

ارائه مدل ریاضی استوار و الگوریتم حل ابتکاری برای مسئله یکپارچه تولید-مسیریابی - موجودی محصولات فاسدشدنی با انتقال جانبی

فاطمه جعفرخان^۱، سعید یعقوبی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی، گروه اقتصاد، موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی، تهران.
۲. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران.

خلاصه

در این مقاله، یک مدل ریاضی استوار برای مسئله یکپارچه تولید-موجودی-مسیریابی محصولات فاسدشدنی تحت عدم قطعیت تقاضا در یک شبکه‌ای شامل یک تولیدکننده و مجموعه‌ای از خرده فروشان ارائه می‌شود، که در آن، انتقال بین خرده‌فروشان به منظور مقابله با عدم قطعیت تقاضای مشتریان در نظر گرفته می‌شود. همچنین، موازنه‌ای بین استواری راه‌حل و استواری مدل نیز انجام می‌شود که می‌تواند به تصمیم‌گیری در رابطه با برنامه‌ریزی تحویل‌ها، میزان تولید و میزان انتقال بین خرده‌فروشان کمک کند. از آنجایی که مسئله ذکر شده در دسته مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد، یک الگوریتم حل ابتکاری برای حل آن پیشنهاد می‌شود، که در هر مرحله از جستجو با انجام بهترین تغییر در مسیرهای وسیله نقلیه، راه‌حل را به یک راه‌حل بهتر هدایت می‌کند. در نهایت، الگوریتم پیشنهادی بر روی مجموعه داده‌های موجود در ادبیات و یک مطالعه موردی واقعی اجرا شده که نتایج، کارایی بالای این الگوریتم از لحاظ زمان و کیفیت جواب‌ها را آشکار می‌سازد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۵/۰۵/۱۱

پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

کلمات کلیدی:

مسئله یکپارچه تولید-

مسیریابی - موجودی

محصول فاسدشدنی

الگوریتم حل ابتکاری

انتقال جانبی

بهینه‌سازی استوار

۱- مقدمه

پیچیدگی‌های موجود در این زمینه پیدا کرده‌اند. اتلاف و کمبود از چالش‌های مهم مدیریت محصولات فسادپذیر محسوب می‌شود، که برنامه‌ریزی صحیح تولید می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش آن‌ها داشته باشد. اما نمی‌تواند به‌طور کامل از آن‌ها جلوگیری کند.

یک زنجیره تامین دو سطحی متشکل از یک تولیدکننده و چند خرده‌فروش را در نظر بگیرید که تولیدکننده، وظیفه‌ی تولید و توزیع یک محصول فاسدشدنی به خرده‌فروشان را بر عهده دارد. حتی اگر تولیدکننده مدیریت صحیحی روی میزان تولید داشته باشد از آنجایی که تقاضای خرده‌فروشان ماهیت تصادفی دارد، امکان کمبود و مازاد در هر کدام از خرده‌فروشان وجود دارد در این حالت انتقال کالا از خرده‌فروشان که دچار مازاد شده‌اند به خرده‌فروشان دچار کمبود می‌تواند تا حد زیادی به کاهش هزینه‌های سیستم از جمله کمبود، اتلاف و حمل‌ونقل کمک کند. از این رو، این مطالعه در صدد مدیریت

برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی اقلام فسادپذیر همانند مواد غذایی، لبنیات، دارو و فرآورده‌های خونی به دلیل کوتاه بودن طول عمرشان بسیار پیچیده است. این اقلام باید قبل از اتمام عمرشان مصرف شوند. بنابراین سطح تولید و موجودی آن‌ها باید به نحوی باشد، که تقاضا به‌طور کامل تامین شده و اتلاف تا حد ممکن اتفاق نیافتد.

اکثر مطالعات پیشین در زمینه مدیریت تولید، با فرض نامحدود بودن عمر محصولات انجام شده است. این در حالی است که اخیراً، پژوهشگران گرایش زیادی به مطالعه محصولات فسادپذیر به دلیل

* نویسنده مسئول. سعید یعقوبی

تلفن: ۰۵۳-۷۳۲۲۵-۰۲۱؛ پست الکترونیکی: yaghoubi@iust.ac.ir

در آن، اثر متقابل بین عملیات توزیع و عملیات تولید می باشد همچنین آن‌ها یک متدولوژی با استفاده از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای و مسئله‌ی فروشنده دوره گرد ارائه دادند تا وسایل نقلیه را به نقاط تقاضا تخصیص داده و مسیر آن‌ها را نیز مشخص کند.

فراهانی و همکاران [۷] یک مدل یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید و توزیع فرآورده‌های غذای فسادپذیر ارائه کردند. آن‌ها کوتاه کردن زمان بین تولید و توزیع را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که این کوتاه نمودن، منجر به افزایش کیفیت مواد غذایی با افزایش اندکی در هزینه‌های تولید و توزیع می‌گردد.

چن و همکاران [۸] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای زمان‌بندی تولید و مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی برای تحویل فرآورده‌های غذایی فسادپذیر استفاده کردند. آن‌ها تقاضاهای مشتریان را احتمالی در نظر گرفتند. هدف نیز تعیین میزان بهینه تولید، زمان شروع تولید و مسیرهای وسایل نقلیه با حداکثر نمودن منافع انتظاری تامین کننده می‌باشد. همچنین برای حل مسئله پیچیده این مقاله، از یک الگوریتم ترکیبی استفاده شد که نتایج محاسباتی کارایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

سید حسینی و قریشی [۹] یک مدل یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید و توزیع محصولات فاسد شدنی با در نظر گرفتن مسیریابی وسیله نقلیه ارائه نمودند. آن‌ها برای حل مدل مذکور، آن را به دو زیر مسئله تولید و توزیع تقسیم نمودند که زیر مسئله‌ی تولید با استفاده از الگوریتم شاخه و برش کدنویسی شده در LINGO 8.0 و زیر مسئله‌ی توزیع با بکارگیری یک الگوریتم ابتکاری حل می‌شد.

زو و کورز [۱۰] در مقاله‌ای تحت عنوان "مسئله یکپارچه تولید و توزیع با تحویل و بارگیری اقلام فسادپذیر و چندین سفر" به تعیین همزمان زمان بندی تولید، تعداد وسایل نقلیه و مسیر وسایل نقلیه پرداختند.

خون یکی از محصولات فسادپذیر است که به دلیل حیاتی بودن برای جراحی‌ها و درمان بیماری‌ها، مدیریت تولید و موجودی فرآورده‌های آن از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. در این میان، پلاکت به عنوان فسادپذیرترین فرآورده خونی، دارای مدیریت بسیار پیچیده می‌باشد، به طوری که حداقل‌سازی اتلاف و نیز کمبود آن از چالش برانگیزترین مسائل موجود در تامین پلاکت برای بیماران محسوب می‌شود [۱۱]. این در حالی است که تاریخ‌گذشتگی ۱۷ درصد از پلاکت‌های جمع‌آوری شده در سال ۲۰۰۴ [۱۲] و لغو ۴۲۹ عمل جراحی انتخابی در سال ۲۰۰۷ [۱۳] در اثر کمبود پلاکت، نمونه‌هایی از اتلاف‌ها و کمبودهای رخ داده در آمریکا می‌باشند.

اتلاف، علاوه بر تحمیل هزینه‌های تولید، حمل و نقل و انهدام، منجر به کاهش انگیزه در اهداکنندگان می‌گردد به طوری که نرخ بالای اتلاف باعث از دست دادن اهداکنندگان [۱۴] و افزایش احتمال کمبود در آینده شده و منجر به از دست دادن زندگی بیماران می‌شود. از این رو، مدیریت صحیح پلاکت از جمله مهم‌ترین دغدغه‌های مدیران شبکه سلامت به شمار می‌آید. مطالعات زیادی نیز برای

این انتقال‌ها در کنار مدیریت تولید و موجودی محصولات فسادپذیر انجام می‌شود.

ادامه مقاله به این صورت سازماندهی می‌شود. در بخش بعدی (بخش دوم)، مروری از مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت تولید و توزیع اقلام فسادپذیر انجام می‌شود. در بخش سوم مسئله به طور کامل تشریح و مدل ریاضی آن در حالت اطمینان کامل و عدم قطعیت ارائه می‌گردد. روش حل ابتکاری در بخش چهارم با جزئیات توضیح داده می‌شود. بخش پنجم به تشریح مطالعه موردی و عملکرد الگوریتم حل ابتکاری بر روی مطالعه موردی و همچنین مجموعه داده‌های موجود در ادبیات می‌پردازد. در نهایت بخش ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای را برای تحقیقات آتی ارائه می‌نماید.

۲- مرور ادبیات

گانگ و فو [۱] توزیع محصولات غذایی فسادپذیر در کلان شهرها را بررسی نمودند. آن‌ها یک مدل چند هدفه برای مسیریابی وسیله نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی پیشنهاد کردند، که سعی در کاهش هزینه‌هایی ثابت وسیله نقلیه، عملیات تولید و فساد مواد غذایی داشت.

زانو و توموهیرو [۲] مسئله تحویل اقلام فسادپذیر را در سه حالت تحویل اقلام در تازه ترین حالت ممکن، تحویل با کمترین هزینه ممکن و برآوردن نیازهای مشتریان تا حد ممکن بررسی کردند. آن‌ها تابع هدف را کمینه کردن هزینه‌های تحویل در نظر گرفته و الگوریتم ژنتیک را برای حل مسئله مذکور به کار بردند.

طالعی‌زاده و صالحی [۳] مدل میزان سفارش اقتصادی را با هدف ماکزیم کردن سود و تحت شرایط تصادفی بودن مدت تحویل، سیاست پرداخت معوقه و فاسدشدنی بودن کالا بررسی کردند.

کوئلیو و لاپورته [۴] مسئله بازپرسی، تحویل و مدیریت موجودی اقلام فسادپذیر را مطالعه کردند که در آن، یک تامین کننده مسئول تحویل یک کالای فاسدشدنی به مجموعه‌ای از خرده فروشان بود. در این مسئله که هزینه نگهداری و قیمت فروش اقلام در سنین متفاوت یکسان نبود، خرده فروشان می‌توانستند این اقلام را طبق سه سیاست "فروش زودتر محصولات کهنه‌تر برای جلوگیری از فاسد شدن"، فروش زودتر محصولات تازه برای افزایش درآمد" و "فروش بهینه" به فروش برسانند.

فدرگروئن و همکاران [۵] یک مدل یکپارچه برای تخصیص و حمل‌ونقل کالاهای فاسدشدنی به مجموعه‌ای از مکان‌ها با تقاضای تصادفی در نظر گرفتند. آن‌ها در این مدل دو حالت متفاوت را برای تحویل اقلام به مشتریان مد نظر قرار دادند؛ در حالت اول تقاضای هر مشتری به صورت انفرادی برآورده می‌شود و در حالت دوم مشتری‌ها به مجموعه‌ای از مسیرها تخصیص می‌یابند و هر مسیر توسط یک ناوگان حمل‌ونقل سرویس داده می‌شود.

زائری و همکاران [۶] مسئله‌ی تولید و توزیع روزنامه به عنوان یک قلم فسادپذیر در ایران، مورد مطالعه قرار دادند که عنصر کلیدی

سیاست را با دو سیاست دیگر (سیاست "سفارش تا" بدون در نظر گرفتن سن و سیاست "EWA" سیاست توسعه یافته توسط بروکملون و ون دانسلار [۲۲])، با توجه به محدودیت‌های حداکثر کمبود مجاز تحت کنترل موجودی متمرکز و غیرمتمرکز مقایسه کردند. نتایج محاسباتی آن‌ها نشان می‌دهد که اتخاذ کنترل متمرکز بر کل زنجیره تامین پلاکت به کاهش نرخ تاریخ گذشته مورد انتظار سیستم تا حد زیادی کمک می‌کند سیاست OIR به طور مداوم نتایج خوبی در تمام موارد بررسی شده به دست آورده، و بهترین سیاست در میان هر سه سیاست است.

