدن آن شده است (برای مثال جابجایی محصول از طریق شبکه حمل و نقل ریلی باری به یک ایستگاه معین و یا کشتی باربری به بندرگاه‌ها). با این وجود آخرین سطح در فرآیند حمل‌ونقل، رساندن محصولات به آستانه درب منزل مصرف کننده است که اغلب داری پایین‌ترین کارآیی اما پرهزینه‌ترین و آلوده‌کننده‌ترین بخش از فرآیند را به همراه دارد، که در برگیرنده ٪ ۲۸ از کل هزینه جابجایی‌هاست [۱]. یافتن راهکارهایی برای بهبود این مهّم که معمولاً از فناوری‌های پیشرفته روز از قبیل اینترنت، اینترنت اشیا، و وسائل نقلیه دوست دار محیط زیست بهره می‌جوید با عنوان مسئله «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول»[2] یاد می‌شود (شکل ۱).

معضلاتی از قبیل افزایش قیمت‌نهایی محصول به دلیل تعداد توقّف‌های زیاد با تعداد کمتر از محموله تحویلی در مقایسه با حمل‌ونقل بین تسهیلات؛ مسئله در خانه نبودن که از آن به سندروم در خانه نبودن یاد شده که از نگرانی‌های رایج در میان شهروندان پرمشغله‌ی‌کلان‌شهرها می‌باشد؛ عدم وضع قوانین خاص وتخصّصی از جانب شهرداری‌ها برای وسائل نقلیه مربوطه در رعایت حقوق شهروندی و خودداری از توقّف مزاحم در مکان‌های ممنوعه از جمله پارکینگ‌های عمومی، ایستگاه‌های وسائل نقلیه عمومی؛ و ایجاد گسترش آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی شده و متعاقباً ناخشنودی اجتماعی، مسئله «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» را به پرهزینه و غیر موثرترین بخش از زنجیره تامین تبدیل ساخته است و مضافاً با اضافه نمودن شرایطی از قبیل نبود مناطق مناسب جهت تخلیه و بارگیری؛ امنیت عابر[3]؛ محدودیت زمان تحویل؛ مناطق طرح ترافیک[4]؛ و محدودیت سرعت و ترافیک بالا بر پیچیدگی‌های این حوزه افزوده می‌افزاید [۲].

این در حالی‌است که حوزه حمل‌ونقل کالا یکی از منابع اصلی استخدام اقشار ضعیف و متوسط در شهرها بوده و همچنین از توسعه اقتصادی کلان شهرها حمایت می‌نماید و در نتیجه اعمال قوانین سخت‌گیرانه بر این حوزه توسط سیاست‌گذاران و قانون‌گذاران شهری می‌تواند تاثیری منفی بر شکوفایی اقتصادی کلان‌شهرها داشته باشد [۳].



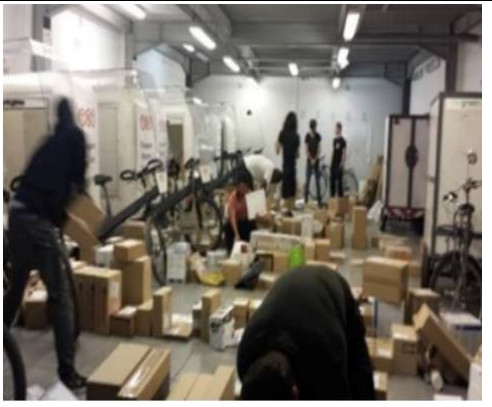
شکل ۱. «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول»

[2] Last Mile
[3] Pedestrian Safety
[4] Low Emission Zones

بهره‌گیری از صندوق‌های قفل‌دار خودپرداز[5] و مراکز میکروتوزیع (میکروادغام)[6] از رویکردهایی است بطورگسترده و معناداری برای کارآمدتر ساختن «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» در کشورهای توسعه یافته از جمله آمریکا، انگلستان، کانادا و اعضای اتحادیه اروپا در حال گسترش است. قانون‌گذاران شهری می‌توانند با ترغیب کردن شرکت‌های خصوصی حوزه حمل محصولات—در غالب تخفیف مالیاتی براین تسهیلات- شرایط تحقق «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» را فراهم آورند. صندوق‌های قفل-دار خودپرداز یکی از نوآوری‌های موفق و بدون متولی «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» می‌باشد که برخلاف رویکرد مراکز رایج برداشت محصول، اجازه ۲۴ ساعته برداشت و تحویل راحت و امن را به مشتریان می‌دهد و باعث کاهش آلودگی و ترافیکی که از تحویل درب منزل ایجاد شده می‌شود (شکل ۲). در این حالت مشتریان با انتخاب گزینه «برداشت از صندوق‌های قفل‌دار» در هنگام خرید، می‌توانند محصول خود را در بازه زمانی مناسب و دلخواه‌شان به‌صورت شبانه‌روزی در حالی‌که از تخفیف خرید هم منتفع می‌شوند، دریافت نمایند. هنگامی که محصول در قفسه‌های قفل‌دار قرار داده می‌شود یک پیام به تلفن همراه و یا ایمیل مشتری که حاوی شماره کمد و رمز صندوق است برای مشتری ارسال می‌گردد [۴]. قفسه‌های قفل‌دار بهترین گزینه برای کالاهای غیر خوراکی و انجمادی بوده و بهترین مکان برای استقرار آن‌ها جاهای پرتردّد و پر عبور و مرور از جمله مراکز خرید، فروشگاه‌های رفاهی (با ساعت کار بالا مثلا پمپ‌بنزین‌ها) می‌باشد. مراکز میکرو-توزیع (میکرو ادغام) دیگر رویکرد موفق در این حوزه در این زمینه، یک سیستم دوسطحی[7] است که به‌وسیله آن بسته‌ها از مراکز توزیع شهری به مراکز میکرو توزیع که در مراکز شهر-ترجیحاً در ابتدای مناطق پرتردد و پر ازدحام- واقع شده‌اند تحویل داده می‌شود و سپس از طریق وسائل نقلیه بدون یا کم آلایندگی (ون‌های الکتریکی و دوچرخه‌های باربر کارگو) به مقاصد نهایی اعزام می‌گردد (شکل ۳).

شکل ۲. نمایی از یک صندوق قفل‌دار خودپرداز

[5] Parcel Locker
[6] Micro-distributor
[7] Two-Echelon



شکل ۳. نمایی از یک میکرو توزیع کننده

از ویژگی‌های این رویکرد در قیاس با مراکز توزیع و ادغام رایج و موجود در مطالعات، انعطاف‌پذیری در بکارگیری مکان‌هایی بدون استفاده، زیرزمین برج‌های مسکونی، هتل‌ها و نهادهای داری شرایط بوده که می‌تواند موجب کاهش سرمایه‌گذاری‌ها و امکان پیاده‌سازی ساده‌تر آن در کلان شهرها با مستغلات گران‌قیمت شود. از دیگر مزایای قابل توجه آن، اقشار متوسط و ضعیف جامعه که دارای سرمایه کم بوده می‌توانند با اشتراک‌گذاری زمان و فضاهای فیزیکی خود کسب درآمد نمایند. [۳-۵]

۲- پیشینه تحقیق

با توجه به نقش برجسته انبارهای میانی در پیاده سازی «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول»، مجموعه مسائل مسیریابی دوسطحی کلاسیک شامل: مسیریابی ناوگان حمل‌ونقل[8] [۵-۷]، مسیریابی-مکان‌یابی[9]، مسیریابی-موجودی[10] و مسیریابی-تولید[11] [۸] بستر مناسبی برای پیاده سازی مفاهیم این حوزه باشد. در این خصوص، برووینگ و همکاران [۹] با پیشنهاد یک مسئله بهینه‌سازی مسیریابی دوسطحی در بر دارنده همزمان مسیریابی ناوگان و مکان‌یابی، در تلاش برای یافتن مکان بهینه تسهیلات و برنامه بهینه سفرها به‌منظور تحویل محصولات از طریق تسهیلات میانی است. برای حل این مسئله از یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جستجوی محلی شمارنده استفاده شده‌است. زو و همکاران [۱۰] یک مسئله لجستیکی برآمده از حوزه «توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصولات تجارت الکترونیکی» است. مسئله شامل دوسطح از مسئله مسیریابی است. یک ویژگی این مدل این است که مشتریان ممکن است گزینه‌های متفاوت تحویل‌دهی را درخواست نمایند که به آن اجازه می‌دهد که محصولات‌شان را در انبارهای میانی دریافت نمایند. هدف مقاله حداقل‌سازی هزینه‌های توزیع می‌باشد. یک الگوریتم ژنتیک چندجمعیتی برای حل مسئله بکار گرفته شده است. اندرلوه و همکاران [۱۱] یک طرح کلی توزیع دوسطحی شهری با هماهنگی زمانی و مکانی بین کامیون‌های کوچک و دوچرخه‌های کارگو معرفی نمودند. نتایج حاصل شده از فرآیند جستجوی تطبیقی تصادفی حریصانه بر روی داده‌های واقعی می‌باشد.

چائو و همکاران [۱۲] یک مسئله مسیریابی دوسطحی موجودی با پنجره‌های‌زمانی برای

[8] Vehicle Routing Problem (VRP)
[9] Location-Routing Problem (LRP)
[10] Inventory-Routing Problem (IRP)
[11] Production-Routing Problem (PRP)

محصولات فاسدشدنی ارائه نمودند. سطح اول مربوط به مسئله موجود مسیریابی و مکان‌یابی است و سطح دوم مسئله حمل‌ونقل با ظرفیت محدود ناوگان است. مسئله به‌صورت عدد صحیح مختلط مدل شده است. یک الگوریتم ابتکاری مختلط که در آن رویکرد خوشه‌بندی، عملگر جهش و روش معاوضه موقعیت برای بهبود الگوریتم بر روی داده های واقعی یک مطالعه کاربردی ارائه شده‌است. دراگومیر و همکاران [۱۳] نوعی جدیدی از مسئله لجستیک را با تمرکز اصلی بر تحویل بر تحویل و برداشت در مناطق چندگانه مجزاءی جغرافیایی است. اسچیندر و همکاران [۱۴] یک مسئله مسیریابی ناوگان الکتریکی با پنجره زمانی و مراکز تعویض باتری به همراه محدودیت‌های ظرفیت ناوگان و پنجره زمانی مشتریان که از محورهای مهم در دنیای واقعی می‌باشد را ارائه نمودند. یک الگوریتم همسایگی متغییر و الگوریتم جستجوی ممنوعه برای حل مسئله پیشنهاد شده است.

در مطالعه جی و همکاران[۱۵]یک مسئله مسیریابی ناوگان برقی با ظرفیت محدود با جایگاه‌های تعویض باتری ارائه شده است. این مقاله سیاست‌های تحویل تحت محدودیت‌های دامنه رانندگی تحت باتری ناوگان را تعیین نماید. ناوگان برقی که در سطوح مختلف اجرا می‌گرد که دارای ظرفیت بارگیری متفاوت، دامنه جوابگویی باتری برای رانندگی، نرخ مصرف انرژی، هزینه تعویض باتری می‌باشد. یک مدل عدد صحیح مختلط و یک الگوریتم مختلط از جستجوی محلی با شعاع متغییر و تولید ستون مطرح شده است.

