



## یکپارچه سازی حمل و نقل کالاهای شرکت های تأمین کننده خودروسازی بدون حضور انبار موقت و حل توسط الگوریتم ابتکاری آزاد سازی

محمد حسام شعلائی<sup>۱</sup>، محمد رنجبر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجو ارشد صنایع، دانشگاه فردوسی؛ Hesam\_Shaelaie@stu.um.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی؛ M\_Ranjbar@um.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش با مجموعه‌ای از تولیدکنندگان خرد (تأمین کنندگان) سروکار داریم که همگی در حومه شهر مشهد با فاصله اندکی از یکدیگر قرار گرفته و به تأمین قطعات مورد نیاز شرکت ایران خودرو (مصرف کننده) مشغول هستند. هدف این مطالعه پیدا کردن برنامه زمانی برای ادغام و ارسال محصولات تأمین کنندگان است به طوری که تقاضای روزانه مصرف کننده را تأمین سازد، نرخ تولید تأمین کنندگان را در نظر بگیرد و نهایتاً هزینه حمل و نقل را کمینه کند. بدین منظور یک مدل عدد صحیح خطی با عنوان مدل یکپارچه ارائه نموده‌ایم که باعث ایجاد هماهنگی بیشتر در بین تأمین کنندگان شده و بدین سبب باعث کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌شود. حل دقیق مسئله در ابعاد کوچک توسط نرم افزار CPLEX صورت گرفته و برای حل مسئله در ابعاد واقعی یک الگوریتم ابتکاری طراحی شده که ترکیبی از روش آزاد سازی و حل دقیق می‌باشد. با مقایسه جواب‌های حاصل از الگوریتم ابتکاری و حل دقیق، کیفیت و کارایی الگوریتم ابتکاری سنجیده شده و نتایج آن ارائه گردیده است.

### کلمات کلیدی

زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی حمل و نقل، الگوریتم ابتکاری، برنامه‌ریزی عدد صحیح

## Integrating the parts transportation problem without cross docking for car companies' suppliers using a relaxation heuristic method

Mohammad Hesam Shaelaie, Mohammad Ranjbar

M.Sc. Student of Industrial Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Associate Professor of Industrial Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

### ABSTRACT

In this research, we aim to develop a methodology to reduce the transportation costs occurred in a car supply chain. For this purpose, we consider a set of car parts suppliers, placed in suburb of Mashhad which send their products to the Iran Khodro Co., placed in Tehran suburb. The goal of this study is to find a schedule to integrate the suppliers' products and distribute them in order to meet the daily demand of Iran Khodro Co. The objective is to minimize the transportation and inventory costs by considering the production rates of suppliers. In this regard, we propose an integrated transportation system approach in which all suppliers cooperate with each other following a master transportation plan. In order to evaluate the developed method, a linear integer programming model is presented. Since solving this model by available commercial solvers is considerably time consuming, a heuristic solution approach has been developed. Finally, the efficiency of the proposed solution approach has been evaluated and compared using randomly generated test instances.