براساس مقاله مروری مسئله تولید- مسیریابی [۲۳]، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه بهینه‌سازی استوار این مسئله انجام نشده است. از این رو، در ادامه به مطالعات انجام شده در رابطه با مسئله موجودی- مسیریابی استوار پرداخته می‌شود.

سولی‌آلی و همکاران [۲۴] مسئله موجودی- مسیریابی استوار را تحت عدم قطعیت تقاضا و با استفاده از روش برسیماس و سیم [۲۶،۲۵] مدل‌سازی کردند. همچنین آن‌ها الگوریتم شاخه و برش را برای حل مسئله توسعه دادند.

هوانگ و لین [۲۷] نیز مسئله موجودی- مسیریابی چند کالایی را تحت عدم قطعیت تقاضا مطالعه کردند و الگوریتم کلونی مورچه را برای حل آن توسعه دادند.

مسئله موجودی- مسیریابی استوار با زمان سفر متغیر توسط لفور و همکاران [۲۸] مطالعه شده است، آن‌ها چهار مدل مختلف برای حل مسئله و شبیه‌سازی مونت کارلو را برای بهبود حل‌ها استفاده کردند. افزایش تصاعدی زمان محاسباتی را می‌توان از ضعف‌های روش حل آن‌ها برشمرد.

سوکول و همکاران [۲۹] یک مدل استوار و یک روش حل دو مرحله‌ای برای مطالعه مسئله استوار موجودی- مسیریابی دریایی با زمان سفر تصادفی و پنجره‌های زمانی ارائه کردند. در مرحله اول روش حل آن‌ها، مسیرهای استوار ساخته شده و در مرحله بعد یک ابتکار ساخت چند سناریویی برای به دست آوردن راه‌حل‌های شدنی خوب، استفاده می‌شود.

با توجه به مرور ادبیات، در مطالعات انجام شده برای مدیریت تولید و توزیع محصولات فاسدشدنی، تولیدکننده مسئول تامین تقاضای خرده‌فروشان بوده و در هیچ کدام از این مطالعات، انتقال بین خرده‌فروشان به عنوان راهکاری برای مقابله عدم قطعیت تقاضا لحاظ نشده است. همچنین اکثر مطالعات انجام شده در زمینه مدیریت تولید و توزیع فرآورده‌های خونی، به ارائه یک سیاست بازپرسازی (یا تولید) برای مرکز خون (مکانی که در آن فرآورده‌های خونی تولید می‌شود) پرداخته و مسئله مسیریابی آن به بیمارستان‌ها (بیمارستان‌ها به مثابه خرده‌فروشان می‌باشد که وظیفه تامین تقاضای بیماران (مشتریان) خود را بر عهده دارند) مورد توجه قرار نداده‌اند. انتقال بین بیمارستان‌ها تنها در مطالعه لانگ [۲۰] و بدون توجه به مسئله تولید و مسیرهای تحویل فرآورده‌های خونی و با

مدیریت تولید و موجودی پلاکت‌ها انجام شده به نحوی که مرکز خون و بیمارستان‌ها با کمترین میزان اتلاف و کمبود روبرو باشند. اما مسئله توزیع پلاکت‌ها که از اهمیت ویژه‌ای در زنجیره تامین خون برخوردار می‌باشد، به طور خاص در کمتر مطالعه‌ای دیده شده است. در ادامه به مطالعات انجام شده در زمینه فرآورده‌های خونی پرداخته می‌شود.

سیلوک و همکاران [۱۵] یک ابتکار بازپرسازی برای پلاکت خون با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های نگهداری موجودی، اتلاف، کمبود و تعویض ارائه دادند. هزینه تعویض زمانی وارد می‌شود که تقاضا برای پلاکت با سن خاص توسط پلاکتی با سن متفاوت برقرار شود. در ابتکار آن‌ها، موجودی از تازه‌ترین اقلام در مقادیر ثابت پر می‌شود و تازه‌ترین اقلام برای استفاده در آینده با محدود کردن برخی از تعویض‌ها، نگهداری می‌شوند. نتایج نشان دادند که سیاست بازپرسازی آن‌ها منجر به عملکرد برتر در مقایسه با ابتکارات موجود در ادبیات می‌شود، به ویژه زمانی که تامین پلاکت محدود باشد.

هاجیما و همکاران [۱۶] روش برنامه‌ریزی پویای مارکوف و رویکرد شبیه‌سازی را برای مدیریت تولید و موجودی پلاکت‌ها در مرکز خون هلند به کار بردند.

هاجیما و همکاران [۱۷] روشی که در کار قبلی آن‌ها [۱۶] معرفی شده بود را گسترش دادند و تعطیلی‌های بی‌قاعده مانند کریسمس را در کارشان لحاظ کردند. آن‌ها دریافتند که قاعده‌ی قبلی برای سفارش دادن هنوز هم بهینه است در حالی که در طول تعطیلی‌ها ذخیره‌ها و تاریخ گذشته‌ها می‌توانند کمتر از ۱ درصد نگهداری شوند.

هملمایر و دونر [۱۸] مسئله‌ی تحویل فرآورده‌های خونی (به طور خاص گلبول قرمز خون) به بیمارستان‌های اتریش مطالعه کردند، که در آن، مرکز خون به جای بیمارستان‌ها، مقادیر و تاریخ تحویل را تعیین می‌کرد (سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده). آن‌ها در کنار زمانبندی تحویل، مسئله مسیریابی را برای توزیع فرآورده‌های خونی در نظر گرفته و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر را برای حل آن به کار بردند.

بلیک و همکاران [۱۹] همچنین یک روش ساده شده برای سفارش پلاکت بر اساس سطح خدمات ارائه کردند. این روش در بیمارستان‌هایی با اندازه مختلف به کار گرفته شد و دریافت شد که این روش در بیمارستان‌هایی با تقاضا با ثبات‌تر، بهتر عمل می‌کند.

لانگ [۲۰] از یک مدل بهینه‌سازی برمبنای شبیه‌سازی برای مطالعه ابزارهای جایگزینی (استفاده از گروه خونی سازگار برای برآورد تقاضا) و انتقال بین بیمارستان‌ها استفاده کرد نتایج او نشان داد که این ابزارها می‌تواند منجر به کاهش کمبود شوند.

دون و لیائو [۲۱] با استفاده از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک سیاست بازپرسازی جدید به نام نسبت موجودی کهنه (OIR) برای تولید پلاکت خون ارائه دادند، این سیاست تنها با استفاده از اطلاعات نسبی سن و برای اندازه‌گیری تازگی کل موجودی می‌باشد. آن‌ها این

G مجموعه H عمر محصول فاسدپذیر $g, g' \in \{1, 2, \dots, H\}$
 S مجموعه Ω سناریو $s, s' \in \{1, 2, \dots, \Omega\}$

پارامترها:

h_i هزینه نگهداری در خرده‌فروش i ام و تولیدکننده
 PC هزینه تولید هر واحد محصول فاسدشدنی
 c_{ij} هزینه حمل و نقل وسیله نقلیه بین گره i و j
 b_{ij} هزینه انتقال بین گره i و j
 ω جریمه وزنی برای موازنه بین استواری راه‌حل و استواری مدل (هزینه کمبود)
 BB^t حداکثر میزان تولید در تولیدکننده در دوره t ام
 de_i^t تقاضای خرده‌فروش i ام در دوره t
 $de_i^{t,s}$ تحقق de_i^t تحت سناریوی s
 $I_i^{0,g}$ موجودی ابتدای دوره اول از عمر g در خرده‌فروش i ام و تولیدکننده
 Q ظرفیت وسیله نقلیه
 C_i ظرفیت نگهداری خرده‌فروش i ام
 ML حداکثر تعداد اتلاف
 λ وزن اختصاص یافته به واریانس تابع هدف
 p_s احتمال سناریو s

متغیرها:

$I_i^{t,g}$ سطح موجودی در تولیدکننده و خرده‌فروشان از عمر g در پایان دوره t
 $I_i^{t,g,s}$ تحقق $I_i^{t,g}$ تحت سناریوی s
 x_{ij}^t اگر گره i بعد از گره j در دوره t ملاقات شود، در غیر اینصورت ۰
 $q_i^{t,g}$ مقدار محصول فاسدشدنی تحویل داده شده به خرده‌فروش i از عمر g در دوره t
 $w_{ij}^{t,g}$ مقدار محصول فاسدشدنی انتقال یافته از i به j از عمر g در دوره t
 $w_{ij}^{t,g,s}$ تحقق $w_{ij}^{t,g}$ تحت سناریوی s
 $\delta_i^{t,s}$ تحقق تقاضای محصول فاسدشدنی (کمبود) در خرده-فروش i ام تحت سناریوی s
 $d_i^{t,g}$ مقداری از تقاضای محصول فاسدشدنی در خرده‌فروش i ام که از عمر g در دوره t تامین شده است
 $d_i^{t,g,s}$ تحقق $d_i^{t,g}$ تحت سناریوی s
 vv_i^t متغیر کمکی برای حذف ساب‌تور
 $l_i^{t,g}$ متغیر کمکی برای اعمال سیاست FIFO، یک اگر محصول از عمر g در دوره t توسط خرده‌فروش i فروخته شود، صفر در صورتی که فروخته نشود.
 $l_i^{t,g,s}$ تحقق $l_i^{t,g}$ تحت سناریوی s

رویکرد شبیه‌سازی، دیده شده است. تعدادی از مقالات ابتکارهایی را برای بازپرسازی فرآورده‌های خونی در بیمارستان‌ها پیشنهاد کرده‌اند که در این بین، تنها مقاله‌ی هملمایر و دونر [۱۸] مسئله مسیریابی را برای توزیع فرآورده خونی به بیمارستان‌ها مطالعه کرده‌اند. این مطالعه یک مسئله یکپارچه تولید-مسیریابی-موجودی ارائه می‌دهد. که در آن، علاوه بر مدیریت تولید، مدیریت موجودی و برنامه‌ریزی توزیع، انتقال بین خرده‌فروشان به منظور مقابله با عدم قطعیت تقاضا در نظر گرفته می‌شود. ارائه یک روش حل ابتکاری برای حل مسئله بر روی یک مطالعه موردی در رابطه خدمات انتقال خون تهران از دیگر سهم اضافه شده توسط این مطالعه به مطالعات مرتبط می‌باشد.

۳- بیان مسئله و مدلسازی

در این بخش، یک مدل ریاضی استوار برای مسئله یکپارچه تولید-موجودی-مسیریابی برای محصول فاسدشدنی در یک زنجیره تأمین دو سطحی؛ شامل یک تولیدکننده و مجموعه‌ای از خرده‌فروشان در یک افق زمانی محدود ارائه می‌شود. تولیدکننده با محدودیت تولید در هر دوره روبرو بوده و باید در رابطه با میزان تولید در شروع هر دوره تصمیم‌گیری نماید. همچنین، در این مقاله فرض شده است که یک وسیله نقلیه با ظرفیت محدود در دسترس است که در شروع هر دوره یک مسیر را برای تحویل محصول فاسدشدنی از تولیدکننده به زیر مجموعه‌ای از خرده‌فروشان طی می‌کند. اما از آنجایی که خرده-فروشان با سناریوهای مختلف تقاضا در هر دوره روبرو هستند امکان انتقال بین خرده‌فروشان و هم‌چنین ارسال مستقیم از تولیدکننده به خرده‌فروشان (به طور کلی انتقال) بعد از وقوع هر کدام از سناریوها در طول دوره وجود دارد. شمایی از مسئله فوق‌الذکر با سه دوره زمانی و شش خرده‌فروش در شکل (۱) فراهم شده است. سایر مفروضات به صورت زیر می‌باشند.

- ✓ موجودی تولیدکننده و خرده‌فروشان در ابتدای دوره اول، از هر گروه سنی معلوم است.
- ✓ ظرفیت خرده‌فروشان محدود است.
- ✓ حداکثر میزان تولید در هر دوره معلوم است.
- ✓ عمر محصول ثابت و معلوم می‌باشد.
- ✓ سیاست FIFO برای تامین تقاضای مشتریان در خرده‌فروشان استفاده می‌شود.