سویاسال و همکاران [۱۶] یک مدل عدد صحیح مختلط جامع برای مسئله دوسطحی وابسته به زمان و ظرفیت محدود که نوع وسائل نقلیه، فواصل سفر، سرعت ناوگان، بارگیری، مناطق چندگانه زمانی و آلودگی را لحاظ می‌نماید. مدل بر روی یک مجموعه سوپر مارکت در هلند راستی آزمایی شده است. در مقاله پیچکا و همکاران [۱۷] مجموعه‌ای از کمترین هزینه مسیریابی ناوگان که در سطح اول به انبار مرکزی و در سطح دوم به انبارهای میانی به دلیل حضور شرکت‌های لجستیکی طرف سوم بر نمی‌گردند یافته می‌شود و یک برنامه‌ریزی عدد صحیح جریان محور و الگوریتم ابتکاری ترکیبی برای این مسئله ارائه شده است.

یکی از مباحث نوین و مورد توجه در پیاده‌سازی «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول»، مسئله دریافت محصول در خارج از منزل است که در رویکرد سنتی‌تر مشتریان محصولات خود را از انبارهای میانی و مراکز برداشت در ساعات اداری و یا در رویکرد جدیدتر از صندوق‌های قفل‌دار خود پرداز بصورت ۲۴ ساعته دریافت نمایند. در این خصوص سان و همکاران [۱۸] یک خانواده از مسائل تحویل محصول از مراکز برداشت توسط مشتری و تحویل در درب منازل وابسته به زمان و داری پنجره زمانی را برای بهینه‌سازی سرویس‌ها در یک بستر مسیریابی دوسطحی ناوگان نقلیه ارائه نموده‌اند. شرکت‌های حمل‌ونقل تحت دو بعد از انعطاف عملیاتی مورد بررسی قرار می‌گیرند. از یک سو شرکت‌ها می‌توانند تقاضاهایی را که قادر به پاسخگویی هستند را با هدف بیشنه‌سازی سود انتخاب نمایند و یا از سوی دیگر از مزایای دوره‌های ترافیک روان بوسیله تکلیف نمودن برنامه به رانندگان در آغاز سفر بهره جویند. از یک روش دقیق به نام شاخه و قیمت برای حل این مدل استفاده شده است. مطالعه دستچ و گلانی [۱۹] بر کاربرد صندوق‌های قفل‌دار (یا جعبه‌های پذیرش اشتراکی[۱۲]) به‌عنوان راهکاری برای مسئله «توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» تمرکز نمودند. توجه به توپوگرافی منطقه و علاقه مشتریان

[12] Shared Reception Box

به دریافت محصول و همچنین تعیین تعداد و مکان استقرار آن‌هادر راستای بیشینه‌سازی مجموع سود حاصله صورت می‌پذیرد. بر خلاف اکثریت مقالات مربوط به مسائل «توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» که فرض می‌کنند که همه تقاضاها ارضاء می‌گردد - در نتیجه سود کلی همواره ثابت است و تنها هزینه‌های شبکه منظور می‌گردد - این کار جزء آن دسته از مطالعات است که امکان وجود مشتریان از دست رفته وجود دارد و سود و هزینه‌های شبکه به‌صورت توأم در نظر گرفته شده است [۲۰]. در این مطالعه مسئله حمل‌ونقل، مسیریابی؛ گزینه انتخاب تحویل در درب منزل توسط مشتری منظور نشده است.

مطالعاتی قابل ملاحظه‌ای بر روی مسائل زنجیره تامین و شبکه های توزیع تاکنون صورت پذیرفته است. با این وجود مطالعاتی که بر اجزای اساسی «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» تمرکز نموده باشد مناسب نمی‌باشد. اندرلوه و همکاران [۱۱] بر توزیع سبز تحویلدهی محصولات به مشتریان بر پایه یک مطالعه موردی برای شهر ویانای استرالیا توسط یک همگام‌سازی بین عملیات کامیون‌های باربری در سطح اول وعملیات دوچرخه‌ها متمرکز می‌نمایند. در مطالعه تاریکو و همکاران [۲۱]، تبادل بین حداقل سازی هزینه شبکه و کمینه سازی گاز مونوکسید کربن در زمینه مسیریابی-مکانیابی در نظر گرفته شده است در حالی‌که عملیات روزانه لجستیکی را برای انواع مختلف از ناوگان و مسیرهای حاصله تعیین می‌نماید. مطالعه موردی در شهر وایانا استرالیا برای صحّه گذاری نتایج بکار گرفته شده است. استرلهر و همکاران [۲۲] مسیرهای کارآمد با انرژی کمینه، برای ناوگان دوگانه و یا برقی تعیین شده است از آنجاکه که شارژ دوباره ناوگان برقی به مراتب زمان بیشتری از ناوگان عادی می‌برد. آنان اطلاعاتی دیگر درباره شبکه جاده، حالت شارژ باتری را بمنظور محاسبه بهترین تبادل بین محدوده و سرعت در یافتن مسیر منظور نمودند. دوکانی و همکاران [۲۳] یک شبکه مسیریابی- مکانیابی که ترکیبی از مسیریابی موقعیت و تولید است را ارائه نمودند. مسئله شامل ۱- مکان‌یابی انبارهای میانی بر روی نقاط گسسته است که تقاضای مشتریان از آنجا اعزام می‌گرد؛ ۲- برنامه زمانی برای هر وسیله نقلیه؛ و ۳- تعیین سرعت ناوگان بر روی هر مسیر بمنظور رعایت پنجره زمانی است. هدف این مسئله کمینه سازی هزینه‌های شبکه به همراه هزینه گسترش گازهای آلاینده می‌باشد.

استفاده از فضای‌هایی با مالکیت عمومی و شهروندی و نه لزوماً صنعتی و تجاری را می‌توان وجه تمایز مراکز میکروتوزیع و یا ادغام که در قبل تشریح گردید، با مراکز توزیع و ادغام رایج در ادبیات موضوع دانست و مطالعاتی که بر ویژگی‌های مراکز میکرو متمرکز باشند بسیار محدود است. در این راستا، بشیری و همکاران [۲۵] انبار سیار در مفهوم «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول»، یک کانتینر و یدک است که توسط یک یدک‌کش بر اساس تقاضای مشتریان بالفعل و داده‌های تاریخی در دسترس در مورد تقاضای مشتریان بالقوه می‌تواند با حضور موقتی در محیط مکان‌های مناسب و از پیش تعیین‌شده در نقش یک میکرو توزیع کننده ظاهر گردد. این کانتیر دارای سکوی تخلیه بار، دفتر و وسائل نقلیه با آلایندگی کم از جمله دوچرخه کارگو و ماشین‌های الکتریکی می‌باشد. با مشاهده جدول ۱، شکاف‌های زیردر ادبیات موضوع مشهود می‌باشد:

الف) عدم وجود مدل ریاضی یکپارچه مسیریابی- مکان‌یابی دوسطحی با لحاظ‌سازی دو عنصر اصلی «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی محصول به مشتری»: میکرو-توزیع کننده‌ها و صندوق‌های قفل‌دارخودکار.

جدول ۱. جدول مقایسه‌ای ادبیات موضوع و شکاف تحقیقاتی مرتبط با «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول»

ردیف	مشخصات مقاله	رویکرد سبز	نوع تحویل‌دهی				کنترل مشتریان از دست رفته	تخفیف به مشتریان	ارائه مدل ریاضی	مسیریابی دوسطحی		چند هدفه	رویکرد حل
			توسط مشتری		درب منزل								
			از صندوق قفل‌دار	از انبار میانی	میکرو توزیع کننده	از انبار میانی				ناوگان	مسیریابی		
۱	[۷-۱۰]					*			*		*		
۲	[۱۱]			*		*				*			
۳	[۱۲], [۱۳]			*		*			*	*	*		
۴	[۱۴], [۱۵]			*		*			*	*			
۵	[۱۶], [۱۷]	*				*			*	*			
۶	[۱۸]		*				*	*	*				
۷	[۱۹]					*	*						
۸	[۲۰]	*		*		*			*				
۹	[۲۱]					*			*				
۱۰	[۲۲], [۲۳]	*		*		*							
۱۱	[۲۴], [۲۵]		*			*							
۱۲	**این مطالعه**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

ب) عدم مشاهده نقش تخفیف در قیمت محصولاتی که توسط جعبه های قفل‌دار ارائه می‌شوند در یک «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی محصول به مشتری» و نقش آن در کاهش تردّدهای ناوگان نقلیه.

پ) عدم مشاهده مسئله‌ای با دو هدف متضاد الف) گازهای آلاینده تولید شده توسط ناوگان نقلیه شبکه و ب) هزینه «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» با حضور میکرو-توزیع کننده‌ها و صندوق‌های قفل‌دارد.

ت) استقبال بیشتر در بین نویسندگان در بکارگیری از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری در ادبیات موضوع برای حل مسائل مرتبط و مشاهده مطالعات بسیار محدود در استفاده از رویکردهای حل دقیق بویژه رویکردهای تلفیقی با فراابتکاری.

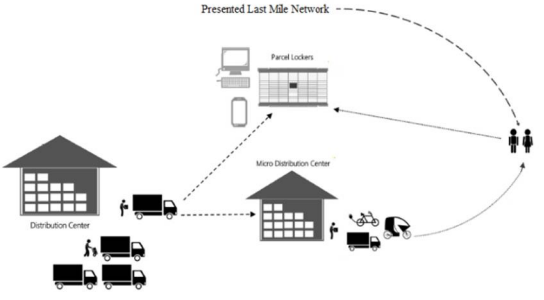
در ادامه این مقاله، بخش سوم به تعریف مسئله شامل شرح فضای مسئله و مفروضات آن و ارائه و شرح مدل اختصاص داده شده است. در بخش چهارم روش دقیق مسئله با نام تجزیه بندرز و مراحل پیاده سازی آن بر این مدل ارائه شده است. در این بخش علاوه بر ارائه رویکرد کلاسیک، یک رویکرد تقویت شده با بهره جستن از دو استراتژی گرد کردن جواب‌ها و جستجوی محلی حول جواب‌های مسئله اصلی معرفی شده است. الگوریتم فراابتکاری «جستجو با شعاع متغییر» بمنظور جستجوی محلی پیرامون جواب‌های مسئله اصلی

نقش ایفا می‌نماید. بخش پنجم نتایج حاصل شده از پیاده‌سازی روش حل دقیق؛ نمایش نمودار پارتو، عملکرد الگوریتم بندرز در مقایسه با روش محدویت اپسیلن و تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی مورد بررسی واقع شده است. سرانجام در بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای برای تحقیقات آتی بیان شده است.

۳- تعریف مسئله و ارائه مدل

شبکه‌ای متشکل از توزیع‌کننده مرکزی (یا تولیدکننده) با مکان معین، مشتریان (یا خرده فروشان) با مکان معین، و مناطقی بالقوه با قابلیت احداث یکی از دو نوع تسهیل با نام های میکرو توزیع‌کننده و صندوق قفل‌دار را در نظر می‌گیریم. شرکت بر اساس تجربه و داده‌های تاریخی از رفتار مشتریانش می‌تواند تقاضای مشتریان در مناطق مختلف و همچنین اقبال آنان به طریقه دریافت محصولات خود را – در قالب دریافت درب منزل و بدون تخفیف و یا دریافت از مراکز صندوق‌های قفل‌دار خودکار با تخفیف پیش بینی نمایند. تمام تقاضای یک مشتری باید توسط یک میکرو توزیع کننده یا صندوق قفل‌دار تأمین گشته و در غیر این صورت یک فرصت از دست رفته برای شرکت منظور می‌گردد. مسئله درصدد تعیین تعداد و موقعیت تسهیلات (میکرو توزیع‌کننده‌ها و صندوق‌های قفل‌دار) در مکان بالقوه، تعیین تعداد و مسیری‌های ناوگان نقلیه در دو سطح با رعایت سیاست‌های شرکت در کنترل تعداد مشتریان از دست رفته می‌باشد. دو تابع هدف متضاد مسئله به ترتیب کمینه‌سازی هزینه‌کرد سرمایه گذاری، جابجایی، تخفیفات اولیه (بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش محصولات بصورت علامت مخالف در این تابع هدف منظور می‌گردد) در «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» وکمینه‌سازی گازهای آلاینده تولید شده توسط ناوگان نقلیه می‌باشد.