در ادامه بعد از تعریف مجموعه‌ها و اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها، مسئله در شرایط اطمینان کامل مدلسازی می‌شود. سپس توضیح کوتاهی از روش استوار مورد استفاده ارائه شده داده و در نهایت مدل استوار مسئله مورد بررسی ارائه می‌گردد.

مجموعه‌ها و اندیس‌ها:

V مجموعه n خرده‌فروش و تولیدکننده $i, j \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$
 V' مجموعه n خرده‌فروش $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$
 T مجموعه τ دوره $t \in \{1, 2, \dots, \tau\}$

زیر تغییر خواهد کرد [۳۰]:

$$\min \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) \quad (31)$$

$$+\omega\rho(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$$

$$Ax = b \quad (32)$$

$$B_s x + C_s y_s + \delta_s = e_s \quad s \in S \quad (33)$$

$$x \geq 0, y_s \geq 0 \quad s \in S \quad (34)$$

جایی که δ_s بردار خطا است و برای اندازه‌گیری انحراف از نقض محدودیت‌های کنترلی (۳۳) تحت هر سناریو استفاده می‌شود. اولین عبارت در تابع هدف (۳۱) نشان‌دهنده استواری راه‌حل و تمایل تصمیم‌گیرنده برای صرف هزینه کمتر می‌باشد. دومین عبارت در تابع هدف (۳۱) نیز بیانگر استواری مدل بوده و جواب‌هایی که باعث نقض محدودیت‌های کنترلی می‌شوند را جریمه می‌کند. در اصل ضریب ω برای انجام موازنه بین استواری راه‌حل و استواری مدل استفاده می‌شود. در سال ۱۹۹۵ فردی به نام مولوی [۳۰] تابع σ را به صورت زیر پیشنهاد داد.

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in S} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in S} p_s (\xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'})^2 \quad (35)$$

که در این عبارت، جمله‌ی اول میانگین وزنی تابع هدف و جمله‌ی دوم مجموع انحراف از مقادیر تابع هدف تحت سناریوهای مختلف (واریانس تابع هدف) را نشان می‌دهد. مدل استوار فوق به دلیل وجود عبارت درجه دو در تابع هدف، غیر خطی است. در سال ۲۰۰۰ میلادی، دو محقق چینی به نام‌های یو و لی [۳۱] برای خطی کردن مدل استوار از عبارت (۳۶) برای تابع σ استفاده کردند.

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in S} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left| \xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'} \right| \quad (36)$$

از آنجایی که هنوز مدل استوار غیر خطی باقی می‌ماند آن‌ها مدلی برای خطی کردن مدل پیشنهاد نمودند که در این مقاله نیز از این مدل جهت خطی کردن استفاده می‌شود. این مدل عبارتست از:

$$\min \sum_{s \in S} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'} \right) \right] + 2\theta_s \quad (37)$$

$$\xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad s \in \theta_s \quad (38)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad s \in S \quad (39)$$

درحقیقت، متغیر θ_s به منظور حذف قدر مطلق به مدل اضافه شده و همچنین یک محدودیت نیز جهت تعیین مقدار θ_s باید به محدودیت‌های مسأله اضافه شود. نحوه‌ی عملکرد این محدودیت بدین صورت است: عبارت داخل قدر مطلق را در نظر بگیرید در صورتی که حاصل این عبارت مقداری نامنفی باشد، از آنجایی که محدودیت (۳۸) برقرار است و تابع هدف مسأله از جنس حداقل-سازی است θ_s کمترین مقدار ممکن خود (یعنی صفر) را اتخاذ

محدود کرده و محدودیت (۷) محدودیت تولید را نشان می‌دهد. محدودیت (۸) بیان می‌کند که تقاضا می‌تواند از محصولات با عمرهای متفاوت تامین شود. محدودیت (۹)-(۱۱) برای اعمال سیاست FIFO برای تامین تقاضای مشتریان در خرده‌فروشان استفاده می‌شود محدودیت (۹) بیان می‌کند که در صورتی تقاضا محصولی با عمر g تامین شود که متغیر کمکی مربوط به آن $(L_i^{t,g})$ یک شود، و محدودیت (۱۰) بیان می‌کند که در صورتی متغیر کمکی مربوط به عمر محصول $1-g$ یک می‌شود که متغیر کمکی مربوط به محصولی با عمر g یک شده باشد یعنی در صورتی موجودی از عمر محصول $1-g$ برای تامین تقاضا استفاده می‌شود که موجودی از عمر محصول g برای تامین تقاضا کافی نباشد. در نهایت محدودیت (۱۱) برای جلوگیری از یک شدن تمام متغیرهای کمکی به کار می‌رود و بیان می‌کند که اگر موجودی در دسترس از عمر محصول g به بالا برای تامین تقاضا کافی باشد دیگر موجودی از عمر محصول $1-g$ برای تامین تقاضا استفاده نشود (مثبت شدن سمت راست محدودیت منجر به صفر شدن متغیر کمکی مربوط به عمر محصول $1-g$ می‌شود). محدودیت (۱۲) بیانگر محدودیت ظرفیت خرده‌فروشان برای نگهداری از محصول فاسدشدنی است. محدودیت (۱۳) بیان می‌کند که در صورت ملاقات خرده‌فروشان توسط وسیله نقلیه به آن محصول تحویل داده شود و محدودیت (۱۴) میزان تحویل را به ظرفیت در دسترس خرده‌فروشان محدود می‌کند. محدودیت (۱۵)، محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۶) محدودیت تشکیل تور و محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) محدودیت‌های حذف سابتور می‌باشند. محدودیت (۱۹) بیان می‌کند که یک وسیله نقلیه در دسترس است. محدودیت (۲۰) - (۲۶) نوع متغیرها را نشان می‌دهد.

۲-۳- روش بهینه‌سازی استوار

صورت کلی مسئله‌ی مورد بحث را در حالت اطمینان کامل به صورت زیر در نظر بگیرید [۳۰]، که در آن x, y هر دو متغیرهای تصمیم مسئله هستند:

$$\min \xi = c^T x + d^T \quad (27)$$

$$Ax = b \quad (28)$$

$$Bx + Cy = e \quad (29)$$

$$x, y \geq 0 \quad (30)$$

x را نماد متغیرهای طراحی و y را نماد متغیرهای کنترلی در نظر می‌گیریم. محدودیت (۲۸) بیانگر محدودیت طراحی بوده که در آن پارامترهای b, A مشخص و معلوم می‌باشند. محدودیت (۲۹) نیز نشان دهنده محدودیت کنترلی است که در آن پارامترهای B, C, e دارای عدم قطعیت هستند. حالا مجموعه سناریوها $\{1, 2, \dots, \Omega\}$ را در نظر بگیرید و برای هر سناریو، احتمال وقوع p_s ($\sum_{s \in S} p_s = 1$) و پارامترهای B_s, C_s, e_s, d_s را برای ضرایب غیر قطعی مدل بالا مرتبط کنید. مدل بالا برای استوار شدن به صورت

از آنجایی که تصمیم‌گیری در رابطه میزان تولید و تشکیل مسیرهای وسیله نقلیه مستقل از وقوع سناریوهاست لذا محدودیت‌های مرتبط بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین محدودیت‌های مدل استوار عبارتند از محدودیت‌های (۷)، (۱۳)، (۱۵) - (۲۰)، (۲۴) - (۲۶)، و سایر محدودیت‌های مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$I_0^{t,g,s} = I_0^{t-1,g-1,s} - \sum_{i \in V'} q_i^{t,g,s} - \sum_{i \in V'} w_{0,i}^{t,g,s} \quad g = 2,3, \dots, H, t \in T, s \in S \quad (45)$$

$$I_0^{t,g,s} = Ft - \sum_{i \in V'} q_i^{t,g,s} - \sum_{i \in V'} w_{0,i}^{t,g,s} \quad (46)$$

$$I_i^{t,g,s} = I_i^{t-1,g-1,s} + q_i^{t,g,s} + \sum_{j \in V} w_{j,i}^{t,g,s} \quad g = 1, t \in T, s \in S \quad (47)$$

$$- \sum_{j \in V'} w_{i,j}^{t,g,s} - d_i^{t,g,s} \quad (47)$$

$$i \in V', g = 2,3, \dots, H, t \in T, s \in S \quad (48)$$

$$I_i^{t,g,s} = q_i^{t,g} + \sum_{j \in V} w_{j,i}^{t,g,s} - \sum_{j \in V'} w_{i,j}^{t,g,s} - d_i^{t,g,s} \quad (48)$$

$$g = 1, i \in V', t \in T, s \in S \quad (49)$$

$$\sum_t \sum_i I_i^{t,g,s} \leq ML \quad g = H, t \in T, i \in V \quad (49)$$

$$de_i^{t,s} = \sum_{g \in G} d_i^{t,g,s} + \delta_i^{t,s} \quad (50)$$

$$d_i^{t,g,s} \leq C_i l_i^{t,g,s} \quad i \in V', t \in T, s \in S \quad (51)$$

$$l_i^{t,g-1,s} \leq l_i^{t,g,s} \quad i \in V', t \in T, g = 2,3, \dots, H, s \in S \quad (52)$$

$$C_i(1 - l_i^{t,g-1,s}) \geq \sum_{g=1}^H (I_i^{t-1,gg-1,s} + q_i^{t,gg} + \sum_{j \in V} w_{j,i}^{t,gg,s} - \sum_{j \in V'} w_{i,j}^{t,gg,s}) - de_i^{t,s} + 1 \quad (53)$$

$$i \in V', t \in T, g = 2,3, \dots, H, s \in S \quad (53)$$

$$\sum_{g \in G} I_i^{t,g,s} \leq C_i \quad i \in V', t \in T, s \in S \quad (54)$$

$$\sum_{g \in G} q_i^{t,g} \leq C_i - \sum_{g=1}^{H-1} I_i^{t-1,g,s} \quad (55)$$

$$i \in V', t \in T, s \in S \quad (55)$$

$$Z^s - \sum_{s \in S} p_s Z^s + \theta_s \geq 0 \quad s \in S \quad (56)$$

$$I_i^{t,g,s} \geq 0 \quad t \in T, g \in G, i \in V, s \in S \quad (57)$$

$$w_{ij}^{t,g,s} \geq 0 \quad t \in T, g \in G, i \in V, j \in V', s \in S \quad (58)$$

$$d_i^{t,g,s}, \theta_s \geq 0 \quad t \in T, g \in G, i \in V', s \in S \quad (59)$$

محدودیت (۴۵) سطح موجودی تولیدکننده را برای هر سناریو و عمر محصول دو به بالا، به روز می‌کند در حالی که محدودیت (۴۶) سطح موجودی تولیدکننده را برای هر سناریو و عمر محصول یک، با توجه به میزان تولید نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۴۷) و (۴۸)

خواهد نمود. اما در حالتی که مقدار عبارت داخل قدر مطلق منفی باشد، محدودیت افزوده شده به مسئله برقرار نخواهد بود، و باید θ_s حداقل مقدار ممکن برای ارضا شدن این محدودیت را اتخاذ کند. در این حالت باید دو برابر مقدار θ_s را به تابع هدف مدل اضافه شود؛ یک θ_s به خاطر اینکه مقدار منفی بودن عبارت اصلی داخل قدرمطلق را خنثی کند و حاصل را به صفر برساند و θ_s دیگر برای این که مقدار جریمه‌ی لازم به تابع هدف افزوده شود. در نهایت شکل استوار مدل (۲۷) - (۳۰) به صورت زیر خواهد بود.

$$\min \sum_{s \in S} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'} \right) + 2\theta_s \right] + \omega \sum_{s \in S} p_s \delta_s \quad (40)$$

با توجه به محدودیت‌های (۳۲) - (۳۴) و (۳۸) - (۳۹).

۳-۳- مدل استوار مسئله در شرایط عدم قطعیت

در شرایط عدم قطعیت، تولیدکننده اطلاعات کاملی از تقاضای خرده-فروشان ندارد. در واقع او تنها تقاضای خرده‌فروشان را تحت سناریوهای مختلف که هر سناریو نیز با احتمال مشخصی رخ می‌دهد، می‌داند. برای مدلسازی استوار مسئله، اجزای تابع هدف زیر را در نظر بگیرید:

$$PCO = PC \sum_{t \in T} F^t \quad (41)$$

$$RC = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V'} \sum_{t \in T} c_{ij} x_{ij}^t \quad (42)$$

$$Z^s = \sum_{i \in V'} \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} h_i I_{i,t}^{g,s} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V'} \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} b_{ij} w_{ij}^{t,g,s} \quad (43)$$

با توجه به اجزای بالا تابع هدف مدل استوار به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$\text{Min } RC + PCO + \sum_{s \in S} p_s Z^s + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left[\left(Z^s - \sum_{s' \in S} p_{s'} Z^{s'} \right) + 2\theta_s \right] + \omega \sum_{s \in S} \sum_{i \in V} \sum_{t \in T} p_s \delta_i^{t,s} \quad (44)$$

عبارت اول و دوم در تابع هدف (۴۴) به ترتیب بیانگر هزینه مسیریابی و تولید هستند که مستقل از وقوع هر سناریو می‌باشد. عبارت سوم، میانگین تابع هدف (۱) و عبارت چهارم، λ برابر واریانس تابع هدف (۱) به جز هزینه‌های تولید و مسیریابی است. توجه شود که میانگین هزینه‌های تولید و مسیریابی برابر خودشان (عبارت اول و دوم تابع هدف) و واریانس آن‌ها صفر می‌باشد. عبارت آخر، نشان دهنده جریمه نقض محدودیت‌های کنترلی یا همان هزینه کمبود می‌باشد.

می‌کند. در نهایت یک مدل ریاضی موسوم به مسئله شبکه جریان برای تعیین مقادیر سایر متغیرها استفاده می‌شود (مرحله دوم ساخت جواب اولیه). برای مطالعه بیشتر می‌توانید به [۳۲] و [۳۴] مراجعه کنید. مدل شبکه جریان برای مسئله مورد مطالعه به صورت زیر می‌باشد.

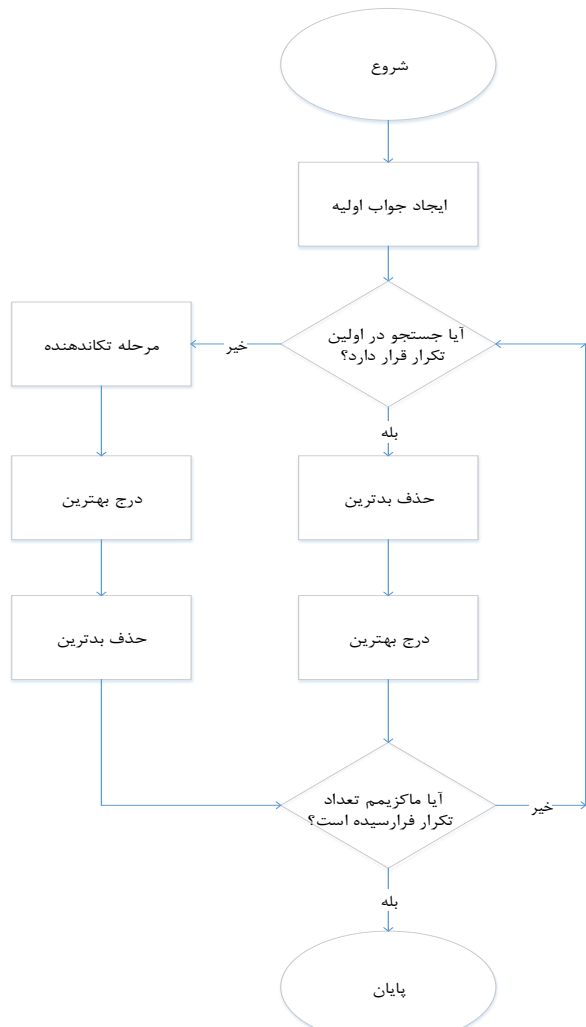
$$\text{Min } PCO + \sum_{s \in S} p_s Z^s + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left(Z^s - \sum_{s' \in S} p_{s'} Z^{s'} \right) + 2\theta_s \quad (60)$$

$$+ \omega \sum_{s \in S} \sum_{i \in V} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} p_s \delta_i^{t,r,s}$$

با توجه به محدودیت‌های (۷)، (۲۵) - (۲۶) و (۴۵) - (۵۹).

$$q_i^{t,g} \leq C_i r_i^t \quad t \in T, i \in V', g \in G \quad (61)$$

جایی که r_i^t پارامتر صفر و یک مربوط به عدم حضور یا حضور خرده‌فروش i در مسیر وسیله نقلیه در دوره t می‌باشد که در مرحله قبل خرده‌فروشان ملاقات شده توسط وسیله نقلیه صورت پذیرد.



شکل (۲): ساختار الگوریتم ابتکاری

۲-۴- جستجوی محلی

همانطور که بیان شد دو جستجوی محلی برای بهبود جواب‌ها

سطح موجودی خرده‌فروشان را به ترتیب برای هر سناریو و عمر محصول دو به بالا و عمر محصول یک، به روز می‌کنند. محدودیت (۴۹) تعداد اتلاف‌ها را در هر سناریو محدود می‌کند. محدودیت (۵۰) نیز محدودیت کنترلی است که تقاضا تحت هر سناریو را با مجموع موجودی از عمرهای متفاوت و مقدار کمبود برای تامین تقاضا برابر می‌کند. محدودیت (۵۳) - (۵۱) سیاست FIFO را برای تامین تقاضا در هر سناریو استفاده می‌شود. محدودیت (۵۴) بیانگر محدودیت ظرفیت نگهداری خرده‌فروشان می‌باشد و محدودیت (۵۵) میزان تحویل توسط وسیله نقلیه را به ظرفیت در دسترس خرده‌فروشان تحت وقوع هر سناریو، محدود می‌کند. محدودیت (۵۶) محدودیت کمکی است (به محدودیت (۳۸) نگاه کنید). در نهایت محدودیت‌های (۵۷) - (۵۹) نوع متغیرها را نشان می‌دهد.

۴- روش حل

مسئله پیشنهادی از توسعه مسئله ارائه شده در مقاله‌ی کهلهو و همکاران [۳۲] و با اضافه نمودن سن محصول، سیاست FIFO و برنامه‌ریزی تولید به دست آمده و همانند آن مسئله، به دلیل داشتن مسیریابی (شامل یک وسیله نقلیه با ظرفیت محدود) در دسته مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد به طوری که حل آن در زمان معقول برای مسائل با ابعاد بالا و واقعی امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر، استوار نمودن مسئله بر زمان حل توسط الگوریتم‌های دقیق می‌افزاید لذا در این بخش، یک روش حل ابتکاری برای حل مسئله پیشنهاد می‌شود. روش حل پیشنهادی از یک حل اولیه شروع کرده و آن را در یک حلقه تکرار توسط دو جستجوی محلی به نام‌های درج بهترین و حذف بدترین، بهبود می‌دهد. همچنین، یک مرحله تکانه‌دهنده برای جلوگیری از به دام افتادن الگوریتم در بهینه محلی لحاظ می‌شود. جهت درک بهتر، ساختار الگوریتم حل پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.

۴-۱- ساخت جواب اولیه

ساخت جواب اولیه شامل دو مرحله می‌شود، در مرحله اول مسیریابا تشکیل می‌شوند و در مرحله بعد مقادیر سایر متغیرها با توجه به مسیریاب ثابت تعیین می‌گردد. شکل (۳) به صورت شماتیک روند ساخت جواب اولیه را ارائه می‌دهد. برای ساخت مسیر، در هر دوره ۷۵ درصد خرده‌فروشان به صورت تصادفی انتخاب می‌گردند. برای مثال در شکل (۳)، خرده‌فروش ۱، ۳، ۵ و ۶ از میان شش خرده‌فروش انتخاب شده‌اند. در مرحله بعد با استفاده از قاعده ارزان-ترین درج، خرده‌فروشان انتخابی در مسیر درج می‌شوند. فرض کنید مسیر ۰-۶-۱-۳-۵-۰ برای مثال شکل (۳) تشکیل می‌گردد. یعنی وسیله نقلیه از تولیدکننده شروع به حرکت کرده و به ترتیب بعد از ملاقات خرده‌فروشان ۶، ۳، ۱ و ۵، دوباره به تولیدکننده باز می‌گردد. در ادامه برای بهبود مسیریاب تشکیل شده از عملگر 2-opt [۳۳]، تا زمانی که بهبود امکان‌پذیر باشد، استفاده می‌شود. برای مثال، مسیر تشکیل شده در شکل (۳) با جابجایی کمان ۳-۶ و ۵-۱ بهبود پیدا

$$\begin{aligned} \min \sum_{i \in V'} \sum_{t \in T} a_i^t u_i^t + PCO + \sum_{s \in S} p_s Z^s \\ + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left(\left(Z^s - \sum_{s' \in S} p_{s'} Z^{s'} \right) + 2\theta_s \right) \\ + \omega \sum_{s \in S} \sum_{i \in V'} \sum_{t \in T} p_s \delta_i^{t,s} \end{aligned} \quad (66)$$

با توجه به محدودیت‌های (۷)، (۲۵) - (۲۶) و (۴۵) - (۵۹).

$$q_i^{t,g} \leq C_i(r_i^t - u_i^t) \quad t \in T, g \in G, i \in V', s \in S \quad (67)$$

$$u_i^t \leq r_i^t \quad i \in V', t \in T \quad (68)$$

$$u_i^t \in \{0,1\} \quad i \in V', t \in T \quad (69)$$

جایی که u_i^t متغیر صفر و یک مربوط به عدم حذف یا حذف خرده‌فروش i از مسیر دوره t می‌باشد. a_i^t میزان کاهش هزینه حمل و نقل به ازای حذف خرده‌فروش i از مسیر دوره t می‌باشد و آن به صورت $a_i^t = C_{ik} - C_{jk} - C_{ij}$ محاسبه می‌شود (به شکل (۴) از راست به چپ نگاه کنید). محدودیت (۶۷) بیان می‌کند که تحویل فقط به خرده‌فروشان حاضر در مسیر و خرده‌فروشان حذف نشده صورت پذیرد. محدودیت (۶۸) هم بیان می‌کند که خرده‌فروشی از مسیر حذف می‌شود که در مسیر حضور داشته باشد.

۴-۳- مرحله تکان‌دهنده

اگر الگوریتم همیشه در حال بهبود راه‌حل باشد امکان افتادن در بهینه محلی وجود دارد لذا یک مرحله تکان‌دهنده برای جلوگیری از این امر و عوض کردن فضا برای جستجو در الگوریتم گنجانده می‌شود. در این مرحله، یک دوره زمانی به تصادف انتخاب و تمام خرده‌فروشان ملاقات شده در آن دوره حذف می‌شوند. برای تعیین مقادیر سایر متغیرها از مدل شبکه جریان (همانند تعیین جواب اولیه) استفاده می‌شود.

استفاده می‌شود جستجوی محلی اول (درج بهترین) خرده‌فروشان ملاقات نشده‌ای را به مسیر اضافه می‌کند که درج آن‌ها هزینه کل را بیشتر از درج سایر خرده‌فروشان کاهش خواهد داد. برای تعیین این خرده‌فروشان و همچنین مقادیر سایر متغیرها از جمله مقدار تولید، مقدار تحویل داده شده توسط وسیله نقلیه، مقدار انتقال بین خرده‌فروشان و غیره از مدل زیر که برگرفته از ایده ارائه شده توسط [۳۵] می‌باشد استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} \min \sum_{i \in V'} \sum_{t \in T} b_i^t v_i^t + PCO + \sum_{s \in S} p_s Z^s \\ + \lambda \sum_{s \in S} p_s \left(\left(Z^s - \sum_{s' \in S} p_{s'} Z^{s'} \right) + 2\theta_s \right) \\ + \omega \sum_{s \in S} \sum_{i \in V'} \sum_{t \in T} p_s \delta_i^{t,s} \end{aligned} \quad (62)$$

با توجه به محدودیت‌های (۷)، (۲۵) - (۲۶) و (۴۵) - (۵۹).