از دیگر مفروضات مسئله می‌توان به این موارد اشاره نمود: شبکه تک‌محصوله می‌باشد؛ وسائل نقلیه در هر سطح همگن می‌باشد؛ وسائل نقلیه ظرفیت‌دار هستند؛ مسئله درون‌زا می‌باشد و تعداد تسهیلات توسط مدل تعیین می‌گردد؛ تقاضا و تمامی پارامترها مشخص و بصورت قطعی می‌باشد؛ مسئله تک منبعه بوده و یک مشتری تمام نیازش را تنها از یک تسهیل دریافت می‌کند؛ در رده اول محصولات از توزیع‌کننده (تولیدکننده) به تسهیلات (میکرو توزیع‌کننده‌ها و صندوق‌های قفل‌دار) جایابی شده ارسال می‌گردد؛ در رده دوم محصولات از میکرو توزیع‌کننده‌ها به درب خانه مشتریان ارسال و یا توسط مشتریان به‌صورت حضوری از صندوق‌های قفل‌دار خودکار بر حسب سطح مطلوبیتش دریافت می‌گردد؛ سطح مطلوبیت مشتریان برای دریافت محصول از صندوق‌های قفل‌دار تابعی از میزان نزدیکی و یا رضایت اولیه آنها است؛ مشتریان میزان تخفیفی را که در قبال دریافت حضوری از صندوق‌های قفل‌دار بدست می‌آورند، تابعی از دوری آن تسهیل به آن‌هاست. شکل ۴ مدلی شماتیک از کلیات این مطالعه است.



شکل ۴. نمایی از «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» پیشنهادی

پارامترها و متغیرهای مدل:

$V_0 = \{v_0\}$ انبار و یا توزیع کننده مرکزی

$V_s = \{v_{s_1}, v_{s_2} .. v_{s_{n_s}}\}$ مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث میکرو توزیع-کننده و صندوق‌های قفلدار

$V_c = \{v_{c_1}, v_{c_2} .. v_{c_{n_c}}\}$ مجموعه مشتریان

n_s تعداد مکان‌های بالقوه

n_c تعداد مشتریان

m_1 حداکثر تعداد وسیله نقلیه سطح اول

m_2 حداکثر تعداد وسیله نقلیه سطح دوم

m_{s_j} حداکثر تعداد سفر مجاز که می‌تواند در سطح دوم از میکرو توزیع‌کننده jام شروع گردد

K^1 ظرفیت ناوگان نقلیه در سطح اول

K^2 ظرفیت ناوگان نقلیه در سطح دوم

d_k تقاضای مشتری k ام

cap_j^M حداکثر ظرفیت عملیاتی یک میکرو توزیع‌کننده در مکان jام

cap_j^P حداکثر ظرفیت عملیاتی یک صندوق قفل‌دار در مکان jام

rev سودعایدی حاصل از فروش هرواحد محصول

pr_l احتمال دریافت محصول توسط مشتری از جعبه قفل‌دار خودکار واقع شده در سطح مطلوبیت l ام

h_l درصد تخفیف برای مشتری در صورتی که کالای خود را از صندوق قفل‌دار با سطح مطلوبیت l ام خود تحویل گیرد.

α حداکثر ریسک کمپانی برای از دست دادن یک مشتری (عددی بین صفر تا یک)

ρ^{1st} میزان آلایندگی تولید شده برای هر واحد از مسافت توسط ناوگان فعال در سطح اول

ρ^{2st} میزان آلایندگی تولید شده برای هر واحد از مسافت توسط ناوگان فعال در سطح دوم

fix_j^M هزینه ثابت احداث یک میکرو توزیع کننده در مکان jام

fix_j^P هزینه ثابت احداث یک صندوق قفل‌دار در مکان jام

dis_{ij} طول یال (i,j)

c_{ij} هزینه حمل و نقل یال (i,j)

hol_j هزینه عملیات بارگذاری و پیاده سازی هر واحد بار در میکرو توزیع کننده jام

Q_{ij}^1 متغییر جریان عبوری از کمان (i,j) در سطح اول

Q_{ijw}^2 متغییر جریان عبوری از کمان (i,j) در سطح دوم و اعزام شده میکرو توزیع کننده w ام

X_{ij} متغییر تعداد وسائل نقلیه سطح اول با استفاده از کمان (i,j) در سطح اول

Y_{ij}^w متغیر صفر و یک ؛ برابر است با یک اگر کمان (i,j) درسطح دوم توسط وسیله اعزام شده از میکرو توزیع کننده wام تامین گردد در غیر این‌صورت برابر صفر

Z_{kj}^M متغیر صفر و یک؛ برابر است با یک اگر مشتری $k \in V_c$ توسط میکرو توزیع‌کننده مستقر j ام در درب منزل تامین گردد در غیر این‌صورت برابر صفر

Z_{kj}^P متغیر صفر و یک؛ برابر است با یک اگر تقاضای مشتری $k \in V_c$ توسط صندوق قفل‌دار مستقر در مکان j ام به صورت حضوری تامین گردد در غیر این‌صورت برابر صفر

U_j^M متغیر صفر و یک؛ برابر یک است اگر میکرو توزیع-کننده jام احداث گردد در غیر این‌صورت برابر صفر

U_j^P متغیر صفر و یک که برابر یک است اگر صندوق قفل‌دار jام احداث گردد در غیر این‌صورت برابر صفر

U_j متغیر صفر و یک که برابر یک است اگر در مکان j ام یک تسهیل (میکرو توزیع‌کننده و یا صندوق قفل‌دار) احداث گردد در غیر این‌صورت برابر صفر

F_{klj} متغیر صفر و یک؛ برابر یک است اگر مشتری $k \in V_c$ ام کالای خود را از صندوق قفل‌دار j ام در سطح مطلوبیت lام دریافت نماید درغیراین‌صورت برابر صفر

LC_{klj} متغیر صفر و یک؛ برابر یک است اگر مشتری $k \in V_c$ ام این قابلیت را داشته باشدکه کالای خود را از صندوق قفل‌دار j ام در سطح مطلوبت lام دریافت نماید در غیر این‌صورت برابر صفر

D_j متغیر میزان تقاضایی را که توسط تسهیل مستقر در مکان jام تامین می‌گردد.

D_j^M متغیر میزان تقاضایی را میکرو توزیع کننده j ام تامین می‌گردد.

D_j^P متغیرمیزان تقاضایی را صندوق قفل‌دار jام تامین می‌گردد.

مدل ریاضی پیشنهادی:

$$Mn\ Z^{Gst} = \sum_{i,j \in V_0 \cup V_s, i \neq j} c_{ij} X_{ij} + \sum_{w \in V_s} \sum_{i,j \in V_s \cup V_c, i \neq j} c_{ij} Y_{ij}^w + \sum_{j \in V_s} hol_j\ U_j^M + \sum_{j \in V_s} fix_j^M\ D_j^M + \sum_{j \in V_s} fix_j^P\ U_j^P - rev \sum_{k \in V_c} \sum_{j \in V_s} d_k\ Z_{jk}^P - \sum_{k \in V_c} \sum_{l \in L} \sum_{j \in V_s} rev\ d_k\ (1-h_l)\ F_{klj} \quad (۱)$$

$$Min\ Z^{\text{Polution}} = \sum_{i,j \in V_s \cup V_0} \rho^{1st}\ dis_{ij}\ X_{ij} + \sum_{w \in V_s} \sum_{i,j \in V_s \cup V_c} \rho^{2nd}\ dis_{ij}\ Y_{ij}^w \quad (۲)$$

s.t.

$$\sum_{j\in V_s} X_{v_0 j} \le m \quad (۳)$$

$$\sum_{k\in V_c}\sum_{j\in V_s} Y_{jk}^{j} \le m_2 \quad (۴)$$

$$\sum_{k\in V_c} Y_{jk}^{j} \le m_{s_j} \qquad \forall j \in V_s \quad (۵)$$

$$\sum_{j\in V_0\cup V_s, j\neq i} X_{ji} = \sum_{j\in V_0\cup V_s, j\neq i} X_{ij} \forall i \in V_s \cup V_0 \quad (۶)$$

$$\sum_{k\in V_c} Y_{jk}^{j} = \sum_{k\in V_c} Y_{kj}^{j} \qquad \forall j \in V_s \quad (۷)$$

$$\sum_{i\in V_0\cup V_s, j\neq k} Q_{ij}^{1} - \sum_{i\in V_0\cup V_s, j\neq i} Q_{ji}^{1} = \begin{cases} D_j & depot \\ \sum_{k\in V_c} -d_k & otherwise \end{cases} \quad (۸)$$

$$\sum_{i\in V_c\cup j, i\neq j} Q_{jit}^{2} - \sum_{i\in V_c\cup j, i\neq j} Q_{jit}^{2} = \begin{cases} d_k Z_{jk}^{P} & satellite \\ -D_j^{M} & otherwise \end{cases} \quad (۹)$$

$$Q_{ij}^{1} \le K^{1} X_{ij} \quad \forall i,j \in V_s \cup V_0, i \neq j \quad (۱۰)$$

$$Q_{ijk}^{2} \le K^{2} Y_{ij}^{t} \quad \forall i,j \in V_s \cup V_c, i \neq j, \forall t \in V_s \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i\in V_s} Q_{iv_0}^{1} = 0 \quad (۱۲)$$

$$\sum_{j\in V_c} Q_{jit}^{2} = 0 \quad (۱۳)$$

$$Y_{ki}^{j} \le Z_{kj}^{M} \forall i \in V_s \cup V_c, k \in V_c, \forall j \in V_s \quad (۱۴)$$

$$Y_{ik}^{j} \le Z_{kj}^{M} \forall i \in V_s \cup V_c, k \in V_c, \forall j \in V_s \quad (۱۵)$$

$$\sum_{j\in V_s} Z_{kj}^{M} + \sum_{j\in V_s} Z_{kj}^{P} = 1 \quad \forall k \in V_c \quad (۱۶)$$

$$\sum_{i\in V_s\cup V_c} Y_{ik}^{j} = Z_{kj}^{M} \quad k \in V_c, \forall j \in V_s \quad (۱۷)$$

$$\sum_{i\in V_s\cup V_c} Y_{ki}^{j} = Z_{kj}^{M} \quad k \in V_c, \forall j \in V_s \quad (۱۸)$$

$$Y_{jk}^{j} \le \sum_{i\in V_s\cup V_0} X_{ji} \quad k \in V_c, \forall j \in V_s \quad (۱۹)$$