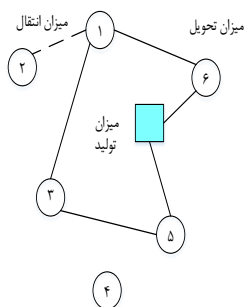
$$q_i^{t,g} \leq C_i(r_i^t + v_i^t) \quad t \in T, g \in G, i \in V', s \in S \quad (63)$$

$$v_i^t \leq 1 - r_i^t \quad i \in V', t \in T \quad (64)$$

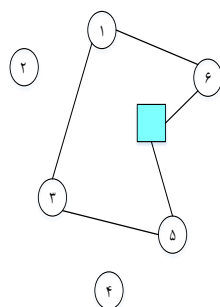
$$v_i^t \in \{0,1\} \quad i \in V', t \in T \quad (65)$$

جایی که v_i^t متغیر صفر و یک مربوط به درج یا عدم درج خرده‌فروشی i در مسیر دوره t می‌باشد. b_i^t بیانگر هزینه درج خرده‌فروش i در دوره t است و آن به صورت $b_i^t = C_{ij} + C_{jk} - C_{ik}$ حساب می‌شود (به شکل (۴) از چپ به راست نگاه کنید). محدودیت (۶۳) بیان می‌کند که تحویل فقط به خرده‌فروشان حاضر در مسیر و خرده‌فروشان درج شده صورت پذیرد. محدودیت (۶۴) هم بیان می‌کند که خرده‌فروشی در مسیر درج شود که در مسیر حضور نداشته باشد.

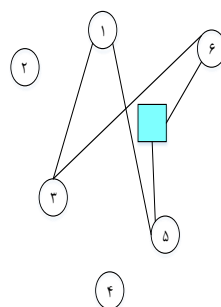
جستجوی محلی دوم در صدد حذف خرده‌فروشان ملاقات شده‌ای است که در صورت حذفشان نسبت به سایر خرده‌فروشان، مقدار تابع هدف را بیشتر کاهش خواهند داد. طبق جستجوی محلی قبلی از یک مدل ریاضی برای تعیین این خرده‌فروشان و مقادیر سایر متغیرها استفاده می‌شود.



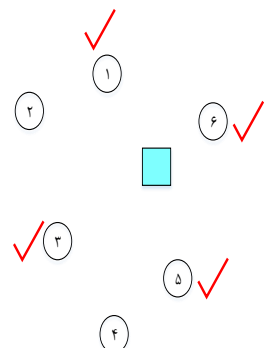
۴- تعیین مقادیر سایر متغیرها با استفاده از مدل جریان



۲- بهبود مسیر



۲- تشکیل مسیر

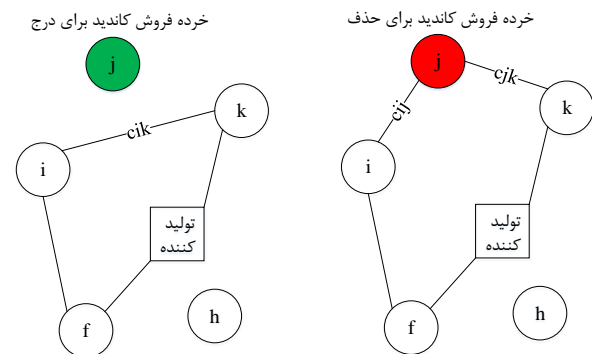


۱- انتخاب تصادفی خرده‌شان

شکل (۳): ساختار جواب اولیه

۴-۴- نتایج محاسباتی

در این بخش، برای سنجش عملکرد مدل و الگوریتم ابتکاری از نظر زمان و کیفیت حل، از یک مطالعه موردی در رابطه با توزیع پلاکت از مرکز خون تهران (تولیدکننده) به بیمارستان‌های تامین اجتماعی تهران (خرده فروشان) استفاده می‌شود. در ضمن می‌توان از مطالعه موردی در رابطه با تولیدکننده‌های دیگر محصولات فاسدشدنی مثل شرکت پگاه، شرکت آمل و ... برای بررسی مسئله استفاده نمود. همچنین الگوریتم بر روی مجموعه داده‌های مربوط به مسئله موجودی-مسیریابی با انتقال و سیاست بازپرسازی سفارشات، روی مجموعه داده های (IRPT-ML) پیاده می‌شود و نتایج آن با نتایج به دست آمده از الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی ارائه شده در [۳۲] مقایسه می‌شود. الگوریتم پیشنهادی، در محیط Matlab ۲۰۱۴ برای حل مدل پیشنهادی، برنامه‌نویسی و پیاده‌سازی شده است. همچنین برای حل دقیق مدل استوار، مسئله شبکه جریان، مدل‌های جستجوی محلی اول و دوم از نرم‌افزار GAMS ۲۴/۱ با solver Cplex ۱۲/۵ استفاده شده است. تمامی محاسبات در یک سیستم کامپیوتری با مشخصات پردازنده core i۵ ۲/۶ GHz و ۴ گیگابایت رم اجرا شده است.



شکل (۴): نحوه محاسبه هزینه حذف و درج خرده‌فروش

۴-۵- مطالعه موردی

در این مقاله، توزیع پلاکت از مرکز خون تهران به هفتاد بیمارستان تامین اجتماعی آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هزینه‌ها از جمله حمل و نقل، نگهداری و تولید براساس داده‌های واقعی لحاظ می‌شوند. همچنین داده‌هایی مثل تقاضا، موجودی ابتدای دوره اول، حداکثر میزان تولید، ظرفیت وسیله نقلیه و بیمارستان‌ها با توجه به ظرفیت تخت بیمارستان‌ها تولید می‌شوند که در ادامه توضیح داده شده است.

- ظرفیت وسیله نقلیه: ۳۵٪ مجموع ظرفیت تختی بیمارستان‌ها
- ظرفیت هر بیمارستان: ۷۰٪ درصد ظرفیت تختی آن بیمارستان
- تقاضای هر بیمارستان: برای سناریوی اول بین ۴٪ تا ۸٪ ظرفیت تختی بیمارستان، برای سناریوی دوم بین ۱۰٪ تا ۱۴٪ ظرفیت تختی بیمارستان و برای سناریوی سوم بین ۱۶٪ تا ۲۰٪ ظرفیت تختی بیمارستان و به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

- حداکثر تولید: به صورت تصادفی بین ۸٪ تا ۲۰٪ مجموع ظرفیت تختی بیمارستان‌ها انتخاب می‌شود.
- موجودی ابتدای دوره در مرکز خون: به صورت تصادفی بین ۵٪ تا ۱۰٪ مجموع ظرفیت تختی بیمارستان‌ها انتخاب می‌شود به طوری که موجودی از گروه سنی سه ۸٪ موجودی کل و موجودی از گروه سنی دو ۲٪ موجودی کل می‌باشد.
- موجودی ابتدای دوره در هر بیمارستان: به صورت تصادفی بین ۵٪ تا ۱۰٪ ظرفیت تختی هر بیمارستان انتخاب می‌شود به طوری که موجودی از گروه سنی سه ۶٪ موجودی کل و موجودی از گروه سنی دو ۴٪ موجودی کل می‌باشد.

۴-۶- عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی IRPT-ML

الگوریتم پیشنهادی می‌تواند هر مسئله‌ای را که از ترکیب مسئله مسیریابی و مسئله جریان تشکیل شده باشد، حل نماید. مثل انواع مسائل موجودی-مسیریابی (مسئله موجودی-مسیریابی چند محصولی، مسئله موجودی مسیریابی با انتقال، مسئله موجودی-مسیریابی برای کالای فاسدشدنی و ...) و انواع مسائل یکپارچه تولید-مسیریابی-موجودی و ...

در این بخش کارایی الگوریتم پیشنهادی بر روی مجموعه داده‌های IRPT-ML (مسئله موجودی-مسیریابی با انتقال و ماکزیمم سطح سفارش) سنجیده می‌شود. این مجموعه داده به ۴ دسته؛ ۱- هزینه موجودی پایین با سه دوره زمانی ۲- هزینه موجودی بالا با سه دوره زمانی ۳- هزینه موجودی پایین با شش دوره زمانی و ۴- هزینه موجودی بالا با شش دوره زمانی تقسیم می‌شوند. مجموعه داده‌های مربوط به سه دوره زمانی از ۵ تا ۵۰ گره را شامل شده و مجموعه داده‌های مربوط به شش دوره زمانی، شامل ۵ تا ۳۰ گره می‌باشند. قابل ذکر است ۵ مثال برای هر گره وجود دارد که اولین مثال آن انتخاب و با الگوریتم پیشنهادی حل شده است. برای پیاده‌سازی الگوریتم بر روی این مجموعه داده باید تغییراتی در مدل‌های استفاده شده در ایجاد جواب اولیه، جستجوهای محلی و مرحله تکان‌دهنده صورت پذیرد. این تغییرات با تنظیم اندازه مجموعه گروه سنی به یک، اندازه مجموعه سناریوها به یک، مقدار هزینه کمبود به یک مقدار بزرگ حذف محدودیت‌های (۴۹)، (۵۱) - (۵۳) و تبدیل محدودیت (۷) به محدودیت تساوی حاصل می‌شود.

الگوریتم جستجوی جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) برای اولین بار برای حل انواع مسائل مسیریابی ارائه شد. که مجیدی و همکاران [۳۶] نیز از این الگوریتم برای حل مسئله مسیریابی سبز با گذاشتن و برداشتن همزمان و پنجره زمانی سخت استفاده کردند. همچنین کهللو و همکاران [۳۲] این الگوریتم را برای حل مسئله موجودی-مسیریابی (IRP) و مسئله موجودی-مسیریابی با انتقال (IRPT) تحت سیاست سفارشی سفارش تا (Order-Up to) و ماکزیمم

توسط الگوریتم ALNS از الگوریتم پیشنهادی تقسیم بر جواب به دست آمده توسط الگوریتم ALNS ضربدر ۱۰۰ محاسبه می‌شود، به ویژه اینکه زمان حل الگوریتم پیشنهادی بسیار کوتاه‌تر از زمان حل الگوریتم ALNS می‌باشد. لازم به ذکر است که حداکثر ۷ تکرار برای حل این مجموعه مثال‌ها توسط الگوریتم استفاده شده است.

سطح سفارش (Maximum Level) توسعه دادند. مقایسه‌ای از نتایج به دست آمده توسط الگوریتم ابتکاری و الگوریتم ALNS بر روی این مثال‌ها در جدول (۱) فراهم شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌کنید اکثر جواب‌های به دست آمده توسط الگوریتم ALNS با الگوریتم پیشنهادی بهبود یافته‌اند (درصد بهبود در ستون آخر به صورت اختلاف جواب به دست آمده

جدول (۱): مقایسه نتایج الگوریتم ابتکاری با الگوریتم ALNS بر روی IRPT-ML

درصد بهبود	الگوریتم ابتکاری		الگوریتم ALNS		نام مسئله
	زمان	جواب	زمان	جواب	
دسته اول: هزینه موجودی پایین با ۳ دوره زمانی					
۰	۲.۲۷	۴۰۳.۴۲	۵.۱۸	۴۰۳.۴۲	abs1n05
۰	۸.۷۵	۱۵۴۷.۲۹	۱۵.۳۷	۱۵۴۷.۲۹	abs1n10
۰.۰۲	۱۶.۲۱	۱۸۳۰.۶۴	۳۱.۸۲	۱۸۳۱	abs1n15
۰	۲۶.۸۸	۱۹۹۹.۰۵	۵۲.۶۸	۱۹۹۹.۰۵	abs1n20
۰.۰۴	۲۹.۳۷	۲۴۸۱.۸۲	۷۷.۱۵	۲۴۸۲.۸۲	abs1n25
۰.۹۹	۳۵.۲۱	۳۲۰۶.۳۳	۱۳۷.۵۳	۳۲۳۸.۳۳	abs1n30
۱.۵۵	۱۴.۴۶	۳۲۵۲.۹۲	۲۶۰.۶۵	۳۳۰۴.۲۶	abs1n35
-۱.۸۷	۳۵.۹	۳۴۴۶.۰۱	۳۲۷.۶۳	۳۳۸۲.۹۱	abs1n40
۷.۴۴	۲۱.۶۵	۳۲۲۴.۸۲	۶۱۴.۹۳	۳۴۸۴.۲۲	abs1n45
۴.۴	۳۰.۷۵	۳۶۶۶.۴	۸۷۲.۰۹	۳۸۳۵.۱۷	abs1n50
دسته دوم: هزینه موجودی بالا با ۳ دوره زمانی					
۰	۱.۷۱	۱۲۶۴.۶۸	۶.۱۲	۱۲۶۴.۶۸	abs1n05
۰.۰۵	۴.۷۷	۴۳۱۶.۶۱	۱۵.۶	۴۳۱۸.۶۱	abs1n10
۰	۴.۷۹	۵۲۷۹.۵	۳۳.۲۴	۵۲۷۹.۵	abs1n15
۰	۹.۷۶	۶۵۸۰.۵۷	۶۳.۶۳	۶۵۸۰.۵۷	abs1n20
-۰.۱۵	۱۵.۲۶	۷۸۵۴.۱۶	۷۹.۰۵	۷۸۴۲.۱	abs1n25
۰.۰۴	۲۱.۲۵	۱۱۷۷۵.۶۱	۱۵۹.۹۵	۱۱۷۸۰.۳	abs1n30
۰.۶۲	۲۲.۲۷	۱۱۳۸۴.۴۵	۲۶۶.۶۵	۱۱۴۵۵.۳	abs1n35
-۰.۲۴	۱۷.۹۲	۱۳۰۶۱.۰۱	۵۴۴.۹۹	۱۳۰۲۹.۹	abs1n40
۰	۱۷.۰۱	۱۳۶۰۴.۴۲	۵۸۷.۴۷	۱۳۶۰۴.۹	abs1n45
۰.۵	۳۱.۸۶	۱۴۰۸۸.۷۱	۹۴۱.۳۷	۱۴۱۵۹.۸	abs1n50
دسته سوم: هزینه موجودی پایین با ۶ دوره زمانی					
۰	۶.۲۸	۲۵۷۱.۶۷	۱۰.۶۲	۲۵۷۱.۶۷	abs1n05
۵.۴۴	۲۶.۰۷	۴۰۱۳.۹۶	۴۰.۷۶	۴۲۴۴.۷۶	abs1n10
۱.۳۷	۴۸.۴۶	۴۵۴۴.۴۹	۸۳.۰۹	۴۶۰۷.۵۲	abs1n15
۰	۵۸.۳۲	۵۲۱۸.۷۲	۱۴۶.۶۳	۵۲۱۸.۷۲	abs1n20
۱۱.۱۳	۶۲.۸۸	۵۸۹۲.۰۴	۲۶۷.۸	۶۶۲۹.۹۱	abs1n25
۰.۷	۵۱.۲۷	۷۵۲۶.۰۸	۸۸۶.۳۹	۷۵۷۹.۲۲	abs1n30
۶.۱۱	۵۳.۲۹	۶۳۸۶.۰۲	۶۳۳.۸۱	۶۸۰۱.۸۷	abs5n30
دسته چهارم: هزینه موجودی بالا با ۶ دوره زمانی					
۰	۷.۰۷	۵۱۱۲.۳۳	۱۲.۷۵	۵۱۱۲.۳۳	abs1n05
-۰.۶۲	۲۸.۲۸	۸۲۸۲.۶۹	۳۶.۹	۸۲۳۱.۲۷	abs1n10
۱.۹۱	۳۶	۱۱۱۵۰.۳۴	۹۰.۸۵	۱۱۳۶۶.۹	abs1n15
۰	۵۱.۸۶	۱۳۳۹۶.۵۵	۲۰۴.۳۱	۱۳۳۹۶.۶	abs1n20
۲.۸	۴۹.۳۷	۱۴۴۰۶.۹۱	۳۳۲.۳۳	۱۴۸۲۱.۹	abs1n25
۴.۳۷	۵۳.۲۳	۲۲۱۵۱.۹۱	۷۲۵.۳۶	۲۳۱۶۴.۵	abs1n30

۴-۷- عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی مطالعه موردی

بالا تر (دورتر از جواب شدنی) می‌شود. و زمانی که ω افزایش می‌یابد استواری راه‌حل افزایش می‌یابد در حالی که استواری مدل کاهش می‌یابد (به جواب شدنی نزدیکتر و از جواب بهینه دورتر می‌شود). شکل (۵) موازنه بین استواری راه‌حل (هزینه کل) و استواری مدل (تقاضای تحقق نیافته یا کمبود) را برای ۷۰ بیمارستان نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنید با افزایش ω از ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ تومان، هزینه کل تا ۸۱۸۶۹۹۸۹۱.۵ افزایش می‌یابد به طوری که تعداد کمبودها به صفر کاهش می‌یابد. یک تصمیم‌گیرنده ریسک‌گریز مقادیر بالای ω را انتخاب می‌کند تا به طور کامل از کمبود اجتناب کند اما تصمیم‌گیرنده ریسک دوست مقادیر پایین ω را برای کاهش هزینه‌های خود برمی‌گزیند. در واقع هر تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به درجه ریسک‌پذیری خود مقداری از ω را انتخاب کند. افزایش λ باعث می‌شود که جواب نهایی به تغییرات داده‌های ورودی حساس‌تر شود [۳۰]. لذا λ در این مطالعه همانند مطالعه انجام شده توسط [۳۷] برابر یک قرار داده می‌شود.

۴-۹- مقایسه دو حالت انتقال و عدم انتقال بین خرده-

فروشان

در این بخش مقایسه‌ای بین هزینه‌ها، سطح موجودی، میزان تولید، تعداد کمبود و تعداد اتلاف در دو حالت انتقال و عدم انتقال بین بیمارستان‌ها برای ۷۰ بیمارستان انجام می‌شود. بدین منظور هزینه کمبود برابر ۷۰۰۰۰ تومان تنظیم می‌شود. همانطور که در شکل (۶) و (۷) مشخص است، هزینه و تعداد کمبود در حالت مجاز بودن انتقال به مراتب کمتر از حالت مجاز نبودن آن می‌باشد. همچنین نتایج نشان داده است که تعداد اتلاف‌ها در دو حالت یکسان و از حداکثر اتلاف برنامه ریزی شده تجاوز نکرده است در واقع انتقال‌ها به کاهش اتلاف‌ها کمک نکرده و اعمال سیاست FIFO برای مصرف و سیاست بهینه برای تولید منجر به عدم اتلاف در دوره‌های زمانی به جز دوره اول در دو حالت مورد بررسی شده است.

۷ دسته مثال شامل ۱۰ تا ۷۰ بیمارستان در ۴ دوره زمانی و سه سناریوی تقاضای کم، متوسط و زیاد از مطالعه موردی ذکر شده ساخته می‌شود. در هر دسته از مثال‌ها هزینه کمبود از ۱۰۰۰۰۰ تومان تا ۱۰۰۰۰۰۰ تغییر می‌کند همچنین ضریب واریانس (λ) برای همه مثال‌ها یک منظور می‌شود. نتایج برای ۱۰، ۳۰ و ۷۰ بیمارستان به صورت مفصل و جداگانه در جداول (۲)، (۳) و (۴) آمده است در حالی که برای کل مثال‌ها، متوسط نتایج در جدول (۵) فراهم شده است. قابل ذکر است که زمان حل توسط الگوریتم شاخه و حد کدنویسی شده در نرم‌افزار GAMS برای مثال‌هایی با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ بیمارستان به ۱۸۰۰ ثانیه و برای مثال‌هایی با ۴۰ بیمارستان به بالا به ۳۶۰۰ ثانیه محدود شده است و حد بالا و پایین به دست آمده توسط این الگوریتم در ستون اول و دوم جداول (۲) - (۴) ارائه شده است ستون سوم مربوط به زمان حل الگوریتم شاخه و حد و ستون چهارم درصد بهبود حد بالا از حد پایین را نشان می‌دهد (درصد بهبود به صورت تفاوت حد پایین از حد بالا تقسیم بر حد پایین ضرب در ۱۰۰ محاسبه می‌شود). ستون پنجم و ششم نیز به ترتیب جواب و زمان حل الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در نهایت، ستون آخر درصد بهبود جواب به دست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی از حد بالای به دست آمده توسط الگوریتم شاخه و حد را ارائه می‌دهد. همانطور که در این جدول (۵) مشاهده می‌کنید با افزایش ابعاد مسئله، کیفیت جواب‌های به دست آمده توسط الگوریتم شاخه و حد کاهش می‌یابد در حالی که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند جواب‌هایی با کیفیت بهتری نسبت به الگوریتم شاخه و حد به دست آورد.

۴-۸- موازنه بین استواری راه‌حل و استواری مدل

همانطور که گفته شد ω منجر به استخراج موازنه بین استواری راه-حل و استواری مدل می‌شود. به طور کلی مقادیر پایین‌تر ω منجر به استواری راه‌حل پایین‌تر (نزدیکتر به جواب بهینه) و استواری مدل

جدول (۲): نتایج به دست آمده از حل مسئله ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم شاخه و کران برای ۱۰ بیمارستان

الگوریتم پیشنهادی			الگوریتم شاخه و حد			هزینه کمبود
درصد بهبود	زمان	جواب	درصد بهبود	زمان	حد پایین	
۰.۰۰	۵.۹۵	۱۰۴۹۸۹۱۵	۰.۰۰	۶	۱۰۴۹۸۹۱۵	۱۰۰۰۰
-۰.۴۵	۷.۳۸	۱۹۴۹۵۵۵۹	-۰.۷۲	۱۸۰۰	۱۹۲۶۸۵۶۳.۲	۲۰۰۰۰
-۲.۸۹	۱۳.۴۵	۲۳۸۴۶۸۴۴	-۱.۵۳	۱۸۰۰	۲۳۱۷۲۸۷۲.۲	۳۰۰۰۰
-۴.۰۵	۷.۹۲	۲۶۳۲۱۰۳۲.۴	-۱.۵۶	۱۸۰۰	۲۴۹۰۲۲۶۵.۶	۴۰۰۰۰
-۳.۵۱	۹.۵۹	۲۸۲۱۳۵۵۷	-۱.۲۳	۱۸۰۰	۲۶۹۲۳۱۷.۸	۵۰۰۰۰
-۲.۱۶	۱۰.۵۲	۲۹۸۹۹۷۰۸.۶	-۱.۲۷	۱۸۰۰	۲۸۸۹۵۶۹۲.۶	۶۰۰۰۰
-۱.۵۴	۷.۹۷	۳۱۲۱۴۹۱۰.۵	-۲.۰۸	۱۸۰۰	۳۰۱۰۲۹۴۴.۱	۷۰۰۰۰
-۱.۸۲	۷.۲۶	۳۲۰۷۹۱۸۳.۴	-۱.۸۰	۱۸۰۰	۳۰۹۳۸۷۵۹.۴	۸۰۰۰۰
-۲.۸۶	۹.۱۶	۳۳۰۹۲۷۸۱.۶	-۱.۵۱	۱۸۰۰	۳۱۶۸۶۴۱۱.۱	۹۰۰۰۰
-۰.۶۸	۱۰.۳۴	۳۳۲۶۸۴۰۱.۵	-۲.۱۲	۱۸۰۰	۳۳۲۴۴۴۷۹.۴	۱۰۰۰۰۰