$$D_j^{M} = \sum_{k\in V_c} d_k Z_{kj}^{M} \quad \forall j \in V_s \quad (۲۰)$$

$$D_j^{P} = \sum_{k\in V_c} d_k Z_{kj}^{P} \quad \forall j \in V_s \quad (۲۱)$$

$$D_j = D_j^{M} + D_j^{P} \quad \forall j \in V_s \quad (۲۲)$$

$$U_j \ge U_j^{P} \quad \forall j \in V_s \quad (۲۳)$$

$$U_j \ge U_j^{M} \quad \forall j \in V_s \quad (۲۴)$$

$$U_j^{M} + U_j^{P} \le 1 \qquad \forall j \in V_s \quad (۲۵)$$

$$\sum_{\forall i\in V_s\cup V_0} (Q_{ij}^{1} + Q_{ji}^{1}) \le \sum_{\forall k\in V_c} d_k U_j \forall j \in V_s \quad (۲۶)$$

$$D_j^{M} \le cap_j^{M} U_j^{M} \qquad \forall j \in V_s \quad (۲۷)$$

$$D_j^{P} \le cap_j^{P} U_j^{P} \quad \forall j \in V_s \quad (۲۸)$$

$$\sum_{l\in L} F_{klj} = Z_{kj}^{P} \quad \forall k \in V_c, \forall j \in V_s \quad (۲۹)$$

$$LC_{klj} \ge M(2 - S_{klj} - U_j^{P}) \quad \forall j \in V_s, k \in V_c, l \in L \quad (۳۰)$$

$$LC_{klj} \le S_{klj} \quad \forall j \in V_s, k \in V_c, l \in L \quad (۳۱)$$

$$LC_{klj} \le U_j^{P} \forall j \in V_s, k \in V_c, l \in L \quad (۳۲)$$

$$F_{klj} \le LC_{klj} \quad \forall j \in V_s, k \in V_c, l \in L \quad (۳۳)$$

$$\frac{\sum_{k\in V_c}\sum_{l\in L}\sum_{j\in V} d_k (1 - pr_l) F_{klj}}{\sum_{k\in V_c}\sum_{j\in V} d_k Z_{kj}^{P}} \le \alpha \quad (۳۴)$$

$$X_{ij} \text{ is Integer } i,j \in V_s \cup V_0$$

$$Y_{ik}^{j} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_s \cup V_c, k \in V_c, \forall j \in V_s$$

$$Z_{kj}^{P}, Z_{kj}^{P} \in \{0,1\} \quad \forall k \in V_c, \forall j \in V_s;$$

$$U_j^{M}, U_j^{P} \in \{0,1\} \quad \forall j \in V_s$$

$$F_{klj}, LC_{klj} \in \{0,1\} \quad \forall j \in V_s, k \in V_c, l \in L$$

$$Q_{ij}^{1} \ge 0 \quad i,j \in V_0 \cup V_s; Q_{ijt}^{2} \ge 0$$

$$i,j,t \in V_c \cup V_s, t \in V_s; \quad (۳۵)$$

$$D_j^{M}, D_j^{P} \ge 0 \quad \forall j \in V_s$$

معادله (۱)، تابع هدف اول مسئله شامل هفت عبارت است که به ترتیب عبارتند از: الف) مجموع هزینه‌های جابجایی سطح اول، ب) مجموع هزینه‌های جابجایی سطح دوم، پ) مجموع هزینه عملیات بارگیری و تخلیه محصولات در میکرو توزیع‌کنندگان، ت) مجموع هزینه ثابت احداث میکرو توزیع‌کنندگان، د) مجموع هزینه ثابت احداث قفسه‌های قفل‌دارخودکار، ر) مجموع سود عایدی از فروش و تحویل کالا در درب منزل مشتریان توسط وسائل نقلیه، ز) مجموع سود عایدی از فروش محصولات به مشتریانی که سفارشات خود را بصورت حضوری از جعبه‌های صندوق‌دار با تخفیف تحویل می‌گیرند. معادله (۲)، تابع هدف دوم مسئله شامل میزان آلایندگی تولید شده توسط ناوگان نقلیه در سطح اول و دوم تولید، می‌باشد. در معادلات (۳) و (۴)، تعداد مسیرها نباید از تعداد وسائل نقلیه موجود در دو سطح تجاوز نمایند. معادله (۵) نشان می‌دهد که برای هر میکرو توزیع کننده تعداد سفرها نباید بیشتر از تعداد از پیش معین باشد. معادله (۶) بیانگر آن‌ست که شروع و

اختتام هر سفری در سطح اول انبار مرکزی بوده و برای تسهیلات بالقوّه تعادل جریان حفظ گردد. معادله (۷) گویای آن است که شروع و اختتام هر سفری در سطح دوم یک میکروتوزیع کننده می‌باشد و برای مشتریان تعادل جریان باید برقرار باشد. معادلات (۸) و (۹) نشان می‌دهد که تنظیم کننده تعادل جریان در یک گره برابر تقاضایی است که آن گره تأمین خواهد نمود بجزء انبار مرکزی در سطح اول که جریان خروجی از آن برابر کل تقاضای (شناخته شده) شبکه و همچنین میکرو توزیع کنندگان در سطح دوم که جریان خروجی شان برابر است با تقاضای (ناشناخته) تخصیص‌یافته به آن تسهیل است. از دیگر ویژگی این محدودیت ممانعت از ایجاد زیر دور در شبکه می‌باشد. معادلات (۱۰) و (۱۱) رعایت محدودیت ظرفیت وسیله‌های نقلیه در دو سطح را تضمین می‌کند. معادلات (۱۲) و (۱۳) بیانگر آن‌است که هیچ کالای بازگشتی به انبار مرکزی در سطح اول و میکرو توزیع کننده‌ها در سطح دوم نخواهیم داشت. معادلات (۱۴) و (۱۵) تضمین می‌کندکه سفارش مشتری $k \in V_c$ بوسیله میکرو توزیع‌کننده j توسط وسیله نقلیه در درب منزل تامین می‌گردد ($z_{jk}=1$) تنها اگر کالایی از آن تسهیل توسط یک وسیله نقلیه به آن مشتری ارسال شده باشد ($y_{ij}^{k}=1$). معادله (۱۶) گویای آن است که هر مشتری بطور حتم باید به یک تسهیل (میکرو توزیع‌کننده و یا صندوق قفلدار) تخصیص یابد. معادلات (۱۹-۱۷) تضمین می‌نمایدکه اگر یک مشتری تعیین گردد که در منزل محصول را دریافت نماید آنگاه تنها یک مسیر در سطح دوم وجود داردکه از آن مشتری می‌گذرد. بطور همزمان، شرایطی را به سطح دوم تحمیل می‌نماید که در صورتی که مشتری به یک میکرو اختصاص یابد آنگاه بطور حتم مسیرهای سطح دوم از یک میکرو بمنظور تحویل کالا در درب منزل مشتری یک مشتری استفاده می‌نمایند. معادلات (۲۲-۲۰) به ترتیب تقاضای تخصیص‌یافته به یک میکرو توزیع کننده و صندوق‌های قفلدار و یک تسهیل (هر یک از دو تسهیل مذکور) است. معادلات (۲۴) و (۲۴) نشان می‌دهد که در مکان jام یک تسهیل وجود دارد تنها در صورتیکه یکی از دو نوع تسهیل در آنجا بنا شده باشد. معادله (۲۵) تضمین می‌نمایدکه در مکان j ام حداکثر یک از دو نوع تسهیل می‌تواند احداث گردد. معادله (۲۶) بیانگر آن‌است که اگر میکرو توزیع‌کننده‌ای در مکان j ام احداث نشد از انباری مرکزی هیچ کالای برای آن احداث نگردد. معادلات (۲۷) و (۲۸) ظرفیت عملیاتی میکرو توزیع‌کننده و صندوق‌های قفلدار را کنترل می‌کنند. معادله (۲۹) بیانگر تخصیص یک مشتری به یک صندوق قفلدار در سطح مطلوبیت l ام آن است. معادلات (۳۳-۳۰) نشان می‌دهدکه یک صندوق قفلدار خودکار این قابلیت را داردکه یک مشتری را درسطح l ام تامین نماید اگر و تنها اگر آن صندوق قفلدار احداث شده باشد و همچنین در مطلوبیت سطح l ام آن باشد. معادله (۳۴) تضمین می‌نماید که میانگین مشتریان از دست رفته که به صندوق‌های قفلدارخودکار اختصاص داده شده است از مقداری مطلوب (از پیش تعیین شده) شرکت تجاوز نکند. معادله (۳۵) متغیرهای تصمیم مدل را نمایش می‌دهد.

$$Min\ Z^{\text{Integrated}} = \omega \times \frac{Z^{\text{Cost}} - MinZ^{\text{Cost}}}{MaxZ^{\text{Cost}} - MinZ^{\text{Cost}}} + (1-\omega) \times \frac{Z^{\text{Polution}} - MinZ^{\text{Polution}}}{MaxZ^{\text{Polution}} - MinZ^{\text{Polution}}} \qquad (۳۶)$$

$$Min\ Z^{\text{Integrated}} = \frac{\omega}{MaxZ^{\text{Profit}} - MinZ^{\text{Profit}}} \times Z^{\text{Profit}} + \frac{(1-\omega)}{MaxZ^{\text{Polution}} - MinZ^{\text{Polution}}} \times Z^{\text{Polution}} + \xi \qquad (۳۷)$$

در معادله (۳۶)، ω وزن تابع هدف اول است که مقداری بین صفر تا یک دارد. $MaxZ^{\text{Polution}}, MaxZ^{\text{Cost}}$ به‌ترتیب مقدار بیشینه مدل تنها با هدف اول و دوم می‌باشد و به همین روال $MinZ^{\text{Cost}}, MinZ^{Polution}$ به

ترتیب مقدار کمینه مدل تنها با هدف اول و دوم می‌باشد. معادله (۳۷) حالتی دیگر از معادله (۳۶) است که مقادیر ثابت آن با پارامتر ξ جدا گشته است و می‌توان از آن در ادامه کار صرف نظر نمود.

۴- تعریف مسئله و ارائه مدل

در این مقاله، برای حل مسئله پیشنهادی؛ یک الگوریتم ترکیبی شامل الگوریتم دقیق تجزیه بندرز پیشنهاد شده است. همانطورکه پیشتر در بخش ۲ اشاره گردید اکثر رویکرد حل مطالعات حوزه حمل و نقل شهری، رویکردهای غیردقیق از جمله روش‌های فراابتکاری می‌باشد. این در حالیست که بهره‌گیری از روش‌های دقیق برای مسائل حوزه حمل و نقل که با مفاهیمی راهبردی همچون مکان یابی درآمیخته است و اندکی توفیق در دستیابی به یک جواب با کیفیت‌تر موجب کاهش معنادار هزینه‌های شبکه و کسب و کار می‌گردد امری اجتناب ناپذیر است. در این مطالعه علاوه بر پیاده سازی الگوریتم بندرز کلاسیک یک الگوریتم اصلاح شده بندرز که بر دو استراتژی گرد کردن جواب و جستجوی محلی استوار است جهت بهبود کیفیت جواب‌ها استفاده شده است که در به جزئیات آن پرداخته می‌شود. باتوجه به ماهیّت الگوریتم تجزیه بندرز که مناسب برای مواجهه با مسائل تک هدفه است، توابع هدف مدل مذکور در ابتدا بصورت زیر توسط روش مجموع وزن‌دار نرمال شده به یک تابع هدف تبدیل می‌گردند.

۴-۱. معرفی الگوریتم تجزیه بندرز

الگوریتم بندرز [۲۶] یک رویکرد کلاسیک برای مسائل بهینه‌سازی ترکیبیاتی بر پایه ایده پارتیشن و تولید با تاخیر محدودیت‌ها است. این روش مسئله را داخل دو مسئله ساده‌تر که مسئله اصلی[13] و زیر مسئله[14] نامیده می‌شود تجزیه می‌نماید. مسئله اصلی اولیه یک نسخه آزاد سازی شده از مسئله واقعی که شامل تنها یک زیر مجموعه‌ای از متغیر و محدودیت‌هاست. زیر مسئله همان مسئله اولیه است که درآن متغییرهای حاضر در مسئله اصلی بصورت ثابت در نظر گرفته می‌شوند. روش بندرز در کالبد جواب‌های حاصل از تکرار مسئله اصلی و زیر مسئله به‌منظور دستیابی به یک بهینگی اثبات پذیر برای مسئله اولیه می‌باشد. جواب مسئله اصلی یک راه حل تدریجی را برای متغیرها و کران مسئله همزاد ارئه می‌دهد. متغییرها سپس در زیرمسئله که جواب‌هایش منجر به یک برش معتبر برای مسئله اصلی می‌گردد بصورت ثابت در نظر گرفته می‌شود. این برش‌ها، برش‌های بهینگی نامیده می‌شوند اگر راه حل جزئی مسئله اصلی جزئی از یک جواب شدنی زیر مسئله باشد و یا یک برش شدنی است اگر جواب جزئی مسئله اصلی منجر به یک زیر مسئله نشدنی گردد. این فرآیند تا زمانی‌که که شکاف میان مسئله اصلی و همزاد به یک مقدار معینی نزدیک شود ادامه می‌یابد. شبه کد الگوریتم توسعه یافته بندرز پیشنهادی در شکل ۵ نمایش داده شده است.

۴-۲. مسئله همزاد زیر مسئله

مسئله همزاد یک مسئله خطی مطابق معادلات (۳۸-۴۸) می‌باشد. جواب‌های بهینه این زیرمسئله برای تولید برش‌های بهینگی و شدنی به مسئله اصلی فرستاده می‌شود.

$$
\begin{aligned}
Max\ Z^{Dual} = \\
&\sum_{j\in J_c}\sum_{i\in V_c} d_i \tilde{Z}_{ij} B_{ij} - \sum_{\forall i\in J'_s\cup V_c}\sum_{\forall j\in J'_s\cup V_0, i\neq j} K^1 \tilde{X}_{ij} D_{ij} \\
&+\sum_{\forall j\in J_s}\sum_{\forall i\in J_c} (d_i \tilde{Z}^M_{ij}) H_j + \sum_{\forall j\in J_s}\sum_{\forall i\in J_c} (d_i \tilde{Z}^P_{ij}) I_j \\
&- \sum_{\forall i\in J'_s\cup V_c}\sum_{\forall j\in J'_s\cup V_c, i\neq j}\sum_{\forall i\in J'_s} K^2 \tilde{Y}^1_{ij} E_{ji} - \sum_{\forall j\in V_s}(\sum_{\forall i\in J'_c} d_i)\tilde{U}_j K_j \\
&-\sum_{\forall j\in J'_s} cap^M_j \tilde{U}^M_j L_j - \sum_{\forall j\in J'_s} cap^P_j \tilde{U}^P_j M_j + \sum_{i\in J'_0}(\sum_{i\in J'_c} d_i) N_j \\
&+ \sum_{\forall i\in J'_s\cup V_0}\sum_{\forall j\in J'_s\cup V_0, i\neq j} M \mu_{ij} O_{ij}
\end{aligned}
\qquad (۳۸)
$$

[13] Master Problem
[14] Sub-Problem

i. $LB=-inf,\ UB=inf$
ii. **تا هنگامیکه** $LB < UB - \varepsilon$ **ادامه بده**
iii. آزادسازی مسئله اصلی
iv. مسئله آزادشده اصلی حل گردد (زیرفصل ۴-۳)
v. اجرای الگوریتم جستجوی همسایگی با جستجوی متغییر به‌منظور جستجوی محلی پیرامون جواب مسئله اصلی برای دست‌یابی به جواب‌های کارآمدتر (زیر فصل ۴-۵)
vi. جواب‌های مسئله اصلی از طریق گردسازی به‌دست آورده شود (زیر فصل ۴-۵)
vii. LB بروز گردد
viii. تابع هدف زیر مسئله همزاد تغییر داده شود
ix. زیرمسئله همزاد حل گردد (زیر فصل ۴-۲)
x. **اگر زیر مسئله کراندار است سپس**
xi. UB بروزرسانی گردد
xii. تولید برش بهینگی
xiii. **در غیر اینصورت**
xiv. تعیین شعاع‌های دورشونده(زیرفصل ۴-۴)
xv. تولید برش‌های شدنی‌ساز
xvi. **پایان حلقه اگر**
xvii. اضافه‌سازی برش‌ها به مسئله اصلی
xviii. **پایان حلقه تا هنگامیکه**

شکل ۵. شبه کد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی تجزیه بندرز

$$J_j - A_j \le 0 \quad j \in V_s \tag{۳۹}$$
$$C_j + H_j - J_j - L_j \le hol_j \quad j \in V_s \tag{۴۰}$$
$$I_j - J_j - M_j \le 0 \quad j \in V_s \tag{۴۱}$$
$$A_i - A_j - D_{ji} - K_i - K_j - O_{ji} \le 0 \quad i,j \in V_S, \mathrm{j} \ne i \tag{۴۲}$$
$$A_j + N_i - D_{ij} - K_j \le 0 \quad j \in V_S, i \in V_0 \tag{۴۳}$$
$$-A_j - D_{ji} + F - K_j \le 0 \quad j \in V_S, i \in V_0 \tag{۴۴}$$
$$B_{jt} - B_{it} - E_{ijt} \le 0 \quad i,j \in V_c, i \ne j, t \in V_s \tag{۴۵}$$
$$B_{ji} - C_i - E_{iji} \le 0 \quad i \in V_s, j \in V_c \tag{۴۶}$$
$$-B_{ij} + G_j - E_{iij} \le 0 \quad i \in V_c, j \in V_s \tag{۴۷}$$
$$F;\ A_j, H_j, I_j, G_i\ J_j \quad j \in V_s$$
$$N_i \ j \in V_0;\ B_{ij}, C_{ij} \ i \in V_s\ j \in V_c : \text{Free Variable}$$
$$O_{ij}, D_{ij}, E_{ijt}, K_t, L_t, M_t \ge 0 \tag{۴۸}$$
$$\forall i, j \in V_s \cup V_0$$
$$i \ne j \quad t \in V_s$$

۳-۴. مسئله اصلی

مسئله اصلی یک مسئله عدد صحیح مطابق معادلات (۵۱)-(۴۹) می‌باشد. معادله (۵۰) جهت ایجاد کیفیت بالاتر برای تکراری بعدی و معادله (۵۱) درصدد ایجاد برش‌هایی براساس شعاع‌های دورشونده به‌منظور هدایت الگوریتم به فضای موجه برای تکرارهای بعدی است.

$$Max\ Z^{Master} \tag{۴۹}$$

s.t.

$$Z^{Master} \le \left[rev \sum_{k \in V_c} \sum_{j \in V_s} d_k Z_{jk}^{P} + \sum_{k \in V_c} \sum_{l \in L} \sum_{j \in V_s} rev\ d_k (1-h_l) F_{klj} \right.$$
$$- \sum_{i,j \in V_0 \cup V_s\ i \ne j} c_{ij} X_{ij} - \sum_{t \in V_s} \sum_{i,j \in V_s \cup V_c\ i \ne j} c_{ij} Y_{ij}^{t} - \sum_{j \in V_s} fix_j^{M} U_j^{M}$$
$$\left. - \sum_{j \in V_s} fix_j^{P} U_j^{P} + \sum_{j \in V_s} \sum_{i \in V_c} \tilde{d}_i B_{ij} Z_{ij} - \sum_{\forall t \in V_s \cup V_0} \sum_{\forall j \in V_s \cup V_0, j \ne i} K^{1} \tilde{D}_{ij} X_{ij} \right.$$

$$+\sum_{\forall j\in V_c}\sum_{\forall i\in V_c} d_i \tilde{H}_j Z_{ij}^{M} + \sum_{\forall i\in V_s\cup V_0}\sum_{\forall j\in V_c\cup V_0, i\neq j}\sum_{\forall t\in V_s} K^{2} \tilde{E}_{ijt} Y_{ij}^{'}$$

$$-\sum_{\forall j\in V_c}\Big(\sum_{\forall i\in V_c} d_i\Big) \tilde{K}_j U_j - \sum_{\forall j\in V_c} cap_j^{M} U_j^{M}$$

$$-\sum_{\forall j\in V_c} cap_j^{P} \tilde{M}_j U_j^{P} + \sum_{i\in V_0}\Big(\sum_{i\in V_c} d_i\Big) \tilde{N}_j$$

$$+\sum_{\forall i\in V_c\cup V_0}\sum_{\forall j\in V_c\cup V_0, i\neq j} M \tilde{O}_{ij} \mu_{ij}\Bigg] \qquad (۵۰)$$

$$\Bigg[\sum_{j\in V_c}\sum_{i\in V_c} d_i \tilde{B}_{ij} Z_{ij} - \sum_{\forall i\in V_0\cup V_0}\sum_{\forall j\in V_c\cup V_0, i\neq j} K^{1} \tilde{D}_{ij} X_{ij} \qquad (۵۱)$$

$$+\sum_{\forall j\in V_c}\sum_{\forall i\in V_c} d_i \tilde{H}_j Z_{ij}^{M} + \sum_{\forall i\in V_c\cup V_0}\sum_{\forall j\in V_c\cup V_0, i\neq j}\sum_{\forall t\in V_s} K^{2} \tilde{E}_{ijt} Y_{ij}^{'}$$

$$-\sum_{\forall j\in V_c}\Big(\sum_{\forall i\in V_c} d_i\Big) \tilde{K}_j U_j - \sum_{\forall j\in V_c} cap_j^{M} U_j^{M}$$

$$-\sum_{\forall j\in V_c} cap_j^{P} \tilde{M}_j U_j^{P} + \sum_{i\in V_0}\Big(\sum_{i\in V_c} d_i\Big) \tilde{N}_j$$

$$+\sum_{\forall i\in V_c\cup V_0}\sum_{\forall j\in V_c\cup V_0, i\neq j} M \tilde{O}_{ij} \mu_{ij}\Bigg] \le 0$$

۴-۴. تعیین شعاع‌های دورشونده

در صورتی‌که همزاد زیر مسئله بیکران گردد بدین معناست که زیرمسئله غیرموجهه است و یا به عبارتی دقیق‌تر، جوابی که از مسئله اصلی به مسئله همزاد منتقل شده است در فضای شدنی مسئله واقعی نمی‌باشد و لذا باید درصدد هدایت الگوریتم به فضای موجهه باشیم. مدل خطی زیر، معادلات (۶۴)-(۵۲) وظیفه شناسایی شعاع دور شونده متناظر با جواب عدد صحیح حاصل شده از مسئله اصلی را دارد.