جدول (۳) نتایج به دست آمده از حل مسئله ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم شاخه و کران برای ۳۰ بیمارستان

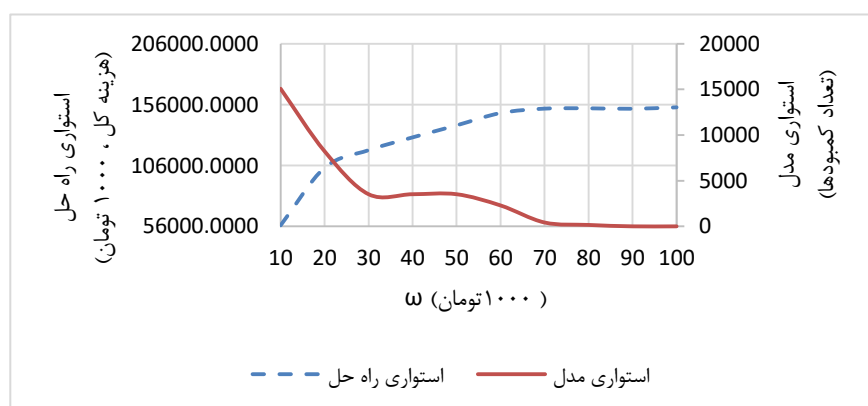
الگوریتم پیشنهادی			الگوریتم شاخه و کران				هزینه کمبود
درصد بهبود	زمان	جواب	درصد بهبود	زمان	حد پایین	حد بالا	
-۱.۲۷	۳۴.۶۳	۳۰۶۲۹۳۵۴.۹	-۰.۴۲	۱۸۰۰	۳۰۱۱۹۶۱۰.۴	۳۰۲۴۵۶۱۱	۱۰۰۰۰
۱.۶۹	۳۲.۴۳	۵۷۱۲۴۹۷۷.۷	-۴.۶۹	۱۸۰۰	۵۵۵۰۴۸۰۰.۵	۵۸۱۰۹۰۱۰.۹	۲۰۰۰۰
۱۱.۹۴	۳۱.۲۲	۶۶۶۷۸۲۹۶.۴	-۱۷.۷۲	۱۸۰۰	۶۴۳۲۲۱۰.۸۸	۷۵۷۱۷۹۰۱.۵	۳۰۰۰۰
۱۳.۹۳	۳۳.۳۵	۷۲۳۹۶۷۲۵	-۲۰.۸۱	۱۸۰۰	۶۹۶۲۱۰۱۹.۴	۸۴۱۱۲۵۰۹.۷	۴۰۰۰۰
۲۲.۸۴	۲۳.۸۶	۷۷۵۰۵۵۳۸	-۳۳.۸۹	۱۸۰۰	۷۵۰۱۶۸۱۹.۴	۱۰۰۴۴۳۳۸۰	۵۰۰۰۰
۱۹.۳۷	۳۶.۶۸	۸۲۸۶۰۹۱۳.۹	-۲۸.۵۸	۱۸۰۰	۷۹۹۲۲۰۶۲.۱	۱۰۲۷۶۲۶۴۲	۶۰۰۰۰
۱۱.۷۷	۳۱.۴۲	۸۵۵۴۷۵۵۰.۷	-۱۷.۱۲	۱۸۰۰	۸۲۷۸۴۳۷۷.۱	۹۶۹۶۰۰۵۱.۷	۷۰۰۰۰
۱۰.۵۹	۲۶.۰۴	۸۷۶۰۱۲۳۵.۳	-۱۵.۷۴	۱۸۰۰	۸۴۶۵۹۱۶۶.۸	۹۷۹۸۱۵۱۹.۱	۸۰۰۰۰
۱۹.۹۰	۲۲.۵۴	۹۰۰۰۶۴۴۵.۷	-۲۹.۶۹	۱۸۰۰	۸۶۶۵۰۱۲۴.۴	۱۱۲۳۷۳۶۰.۵	۹۰۰۰۰
۱۲.۲۹	۳۰.۶۳	۹۱۵۱۲۸۶۴.۶	-۱۷.۷۴	۱۸۰۰	۸۸۶۱۴۹۲۵.۲	۱۰۴۳۳۲۲۶۲.۸	۱۰۰۰۰۰

جدول (۴) نتایج به دست آمده از حل مسئله ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم شاخه و کران برای ۷۰ بیمارستان

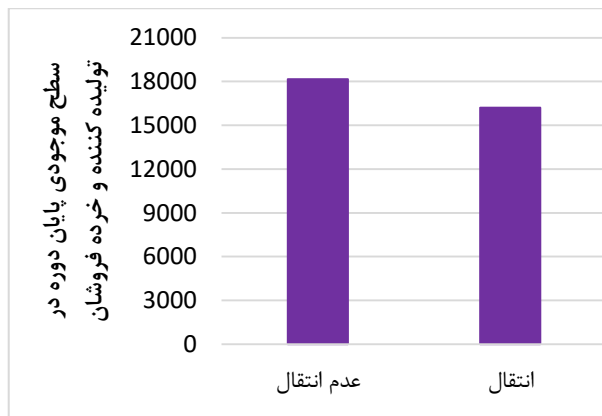
الگوریتم پیشنهادی			الگوریتم شاخه و کران				هزینه کمبود
درصد بهبود	زمان	جواب	درصد بهبود	زمان	حد پایین	حد بالا	
۲.۶۱	۳۵۵.۵۰	۵۶۷۸۵۶۴۹	-۴.۳۸	۳۶۰۰	۵۵۸۶۲۴۳۳	۵۸۳۱۰۴۵۰	۱۰۰۰۰
۷۰.۷۷	۳۱۹.۱۳	۱۰۴۰۹۷۱۹۶.۴	-۲۵۲.۲۶	۳۶۰۰	۱۰۱۱۰۷۵۲۰.۹	۳۵۶۱۶۳۸۹۱.۵	۲۰۰۰۰
۷۱.۳۶	۴۴۰.۱۶	۱۱۸۵۵۶۷۸۲.۶	-۲۶۱.۶۲	۳۶۰۰	۱۱۴۴۷۹۷۱۱.۲	۴۱۳۹۸۰۸۹۱.۵	۳۰۰۰۰
۷۲.۶۴	۲۷۳.۹۸	۱۲۹۰۶۲۲۹۸.۵	-۲۷۷.۲۱	۳۶۰۰	۱۲۵۰۷۶۱۷۶.۱	۴۷۱۷۹۷۸۹۱.۵	۴۰۰۰۰
۷۳.۷۶	۴۸۹.۹۲	۱۳۸۹۶۱۳۷۰	-۲۹۰.۴۳	۳۶۰۰	۱۳۵۶۴۷۵۱۶.۴	۵۲۹۶۱۴۸۹۱.۵	۵۰۰۰۰
۷۴.۶۳	۲۶۲.۳۳	۱۴۹۰۵۴۷۹۲	-۳۰۶.۵۰	۳۶۰۰	۱۴۴۵۰۹۱۹۵.۷	۵۸۷۴۳۱۸۹۱.۵	۶۰۰۰۰
۷۶.۳۴	۵۴۳.۷۴	۱۵۲۶۸۷۳۱۰	-۳۳۶.۲۷	۳۶۰۰	۱۴۷۹۰۱۷۰۱.۲	۶۴۵۲۴۸۸۹۱.۵	۷۰۰۰۰
۷۸.۲۵	۶۱۷.۵۴	۱۵۲۹۴۳۰۳۹.۸	-۳۷۵.۱۰	۳۶۰۰	۱۴۷۹۸۳۰۰.۴	۷۰۳۰۶۵۸۹۱.۵	۸۰۰۰۰
۷۹.۹۵	۵۵۷.۷۲	۱۵۲۵۷۱۰۵۷.۷	-۴۱۴.۰۶	۳۶۰۰	۱۴۸۰۱۴۹۱۵.۱	۷۶۰۸۸۲۸۹۱.۵	۹۰۰۰۰
۸۱.۲۲	۴۰۹.۵۱	۱۵۳۷۴۸۶۷۳.۲	-۴۵۳.۱۶	۳۶۰۰	۱۴۸۰۰۵۰۷۹.۹	۸۱۸۶۹۹۸۹۱.۵	۱۰۰۰۰۰

جدول (۵) متوسط نتایج به دست آمده از حل مسئله ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم شاخه و کران

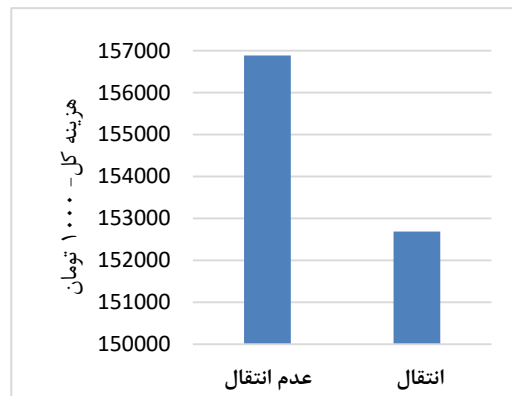
الگوریتم پیشنهادی			الگوریتم شاخه و کران				تعداد بیمارستان‌ها
درصد بهبود	زمان	جواب	درصد بهبود	زمان	حد پایین	حد بالا	
-۲.۱۲	۳.۷۰	۲۶۷۹۳۰۸۹.۳	-۱.۵۴	۱۶۲۰.۶۰	۲۵۸۳۸۱۲۲	۲۶۲۳۶۷۲۲.۱	۱۰
۰.۸۱	۲.۹۹	۴۹۹۸۳۸۳۲.۷	-۳.۸۳	۱۶۴۲.۹	۴۸۵۳۳۱۸۳.۶	۵۰۳۹۳۷۶۲.۵	۲۰
۱۴.۰۴	۳.۴۴	۷۴۱۸۶۳۹۰.۲	-۲۰.۳۳	۱۸۰۰	۷۱۷۲۱۵۰۱.۴	۸۶۳۰۳۸۴۹.۴	۳۰
۲۱.۹۸	۱.۴۶	۹۱۰۷۵۷۶۶.۴	-۳۰.۰۳	۳۶۰۰	۸۹۷۶۹۰۶۵.۶	۱۱۶۷۲۶۴۳۲.۹	۴۰
۷۰.۵۶	۳.۲۹	۱۰۴۱۳۱۰۹۶.۴	-۲۵۰.۸۲	۳۶۰۰	۱۰۰۸۱۳۲۰۶.۴	۳۵۳۶۷۶۹۸۶.۱	۵۰
۷۳.۶۲	۲.۸۶	۱۱۶۵۵۱۸۰۲.۴	-۲۸۹.۹۴	۳۶۰۰	۱۱۳۳۱۰۹۹۵.۳	۴۴۱۸۴۱۲۰۶.۶	۶۰
۷۵.۵۲	۳.۱۴	۱۳۰۸۴۶۸۱۶.۹	-۳۲۱.۳۵	۳۶۰۰	۱۲۶۸۵۸۷۲۵.۳	۵۳۴۵۱۹۷۴۷.۴	۷۰



شکل (۵): موازنه بین استواری مدل و استواری راه حل



شکل (۹): مقایسه سطح موجودی پایان دوره در حالت انتقال و عدم انتقال بین خرده‌فروشان



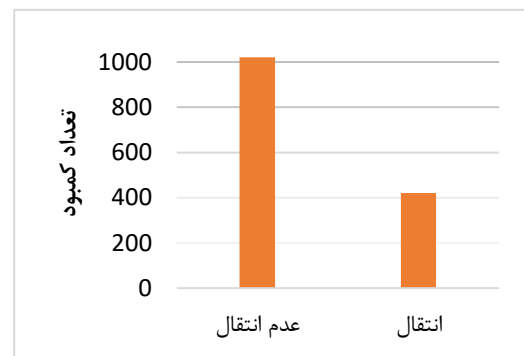
شکل (۶): مقایسه هزینه‌ی کل در حالت انتقال و عدم انتقال بین خرده‌فروشان