$$Max \quad Z^{Dumpt} = 0 \qquad (۵۲)$$

$$\Bigg[\sum_{j\in V_c}\sum_{i\in V_c} d_i \tilde{Z}_{ij} B_{ij} - \sum_{\forall i\in V_c\cup V_0}\sum_{\forall j\in V_c\cup V_0, i\neq j} K^{1} \tilde{X}_{ij} D_{ij}$$

$$+\sum_{\forall j\in V_c}\sum_{\forall i\in V_c} (d_i \tilde{Z}_{ij}^{M}) H_j + \sum_{\forall j\in V_c}\sum_{\forall i\in V_c} (d_i \tilde{Z}_{ij}^{P}) I_j$$

$$-\sum_{\forall i\in V_c\cup V_0}\sum_{\forall j\in V_c\cup V_0, i\neq j}\sum_{\forall t\in V_s} K^{2} \tilde{Y}_{ij}^{'} E_{ijt} - \sum_{\forall j\in V_c}\Big(\sum_{\forall i\in V_c} d_i\Big) \tilde{U}_j K_j$$

$$-\sum_{\forall j\in V_c} cap_j^{M} \tilde{U}_j^{M} L_j - \sum_{\forall j\in V_c} cap_j^{P} \tilde{U}_j^{P} M_j + \sum_{i\in V_0}\Big(\sum_{i\in V_c} d_i\Big) \tilde{N}_j$$

$$+\sum_{\forall i\in V_c\cup V_0}\sum_{\forall j\in V_c\cup V_0, i\neq j} M \mu_{ij} \tilde{O}_{ij}\Bigg] = 1 \qquad (۵۳)$$

s.t.

$$J_j - A_j \le 0 \quad j \in V_s \qquad (۵۴)$$

$$C_j + H_j - J_j - L_j \le 0 \quad j \in V_s \qquad (۵۵)$$

$$I_j - J_j - M_j \le 0 \quad j \in V_s \qquad (۵۶)$$

$$A_i - A_j - D_{ji} - K_i - K_j - O_{ji} \le 0 \quad i,j \in V_S, j \neq i \qquad (۵۷)$$

$$A_j + N_i - D_{ij} - K_j \le 0 \quad j \in V_S,\ i \in V_0 \qquad (۵۸)$$

$$-A_j - D_{ji} + F - K_j \le 0 \quad j \in V_S, i \in V_0 \qquad (۵۹)$$

$$B_{jt} - B_{it} - E_{ijt} \le 0 \quad i,j \in V_c, i \neq j, t \in V_s \qquad (۶۰)$$

$$B_{ji} - C_i - E_{iji} \le 0 \quad i \in V_s, j \in V_c \qquad (۶۱)$$

$$-B_{ij} + G_j - E_{ijj} \le 0 \ \ i \in V_c, j \in V_s \qquad (۶۳)$$

۵-۴. استراتژی‌هایی برای تقویت الگوریتم بندرز

در میان تقویت‌های الگوریتمی که برای رویکرد تجزیه بندرز پیشنهاد شده است، استراتژی مک دنیل و دوین [۲۷] مسلماً یکی از محبوب‌ترین آن‌ها است. ایده آن‌ها شامل حل نمودن نسخه آزادسازی شده مسئله اولیه بمنظور دستیابی به شماری از برش‌های معتبر است. در اکثر اوقات، پیاده سازی این ایده به‌وسیله آزادسازی تمامی متغیرهای حاضر در مسئله اصلی در محدودیت‌ها هستند. حل یک مسئله اصلی معمولاً پر زمان‌ترین قسمت رویکرد الگوریتم بندرز است تنها به‌دلیل آنکه آن یک مسئله عدد صحیح مختلط است. لذا هرگونه تقویتی که منجر به تسریع و تحکیم جواب این قسمت از الگوریتم گردد باعث ایجاد بهبود هم از بعد کیفیت جواب و هم زمان اجرای کل الگوریتم می‌شود.

الف) استراتژی گرد کردن مقدار متغییرها برای فاز آزادسازی: در طول فاز آزادسازی بندرز، جواب‌های حاصل شده توسط مسئله اصلی احتمالاً بصورت کسری بوده و بنابراین می‌توانند تقریب ضعیفی از جواب‌های عدد صحیح مطلوب باشند. ادبیات غنی در روش‌هایی که از جواب‌های کسری که توسط روش سیمپلکس و یا هر روش دیگر برنامه ریزی خطی به‌منظور دست‌یابی تقریبی به جواب‌های عدد صحیح بهره می‌جویند موجود است. این رویکردها

معمولاً روش‌های گردسازی[15] و یا گردسازی برنامه ریزی[16] خطی نامیده می‌شود و بصورت موفقیت آمیزی در دامنه وسیعی از مسائل ترکیبیاتی استفاده شده‌اند [۲۸-۳۰]. ایده این روش‌ها گردسازی جواب‌های کسری بمنظور دستیابی به جواب‌های عدد صحیح شدنی است. این استراتژی رندسازی برنامه ریزی خطی می‌تواند خصوصیات‌های مسئله یا هر دانش موجود درباره ساختار خوب جواب‌ها استفاده نماید. تطبیق این استراتژی با فرآیند تولید برش‌های بهتر بندرز ساده می‌باشد. جوابهای رند شده (که توسط هر استراتژی ممکن گردسازی حاصل شده) می‌تونه بطور مستقیم در زیرمسئله که جواب‌هایش یک برش جدید بندرز به ثمر خواهد نشاند استفاده گردد.

ب) استراتژی جواب‌های جستجوی محلی: در زمانی که یک جواب یافته می‌شود، این استراتژی پیرامون این جواب می‌تواند جهت بدست آوردن جواب‌های مشابه اما متفاوت استفاده شود. مطابق قبل، این جواب‌های جدید می‌تواند برای تولید برش‌های جدید برای مسئله اصلی استفاده گردد. باید توجه نمود که به‌دلیل اینکه در این مقاله یک مسئله اصلی آزادسازی شده را داریم، جواب‌های همسایه در این نقطه حتی ممکن است، جواب بهینه و عدد صحیح مسئله اولیه باشد و علاوه بر این، جواب‌های همسایگی (حتی با کیفیت پایین تر) ممکن است می‌تواند به ایجاد برش‌های با کیفیت در تکرارهای بندرز کمک نماید. برای پیاده‌سازی این استراتژی از یک الگوریتم فراابتکاری خوش‌نام در جستجوی محلی با نام «جستجو با همسایگی متغیر»[17] استفاده شده است. برای جلوگیری از اطاله اطاله کلام علاقه‌مندان به جزئیات این الگوریتم به مطالعه ملادنویچ و هانس [۳۱] ارجاع داده می‌شوند.

[15] Rounding-off
[16] LP-rounding
[17] VNS

۵- تحلیل نتایج

۵-۱. تحلیل عددی

پیاده‌سازی مدل پیشنهادی توسط روش کلاسیک محدویت اپسیلن[18] و الگوریتم بندرز پیشنهادی در محیط نرم افزار پایتون و استفاده از کتابخانه دوسیپیلکس[19] که زیرساختاری از نرم افزار آی بی - ام ایلگو سیپلکس ورژن ۱۲,۱۰,۰[20] بوده بر روی یک کامپیوتر همراه ۵ هسته با پردازنده ۲,۷ توسعه داده شده است. لازم به ذکر است که روش اپسیلن کانترینت که یک از روشهای رایج در دستیابی به جواب‌های چندگانه بوده که بمنظور ارزیابی کیفیت الگوریتم پیشنهادی بکارگرفته شده است لذا از ذکر جزئیات آن خوداری و علاقه مندان را به مقاله مرتبط ارجاع می‌دهیم [۳۲]. در این فصل مواردی از قبیل نحوه تولید پارمترهای تصادفی، نحوه همگرایی الگوریتم بندرز، نمایش نمودار پارتو الگوریتم پیشنهادی، جدول مقایسه خصوصیات الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم محدویت اپسیلن و تحلیل حساسیت نقش و صندوق‌های قفلدا خودکار بر روی هزینه و میزان آلایندگی شبکه مورد بحث واقع می‌گردد. با توجه به عدم ظهور و بکارگیری صندوق‌های قفل‌دار خودکار و میکرو انبارها در زمان نگارش مقاله استفاده از داده‌های یک مطالعه موردی ممکن نمی‌باشد و پارامترهای مسئله برحسب یک بازه منطقی مستخرج از مطالعات بصورت یکنواخت مطابق جدول ۲ تولید می‌گردد. در جدول ۳، مسائل نمونه‌ای برای ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی در سه طبقه کوچک، متوسط و بزرگ ایجاده شده است. ابعاد مسئله شامل تابعی خطی از تعداد مکان‌های با قابلیت استقرار تسهیلات، تعداد مشتریان و تعداد سطوح مطلوبیت مشتری در دریافت سفارش از صندوق‌های قفل‌دار خودکار می‌باشد.

[18] Epsilon-Constraint
[19] doCplex
[20] IBM ILOG CPLEX Enterprise Server 12.10.0 x64

جدول ۲. تولید داده‌های تصادفی

پارامتر	مقدار
cap_j^M	Uniform(200,1000)
cap_j^P	Uniform(200,1000)
pr_l	Uniform(0.1, 0.9)
h_l	Uniform(0.2, 0.3)
c_{ij}	Uniform(20,30)
ρ^{1st}, ρ^{2st}	Uniform(8,12)
fix_j^M	Uniform$(14\times10^5, 15\times10^5)$
fix_j^P	Uniform$(14\times10^6, 15\times10^6)$
hol_j	Uniform(4, 6)

جدول ۳. نتایج محاسباتی الگوریتم پیشنهادی

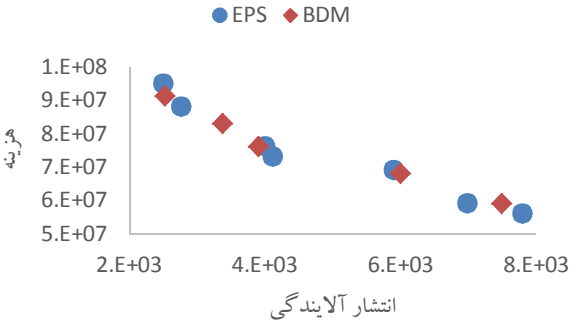
اندازه	ابعاد مسئله (n_c, n_s, l)	EPS			BD		BDR	
		مقدار بهینه ادغام شده (برحسب هزار)	زمان اجرایی (ثانیه)	شکاف از بهینگی	زمان اجرایی (ثانیه)	شکاف از بهینگی	زمان اجرایی (ثانیه)	شکاف از بهینگی
کوچک	(۳و۴و۱۰)	۵۷۵۰۰	۹۸۵	۰٪	۱۴۲۰	<۱٪	۱۹۲۸	۰٪
	(۳و۶و۸)	۸۸۰۰۰	۱۲۰۱	۰٪	۱۸۰۵	<۱٪	۱۶۶۵	۰٪
متوسط	(۳و۴و۱۵)	۵۶۲۵۰	۶۸۵۲	<۲٪	۷۸۹۶	<۴٪	۷۱۲۶	<۲٪
	(۳و۸و۱۲)	۱۱۷۰۰۰	۸۲۵۶	<۲٪	۱۰۲۵۴	<۴٪	۹۴۲۹	<۲٪
	(۵و۴و۱۲)	۵۷۰۰۰	۷۶۵۳	<۳٪	۱۲۴۵۶	<۴٪	۱۲۲۱۰	<۲٪
	(۲و۳و۱۸)	۴۰۵۰۰	۹۱۷۸	<۳٪	۱۴۲۰۰	<۴٪	۱۲۹۸۰	<۲٪
بزرگ	(۴و۱۰و۳۰)	۱۴۲۵۰۰	>>۲۱۶۰۰	-	۱۶۹۸۰	<۷٪	۱۵۹۸۲	<۳,۵٪
	(۴و۶و۴۰)	۸۰۰۰۰	>>۲۱۶۰۰	-	۱۷۵۶۲	<۷٪	۱۵۸۹۶	<۳,۵٪
	(۶و۴و۴۰)	۵۰۰۰۰	>>۲۱۶۰۰	-	۱۸۲۵۶	<۷٪	۱۶۸۳۰	<۳,۵٪
	(۳و۴و۴۵)	۴۸۸۶۲	>>۲۱۶۰۰	-	۱۸۰۲۵	<۷٪	۱۶۹۲۳	<۳,۵٪