۵- نتیجه‌گیری

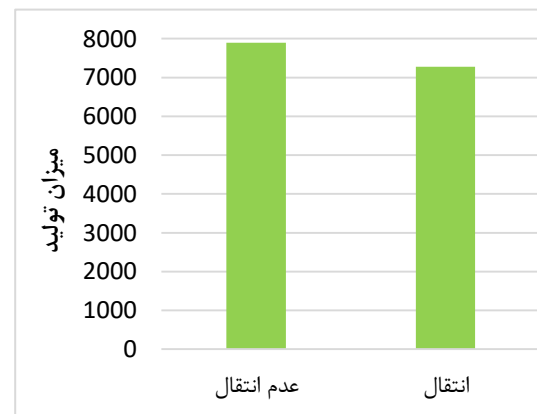
در این مقاله، مسئله یکپارچه تولید- موجودی- مسیریابی استوار تحت عدم قطعیت تقاضای محصول فاسدشدنی در شبکه‌ای شامل یک تولیدکننده و مجموعه‌ای از خرده‌فروشان، مورد بررسی قرار گرفت. مسئله ذکر شده علاوه بر مدیریت تولید، موجودی و برنامه‌ریزی توزیع، سیاست FIFO را برای مصرف در خرده‌فروشان و همچنین انتقال‌ها بین خرده‌فروشان به منظور مقابله با عدم قطعیت تقاضای مشتریان، در نظر می‌گیرد. عملکرد مسئله پیشنهادی بر روی یک مطالعه موردی در رابطه با خدمات انتقال خون تهران مورد بررسی قرار گرفت. اما از آنجایی که زمان حل توسط الگوریتم دقیق شاخه و حد برای مطالعه موردی ذکر شده بسیار بالا و جواب‌ها بسیار نامطلوب بود یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله پیشنهاد شد که توانست جواب‌هایی با کیفیت خوب و زمان حل پایین به دست آورد. همچنین الگوریتم پیشنهادی بر روی مجموعه داده‌های موجود در ادبیات اجرا شد نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی بسیار کارا تر از الگوریتم ALNS از لحاظ زمان و کیفیت جواب‌هاست. در نهایت مقایسه‌ای میان دو حالت انتقال و عدم انتقال انجام گردید که نشان داده شد انتقال می‌تواند باعث کاهش مقدار تولید، کمبود، سطح موجودی و در نتیجه منجر به کاهش هزینه کل گردد. با توجه به نوآوری‌های ذکر شده این مقاله در بخش دوم، مطالعه حاضر می‌تواند با لحاظ برگشت محصولات استفاده نشده از خرده‌فروشان به تولید کننده، در نظر گرفتن مسیریابی برای انتقال‌های انجام شده بین خرده‌فروشان در طول دوره زمانی و لحاظ پنجره زمانی برای تحویل محصول فاسدشدنی به خرده‌فروشان توسعه یابد.

مراجع

- [1] Gong, W., Fu, Z., (2010). "ABC-ACO for perishable food vehicle routing problem with time windows. In Computational and Information Sciences (ICCIS)", International Conference on, Chengdu, 1261-1264.
- [2] Xunyu, X., Tomohiro, M., (2010). "Perishable goods delivery and scheduling with time window



شکل (۷): مقایسه تعداد کمبود در حالت انتقال و عدم انتقال بین خرده‌فروشان



شکل (۸): مقایسه میزان تولید در حالت انتقال و عدم انتقال بین خرده‌فروشان

با توجه به شکل (۸)، میزان تولید در صورت عدم انتقال میان خرده‌فروشان بیشتر می‌باشد، در واقع، زمانی که خرده‌فروشی دچار مازاد محصول است می‌تواند به خرده‌فروشی که با کمبود روبرو شده، محصول منتقل کرده و مانع از تولید و هزینه اضافه گردد. همچنین سطح موجودی پایان دوره‌ی در تولیدکننده و خرده‌فروشان در صورت عدم انتقال بیشتر بوده که باعث هزینه اضافه نگهداری موجودی می‌گردد (شکل ۸). با توجه موارد ذکر شده، انتقال بین خرده‌فروشان باعث کاهش هزینه‌های اضافی و در نتیجه کاهش هزینه کل به علاوه کاهش کمبود در خرده‌فروشان می‌گردد.

- [15] Civelek, I., Karaesmen, I., & Scheller-Wolf, A. (2015). Blood platelet inventory management with protection levels, *European Journal of Operational Research*, 243(3): 826-838.
- [16] Haijema, R., van der Wal, J., & van Dijk, N. M. (2007). Blood platelet production: Optimization by dynamic programming and simulation, *Computers & Operations Research*, 34(3): 760-779.
- [17] Haijema, R., van Dijk, N., van der Wal, J., & Sibinga, C. S. (2009). Blood platelet production with breaks: optimization by SDP and simulation, *International Journal of Production Economics*, 121(2): 464-473.
- [18] Hemmelmayr, V., Doerner, K. F., Hartl, R. F., & Savelsbergh, M. W. (2009). Delivery strategies for blood products supplies, *OR spectrum*, 31(4): 707-725.
- [19] Blake, J., Hedde, N., Hardy, M., Barty, R. (2009). "Simplified platelet ordering using shortage and outdate targets".
- [20] Lang, J.C., (2010). "Blood bank inventory control with transshipments and substitutions". In *Production and inventory management with substitutions*. Springer Berlin Heidelberg, 205-226.
- [21] Duan, Q., Liao, T.W., (2013). "A new age-based replenishment policy for supply chain inventory optimization of highly perishable products", *International Journal of Production Economics*, 145(2): 658-671.
- [22] Broekmeulen, R.A., van Donselaar, K.H., (2009). "A heuristic to manage perishable inventory with batch ordering, positive lead-times, and time-varying demand", *Computers & Operations Research*, 36(11): 3013-3018.
- [23] Adulyasak, Y., Cordeau, J.F., Jans, R., (2015). "The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms". *Computers & Operations Research*, 55: 141-152.
- [24] Solyali, O., Cordeau, J.F., Laporte, G., (2012). "Robust inventory routing under demand uncertainty". *Transportation Science*, 46(3): 327-340.
- [25] Bertsimas, D., Sim, M., (2003). "Robust discrete optimization and network flows", *Mathematical programming*, 98(1): 49-71.
- [26] Bertsimas, D., Sim, M. (2004). "The price of robustness". *Operations research*, 52(1): 35-53.
- [27] Huang, S.H., Lin, P.C., (2010). "A modified antcolony optimization algorithm for multi-item inventory routing problems with demand uncertainty", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5): 598-611.
- [28] Lefever, W., Hadj-Hamou, K., Aghezzaf, E.H. (2015). "Robust inventory routing problem with variable travel times", In *16ème Congrès Annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2015)*.
- [29] Sokol, C.Z.G.N.J., Papageorgiou, M.S.C.D., (2015). "Robust inventory routing with flexible time window allocation", Working paper.
- by genetic algorithm", In *2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Hong Kong and Macau, 587-592.
- [۳] طالعی‌زاده، ع.، صالحی، ع. (۱۳۹۴). مدل کنترل موجودی با طول دوره بازپرسازی تصادفی و پرداخت معوقه برای کالاهای فسادپذیر، *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید* ۳(۵): ۱۳-۲۵.
- [4] Coelho, L.C., Laporte, G., (2014). "Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products", *Computers & Operations Research*, 47: 42-52.
- [5] Federgruen, A., Prastacos, G., Zipkin, P.H., (1986). "An allocation and distribution model for perishable products", *Operations Research*, 34(1): 75-82.
- [6] Zaeri, M. S., Shahrabi, J., Pariazar, M., Morabbi, A., (2007). "A combined spatial cluster analysis-traveling salesman problem approach in location-routing problem: A case study in Iran", In *2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Singapore, 1599-1602.
- [7] Farahani, P., Grunow, M., Günther, H.O., (2012). "Integrated production and distribution planning for perishable food products", *Flexible services and manufacturing journal*, 24(1): 28-51.
- [8] Chen, H. K., Hsueh, C.F., Chang, M.S., (2009). "Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products", *Computers & operations research*, 36(7): 2311-2319.
- [9] Seyedhosseini, S.M., Ghoreyshi, S.M., (2014). "An integrated model for production and distribution planning of perishable products with inventory and routing considerations", *Mathematical Problems in Engineering*, 1-9.
- [10] Zu, L., Li, W., Kurz, M.E., (2014). "Integrated Production and distribution problem with pickup and delivery and multiple trips", In *Proceedings of the 2014 Industrial Engineering Research Conference*.
- [11] Gunpinar, S., Centeno, G., (2015). "Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals", *Computers & Operations Research*, 54: 129-141.
- [12] Fontaine, M.J., Chung, Y.T., Rogers, W.M., Sussmann, H D., Quach, P., Galel, S.A., Erhun, F., (2009). "Improving platelet supply chains through collaborations between blood centers and transfusion services", *Transfusion*, 49(10): 2040-2047.
- [13] Nagurney, A., Masoumi, A.H., Yu, M., (2012). "Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization", *Computational Management Science*, 9(2): 205-231.
- [14] Munson, C. (2013). *The Supply Chain Management Casebook: Comprehensive Coverage and Best Practices in SCM*. Pearson Education.

- [30] Mulvey, J.M., Ruszczyński, A., (1995). "A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization", *Operations research*, 43(3): 477-490.
- [31] Yu, C.S., Li, H.L., (2000). "A robust optimization model for stochastic logistic problems", *International Journal of Production Economics*, 64(1): 385-397.
- [32] Coelho L.C, Cordeau J.F, Laporte G., (2011). "The inventory-routing problem with transshipment", *Technical Report 21, CIRRELT, Montreal, Canada*.
- [33] Croes, G.A., (1958). "A method for solving traveling-salesman problems", *Operations research*, 6(6): 791-812.
- [34] Coelho, L.C., Cordeau, J.F., Laporte, G., (2012). "Consistency in multi-vehicle-inventory routing", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24: 270-287.
- [35] Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, A., Speranza, M.G., (2012). "A hybrid heuristic for an inventory routing problem", *INFORMS Journal on Computing*, 24(1): 101-116.
- [۳۶] مجیدی، س.، حسینی مطلق، س. م.، یعقوبی، س.، جوکار، ع. (۱۳۹۴). ارائه مدل ریاضی مسیریابی سبز با در نظر گرفتن محدودیت گذاشت و برداشت همزمان و پنجره زمانی سخت و یک روش حل ابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی انطباقی، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید ۳(۶): ۱۴۹-۱۶۵.
- [37] Lalmazloumian, M., Wong, K.Y., Govindan, K., Kannan, D., (2013). "A robust optimization model for agile and build-to-order supply chain planning under uncertainties", *Annals of Operations Research*, 242(2): 1-36.



A robust mathematical model and heuristic solution algorithm for integrated production-routing-inventory problem of perishable products with lateral transshipment

F. Jafarkhan¹, S. Yaghoubi^{2,*}

¹ Department of Economics, Institute for management and planning studies, Tehran, Iran.

² School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 August 2016

Accepted 26 February 2017

Keywords:

Integrated production- routing-
inventory problem

Perishable product

Heuristic solution algorithm

Transshipment

Robust optimization

ABSTRACT

In this paper, a robust mathematical model for integrated production-routing- inventory problem of perishable product under uncertain demand in a network consisting of a producer and set of retailers, is presented, where the transshipment among retailers is considered to deal with uncertainty of customers' demand. Moreover, the tradeoff between the solution robustness and model robustness can help in decision making about planning of deliveries, the quantity of production and the quantity of transshipment among retailers. Since the mentioned problem is in category of NP-Hard problems, a heuristic solution algorithm is proposed for solving it that guide the solution to a better solution through conducting the best change in vehicle routes in each step of search. Finally, the proposed algorithm is applied on benchmark instances from literature and a real case study, that results reveal the effectiveness of the algorithm in terms of time and quality of solutions.

* Corresponding author. Saeed Yaghoubi

Tel.: 021-73225053; E-mail address: yaghoubi@iust.ac.ir