الگوریتم‌های موجود عبارتند از: الف) الگوریتم کلاسیک محدویت اپسیلن (Eps) جهت دستیابی به جواب بهینه دقیق در ابعاد کوچک به‌عنوان شاخص ارزیابی ب) الگوریتم کلاسیک (BD) ج) الگوریتم توسعه یافته بندرز (BDM). الگوریتم‌های پیشنهادی توسط دو معیار کیفیت جواب و زمان اجرایی مورد ارزیابی قرار گرفتند. آستانه صبر ۶ ساعت برای زمان اجرایی الگوریتم‌ها و شکاف بهینگی کمتر از ۳،۲،۱ و ٪۳,۵ بعنوان شرایطی برای توقف آزمایش منظور شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد الگوریتم محدویت اپسیلن در هیچ یک از مسائل شامل در ابعاد بزرگ قادر به پایان اجرا نبوده و زمان اجرایی بیش از ۶ ساعت را ثبت نموده است. الگوریتم کلاسیک بندرز در مسائل کوچک و متوسط از حیث زمان اجرایی و شکاف از بهینگی بی شک بازنده رقابت با الگوریتم محدویت اپسیلن بوده اما در ابعاد بزرگ بر خلاف الگوریتم رقیب توانسته آزمایش را با شکاف بهینگی کمتر از ٪۷ به پایان برساند. الگوریتم بندرز توسعه یافته در ابعاد کوچک موفق به دستیابی به جواب بهینگی با

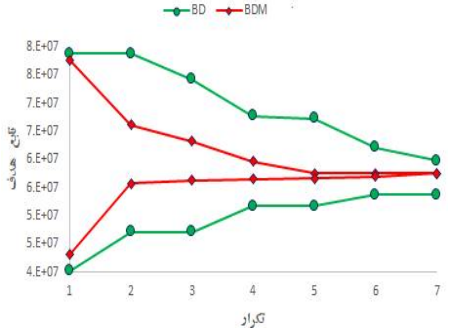
شکاف صفر شده و از لحاظ شکاف بهینگی برتری مطلق خود را نسبت به دو روش دیگر اثبات نموده و در ابعاد بزرگ قادر به دستیابی به جواب بهینه در زمانی کمتر از ۵ ساعت و شکاف کمتر از ٪۳٫۵ می‌باشد. در شکل ۶ نمودار پارتو جواب‌های بهینه حاصله از اولین مسئله نمونه جدول ۳ توسط دو الگوریتم محدویت اپسیلن و بندرز توسعه یافته نمایش داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌گردد توابع هزینه و میزان آلایندگی تولید شده دارای رابطه در تضاد می‌باشند بدین معنا که برای کاهش میزان آلایندگی ملزم به افزایش هزینه جهت بکارگیری خدمات کارآمدتر و مدرن‌تر می‌باشیم و بالعکس برای کاهش هزینه‌ها مجبور به بکارگیری فرآیندهای سنّتی‌تر بوده که این امر موجب افزایش تولید گازهای آلاینده شهری می‌گردد. چیدمان جواب‌های حاصله از دو الگوریتم بیانگر کارآیی آن ها بر روی مرز پارتو است.

در شکل ۷ سرعت همگرایی الگوریتم بندرز کلاسیک و توسعه یافته برای اولین مسئله نمونه جدول ۳ را نمایش می‌دهد که نسخه توسعه یافته هم از حیث دستیابی به جواب بهینه و هم سرعت همگرایی دست بالاتر را دارد. همانطور که مشهود است نسخه توسعه یافته از تکرار دوم جهش ناگهانی در بهبود کران بالا و پایین را نشان داده و این در حالیست که نسخه کلاسیک به صورت تدریجی به بهبود جواب‌ها می‌پردازد و در پایان هم به جواب بهینه دست نمی‌یابد و این موضوع در ابعادهای بزرگتر مسئله با تشدید بالاتر ظاهر خواهد گشت.



شکل ۶. جواب‌های پارتوی مدل



شکل ۷. همگرایی روش تجزیه بندرز کلاسیک و توسعه یافته

۲-۵. تحلیل کاربردی

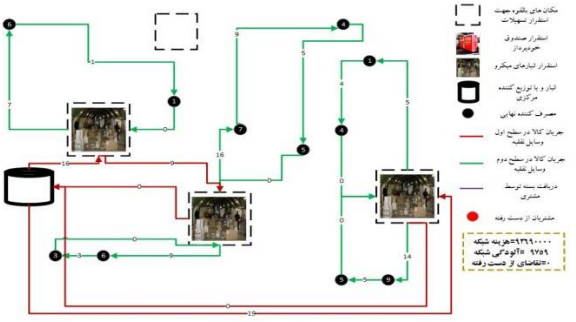
همانطور که در قبل ذکر گردید، شبکه‌ای متشکل از توزیع کننده مرکزی (یا تولیدکننده) با مکان معین، مشتریان (یا خرده فروشان) با مکان معین، و مناطقی بالقوه با قابلیت احداث یکی از دو نوع تسهیل با نام‌های میکرو توزیع‌کننده و صندوق قفل دار را در نظر می‌گیریم. شرکت بر اساس تجربه و داده‌های تاریخی از رفتار مشتریانش می‌تواند تقاضای مشتریان در مناطق مختلف و همچنین اقبال آنان به طریقه دریافت محصولات خود را – در قالب دریافت درب منزل و بدون تخفیف و یا دریافت از مراکز صندوق‌های قفل‌دار خودپرداز با تخفیف پیش بینی نمایند. تمام تقاضای یک مشتری باید توسط یک میکرو توزیع‌کننده یا صندوق قفل‌دار تأمین گشته و در غیر این‌صورت یک فرصت از دست رفته برای شرکت منظور می‌گردد. مسئله درصدد تعیین تعداد و موقعیت تسهیلات(میکرو توزیع‌کننده‌ها و صندوق‌های قفل‌دار) در مکان بالقوه، تعیین تعداد و مسیری‌های ناوگان نقلیه در دو سطح با رعایت سیاست‌های شرکت در کنترل تعداد مشتریان از دست رفته می‌باشد. دو تابع هدف متضاد مسئله به ترتیب کمینه‌سازی هزینه‌کرد سرمایه گذاری، جابجایی، تخفیفات اولیه (بیشینگی سود حاصل از فروش محصولات بصورت علامت مخالف در این تابع هدف منظور می‌گردد) در «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» وکمینه‌سازی گازهای آلاینده تولید شده توسط ناوگان نقلیه می‌باشد.

بمنظور درک روشن‌تر از مدل و برجستگی‌های آن، سه سناریو برای اولین مسئله نمونه جدول ۴ به شرح ذیل تعریف می‌نماییم: الف) شبکه دوسطحی مکان‌یابی-حمل ونقل که میکرو توزیع‌کننده‌ها پس از جایابی باید سفارشات را در درب منازل تحویل دهند (شکل ۸)، ب) شبکه شامل مکان‌یابی صندوق‌های قفلدار خودکار و تخصیص مشتریان بر اساس سطوح مطلوبیتشان به آنان (شکل ۹)، و ج) شبکه‌ای یکپارچه از دو رویکرد قبل که در آن باید تصمیم گیری شود چه تعداد صندوق خودکار و میکرو توزیع‌کننده در چه مکان‌هایی استقرار یابند تا شبکه قادر باشد سفارشات مشتریان را بصورت تحویل کالا در درب منزل و یا برداشت توسط مشتری از صندوق‌های خودکار مرتفع سازد (شکل ۱۰). شبکه منظور شده برای هر سه سناریو دارای ۱۰ مصرف کننده و ۴ مکان بالقوه برای استقرار نسهیلات می‌باشد که در سناریوی اول سفارشات تمام مشتریا ن باید تامین گردد اما در سناریوی دوم و سوم می‌تواند درصدی از پیش تعیین شده از سفارشات مرتفع نگردد که در این مطالعه از آن به عنوان تقاضای از دست رفته یاد می‌شود.

پس از اجرای مدل برای سه سناریوی مذکور، نتایج عددی و بصری در شکل‌های ۸ الی ۱۰ نمایش داده شده است. همانطور مشاهده می‌گردد هزینه شبکه برای سه سناریو به ترتیب ۹۲۶، ۸۶۵ و ۸۸۳ در مقیاس صدهزار و میزان آلایندگی شبکه به ترتیب ۹۷۵۹، ۲۵۱۷ و ۵۸۲۵ و تعداد تقاضاهای از دست رفته به‌ترتیب ۴،۰ و ۰ است.

جدول ۴. تحلیل سه سناریوی پیشنهادی

شماره سناریو	هزینه شبکه	آلودگی شبکه	تقاضای از دست رفته
۱	۹۲۶۹۰۰۰۰	۹۷۵۹	۰
۲	۸۶۵۰۰۰۰۰	۲۵۱۷	۴
۳	۸۸۳۰۰۰۰۰	۵۸۲۵	۰



شکل ۸. ساختار توپولوژی شبکه برای سناریوی اول

شکل ۹. ساختار توپولوژی شبکه برای سناریوی دوم

شکل ۱۰. ساختار توپولوژی شبکه برای سناریوی سوم

از منظر تولید آلایندگی، نتایج حاکی از حضور دو ایده‌آل مثبت و منفی در این مدل است که حالت مثبت مربوط به حالتی است که شبکه بصورت گسترده از صندوق‌های خودپرداز بهره جسته و به تشویق جامعه به دریافت سفارشاتشان از این صندوق‌ها بوسیله تقویت حس مشارکت اجتماعی و پیشنهاد تخفیف نماید که از معایب این روش زمان بر بودن فرهنگ‌سازی و عدم کنترل سطوح مطلوبیت مشتریان در دسترسی به صندوق‌ها می‌باشد. در سوی منفی حالتی است که تمامی سفارشات در درب منزل به مشتریان تحویل داده شود و از معایب آن عدم تحویل قطعی به مشتریان و ترددهای مکرّر ناوگان که منجر به ترافیک و آلودگی‌های صوتی و زیست محیطی می‌گردد است.

سناریوی سوم با رویکرد یکپارچه و مرکّب از دو سناریوی اول، از دیدگاه مدیریتی یک گذر تدریجی از سناریوی اول به سوی سناریوی دوم است که در آن با تقویت تدریجی مسئولیت اجتماعی شهروندان توسط سیاست‌گزاران شهری، مقصود تبدیل ساختار کلاسیک پر تردّد به یک شبکه توزیع کم تردّد با استمداد از همکاری اجتماعی می‌باشد. در سناریوی سوم همانطورکه مشاهده می‌گردد با اتخاذ سیاست تلفیقی از دو رویکرد سنتی و مدرن با صرف هزینه منطقی و به مراتب پایین‌تر از رویکرد سنتی قادر به تامین تمامی سفارشات و کاهش معنادار میزان آلایندگی شبکه است. سناریوی سوم با بکارگیری از رویکرد مدرن (صندوق‌های خودکار) سعی در کاهش آلودگی و تا حدودی هزینه می‌نماید و از رویکرد سنتی سعی درکمینه‌سازی تقاضای از دست رفته مشتریان که آمادگی برداشت از صندوق‌های خودکار را نداشته می‌نماید. سناریوی سوم یک رویکرد و ابزارکارآمد برای سیاستگزاران شهری برای بازطراحی یک شبکه جابجایی سنتی شهری و هدایت تدریجی آن به یک شبکه حمل و نقلی مدرن می‌باشد که در آن مضاف بر توسعه کسب و کارهای اینترنتی و تحویل دهی کالا که بر رونق اقتصادی شهر می‌افزاید، جنبه های پاکیزگی صوتی و محیط زیستی آن را مرتفع خواهد ساخت.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مسئله یک شبکه دو سطحی مسیریابی- مکان یابی متشکل از یک توزیع‌کننده شهری (یا انبار مرکزی)؛ مشتریان، و مکان‌های بالقوه جهت تأسیس دو نوع تسهیل (صندوق قفل‌دار خودکار و میکرو توزیع‌کننده) است و مشتریان قادرند محصول را بر اساس سطح مطلوبیت خود -که تابعی از نزدیکی و دوری به صندوق‌های خودکار و یا دیگر عوامل می‌باشد- در درب منزل و یا از صندوق‌های قفل‌دار بصورت ۲۴ ساعت با کسب تخفیف دریافت نمایند. محصولات در سطح اول از توزیع‌کننده مرکزی توسط ناوگان‌های نقلیه بزرگتر به نسبت سطح دوم به میکرو توزیع‌کننده‌ها و صندوق‌های قفل‌دار خودکار- جایابی‌شده- ارسال می‌گردد و پس از آن، از مراکز میکرو توسط وسائل نقلیه دوستدار محیط زیست به درب منازل مشتریان اعزام و یا محصول توسط مشتری از صندوق‌های خودکار دریافت می‌گردد. تابع هدف اول کمینه‌سازی هزینه شبکه و تابع دوم کمینه‌سازی آلایندگی ناوگان نقلیه شبکه است. برای حل مدل یک الگوریتم تجزیه توسعه یافته بندرز که توسط استراتژی‌های آزادسازی مسئله اصلی و جستجوی محلی و همچنین الگوریتم فراابتکاری جستجوی همسایگی با شعاع متغییر تقویت شده استفاده شده است. جواب‌هایی که از مسئله اصلی آزاد شده بدست آمده توسط الگوریتم فراابتکاری به جواب‌هایی کارآمدتر ارتقاء یافته و پس از گرد شدن به مسئله همزاد ارسال می‌گردد. جهت صحّه‌گذاری کارآیی مدل و الگوریتم پیشنهادی به مقایسه جواب‌های پارتو الگوریتم پیشنهادی با جواب‌های حاصله از روش اپسیلون‌کانسرینت در محیط نرم افزار پایتون و استفاده از کتابخانه دوسیپیلکس که زیرساختاری از نرم افزار آی‌بی‌ام ایلگو سیپلکس نسخه ۱۲,۱۰,۰ پرداختیم که نتایج گویای برتری مطلق روش حل پیشنهادی برای تمامی ابعاد نسبت به نسخه کلاسیک بندرز و همچنین در ابعاد بالا نسبت به الگوریتم محدویت اپسیلن - که در ابعاد بالا قادر به دستیابی به جواب در زمان مجاز نمی‌باشد - است.

بمنظور تجزیه تحلیل عملکرد نقش صندوق‌های خودکار، سه سناریو تعریف شده که درهر سناریو خدمت رسانی در سطح دوم به ترتیب به عهده الف) میکرو توزیع کننده، ب) صندوق‌های خودکار ج) میکرو توزیع کننده‌ها به همراه صندوق‌های خودکار می‌باشد. نتایج بیانگر آن است که ویژگی سناریوی اول عدم تقاضای از دست رفته و سناریوی دوم

کمینه آلایندگی است در حالی که در سناریوی سوم با هزینه شبکه و آلایندگی به طور معنادار کمتر از سناریوی دوم و بطور معنادار نزدیک به سناریوی دوم قادر به پاسخگویی به تمامی سفارشات شبکه (عدم تقاضای از دست رفته) می‌باشد.

پیشنهادهای آتی می‌تواند به قرار زیر باشد:

- در نظرگیری هریک از مواردی از قبیل چند دوره‌ای بودن، پنجره زمانی، موجودی، تولید و غیره در این مباحث پیشنهادی در این مقاله می‌تواند فصلی نو در تکامل و تقویت «شبکه توزیع آخرین گام از جابجایی فیزیکی محصول» شود.

با توجه به ماهیت این حوزه که نزدیکترین قسمت این زنجیره به مشتریان است، با افزایش تعداد مشتری که امری کاربردی در کسب و کارهای امروزه است بر پیچیدگی این مدل بویژه نسخه‌های توسعه از آن بطور نمایی افزوده می‌گردد. بدین منظور استفاده از روش‌های اصلاح‌شده مرکب از الگوریتم دقیق (موفق در تصمیمات راهبردی) و فراابتکاری (موفق در تصمیمات کوتاه مدت و میان مدت) می‌تواند فضایی پر جذابیت برای خوانندگان باشد.

فهرست منابع

[1] R. Goodman. Whatever you call it, just don't think of last-mile logistics, last. Global Logistics & Supply Chain Strategies 9:46–51(2005).

[2] W. Habitat, and H.C.WHO. Unmasking and overcoming health inequities in urban settings. WHO, Geneva (2010).

[3] Unknown. Micro distribution in emerging markets– key issues to consider, Available: https://www.inclusivebusiness.net/ib-voices/ micro-distribution-emerging-markets-key-issues-consider (2018).

[4] M.Li, K. Loscher, A. Banny Nagi, and A. Sheerazi. GOING THE LAST MILE: Best practices of urban freight movement, Columbia University, New York (2017).

[5] McKinsey & Company .Global management consulting', Available: https://www.mckinsey.com (2019).

[۶] م. یوسفی خوشبخت. یک روش رقابت استعماری و یک مدل برنامه‌ریزی صحیح-آمیخته برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت‌دار. مجله پژوهش‌های نوین در ریاضی، ۹(۳): ۵۳-۷۰ (۱۳۹۵).

[۷] ع. محمودی‌راد، ص. نیرومند، م، صانعی و ع. ساجدی نژاد. روش آزاد سازی لاگرانژ برای مسئله حمل و نقل با هزینه ثابت مرحله‌ای. پژوهش‌های نوین در ریاضی، ۱۰(۳): ۱۹-۳۰ (۱۳۹۶).

[8] M.Dror, M. Ball, and B. Golden. A computational comparison of algorithms for the inventory routing problem. Annals of Operations Research 4:1–23 (1985).

[9] N. Absi, C. Archetti, S. Dauzère-Pérès, and D. Feillet. A two-phase iterative heuristic approach for the production routing problem. Transportation Science 49:784–795(2014).

[10] W. Breunig, U., V. Schmid, R.F. Hartl, and T. Vidal. A large neighborhood based heuristic for two-echelon routing problems. Computers & Operations Research 76:208–225 (2016).

[11] L.Zhou, D. Baldacci, Vigo, and X. Wang. A Multi-Depot Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Delivery Options Arising in the Last Mile Distribution. European Journal of Operational Research 265:765–778 (2018).

[12] A. Anderluh, V.C. Hemmelmayr, and P.C. Nolz. Synchronizing vans and cargo bikes in a city distribution network. Central European Journal of Operations Research 25:345–376 (2017).

[13] C.Chao, T. Zhihui, and Y. Baozhen. Optimization of two-stage location–routing–inventory problem with time-windows in food distribution network. Annals of Operations Research 273:111–134 (2019).

[14] A.G. Dragomir, D. Nicola, A. Soriano, and M. Gansterer. Multi depot pickup and delivery problems in multiple regions: a typology and integrated model. International Transactions in Operational Research 25:569–597 (2018).

[15] W. Schneider, M., A. Stenge, and D. Goeke. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. Transportation Science 48:500–520 (2014).

[16] W. Jie, J. Yang, M. Zhang, and Y. Huang. The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology. European Journal of Operational Research 272:879–904 (2019).

[17] K. Soysal, M., J.M. Bloemhof-Ruwaard, and T. Bektaş. The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. International Journal of Production Economics 164:366–378 (2015).

[18] K. Pichka, A.H. Bajgiran, M.E. Petering, J. Jang, and X. Yue. The two echelon open location routing problem: Mathematical model and hybrid heuristic. Computers & Industrial Engineering 121:97–112 (2018).

[19] P. Sun, L.P. Veelenturf, M. Hewitt, and T. Van Woensel. The time-dependent pickup and delivery problem with time windows. Transportation Research Part B: Methodological 116:1–24 (2018).

[20] Y. eutsch, and B. Golany. A parcel locker network as a solution to the logistics last mile problem. International Journal of Production Research 56:251–261 (2018).

[21] D. Feillet, P. Dejax, and M. Gendreau. Traveling salesman problems with profits. Transportation Science 39:188–205 (2005).

[22] F. Tricoire, A. Graf, and W.J. Gutjahr. The bi-objective stochastic covering tour problem. Computers & Operations Research 39:1582–1592 (2012).

[23] M.Strehler, S. Merting, and C. Schwan. Energy-efficient shortest routes for electric and hybrid vehicles. Transportation Research Part B: Methodological 103:111–135 (2017).

[24] O. Dukkanci, B.Y. Kara, and T. Bektaş. The green location-routing problem. Computers & Operations Research 105: 187–202 (2019).

[25] M.Bashiri, M. Rezanezhad, R. Tavakkoli-Moghaddam, and H. Hasanzadeh. Mathematical modeling for a p-mobile hub location problem in a dynamic environment by a genetic algorithm. Applied Mathematical Modelling 54:151–169 (2018).

[26] J.F. Benders. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. Numerische Mathematik 4:238–252 (1962).

[27] D. McDaniel, and M. Devine. A modified Benders' partitioning algorithm for mixed integer programming. Management Science 24:312–319 (1977).

[28] N. Bansal, A. Gupta, J. Li, J. Mestre, V. Nagarajan, and A. Rudra.When LP is the cure for your matching woes: Improved bounds for stochastic matchings. Algorithmica 63: 733–762 (2012).

[29] J. Byrka, A. Srinivasan, and C. Swamy. Fault-tolerant facility location: a randomized dependent LP-rounding algorithm. In: Proceedings of the International Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization, (Springer), 244–257(2010).

[30] P.N. Thanh, N. Bostel, and O. Péton. A DC programming heuristic applied to the logistics network design problem. International Journal of Production Economics 135: 94–105 (2012).

[31] N. Mladenović and P. Hansen. Variable neighborhood search. Computers & Operations Research 24: 1097–1100 (1997).

[32] G. Mavrotas and K. Florios. An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact Pareto set in multi-objective integer programming problems. Applied Mathematics and Computation 219:9652–9669 (2013).