### KEYWORDS

Supply chain, Transportation planning, Heuristic method, Integer programming



## ۱- مقدمه

در این پژوهش سیستم حمل و نقل تولیدکنندگان قطعات مورد نیاز خودرو سازهایی نظیر ایران خودرو مورد مطالعه قرار گرفته و سعی شده برای بهبود وضعیت کنونی آن راهکاری پیشنهاد شود. در وضعیت کنونی تأمین کنندگان قطعات شرکت ایران خودرو، محصولات خود را اغلب از طریق حمل و نقل جاده‌ای ارسال می‌کنند. هر تأمین کننده بر اساس قراردادی که با شرکت ایران خودرو تنظیم کرده موظف است که در زمان مقرر کالاهای خواسته شده را به شرکت تحویل دهد. از این رو تأمین کنندگان با محدودیت‌های زمانی روبرو هستند و از طرفی ظرفیت محدودی برای تولید کالا در اختیار دارند. به همین خاطر اغلب در ارسال‌های خود نمی‌توانند از تمامی ظرفیت وسایل حمل و نقل بهره بگیرند. حال شرایطی را فرض کنید که تمامی تأمین کنندگان تحت یک سیستم متمرکز فعالیت کنند و این سیستم از نرخ مصرف و میزان موجودی کالاها در شرکت ایران خودرو و همچنین از نرخ تولید تأمین کنندگان و میزان موجودی آن‌ها مطلع باشد. از این رو، این سیستم می‌تواند برای حمل و نقل کالاها برنامه جامع‌تر و آگاهانه‌تری طراحی کند چرا که به واسطه این آگاهی می‌توان کالاهای چندین تولیدکننده را تجمیع و با یک وسیله حمل و نقل ارسال کرد. بدین صورت می‌توان از سهم بیشتری از ظرفیت وسایل حمل و نقل استفاده کرد و هزینه حمل و نقل را کاهش داد. در این پژوهش با بررسی شرایط حاکم بر شرکت تولیدی ایران خودرو و شرکت‌های نظیر آن در یافتیم، تولیدکنندگانی که قطعات مورد نیاز این شرکت‌ها را تأمین می‌کنند اغلب به صورت توده‌ای در مکانی صنعتی مشغول به فعالیت هستند و کمتر تأمین کننده‌ای را می‌توان یافت که به صورت منزوی، در مکانی دور از تأمین کنندگان دیگر قرار داشته باشد. بنابراین تولیدکنندگان را می‌توان به طور کلی به مجموعه‌هایی تقسیم کرد که در فاصله‌ای اندک (کمتر از پنج کیلومتر) از یکدیگر در مکانی صنعتی مشغول فعالیت هستند در این صورت می‌توان برای هر یک از این مجموعه‌ها یک سیستم یکپارچه حمل و نقل در نظر گرفت و نتایج این پژوهش را برای شرکت‌های تأمین کننده قطعات خودرو که در شهرهای دیگر واقع شده‌اند نیز تعمیم داد. از آنجایی که مسئله مورد پژوهش از روی یک مورد واقعی استنباط شده و دارای ماهیتی بین رشته‌ای (مسیریابی و کنترل موجودی) است، می‌توان گفت که بین موضوع این مسئله و بسیاری از زمینه‌های تحقیقات گرایش‌هایی وجود دارد؛ از جمله نزدیک‌ترین این زمینه‌های می‌توان به تعیین اندازه سفارش (Inventory Lot sizing problem)، مسیریابی- موجودی (Production routing problem) اشاره کرد. در مسائل تعیین اندازه سفارش تأکید بر تعادل سطح موجودی تأمین کننده و مشتری است، در شرایطی که ممکن است تقاضای تصادفی باشد، وجود و عدم وجود کمبود در این مسائل دخیل باشد و ... [۱]-[۲]. مسائل مسیریابی- موجودی و مسیریابی- تولید تلفیقی از مسائل کنترل موجودی و مسیریابی ارائه کرده‌اند در شرایطی که ممکن است تقاضای قطعی و یا تصادفی باشد، مسیرهای ایجاد شده باز و یا بسته باشند، یک تأمین کننده وجود داشته باشد و یا چندین تأمین کننده حضور داشته باشند و ... [۳]-[۴]. موضوع این پژوهش علاوه بر اینکه از یک مورد واقعی استنباط شده، دارای نوآوری‌هایی بوده که عبارت‌اند از؛ دخیل کردن محدودیت ظرفیت انبار چه برای مشتری و چه برای تأمین کنندگان، وجود تنوع در ظرفیت وسایل حمل و نقل، در نظر گرفتن حجم و وزن قطعات و ارائه الگوریتم نوین به جهت حل مسئله. در این پژوهش یک سیستم متمرکز پیشنهاد گردیده و برای آن یک مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی طراحی شده است. حل دقیق مدل بر روی نمونه مسئله‌های کوچک و متوسط توسط نرم افزار CPLEX انجام و نتایج آن‌ها در بخش آخر ارائه شده است. از آنجایی که حل مدل در ابعاد واقعی بسیار زمان‌بر می‌باشد، یک الگوریتم حل ابتکاری به نام الگوریتم آزاد سازی طراحی شده به واسطه آن مسائل با ابعاد بزرگ بررسی و حل می‌شوند. این الگوریتم در کنار حفظ کیفیت جواب‌ها توانسته زمان حل مسئله را به طرز چشم‌گیری کاهش دهد.

## ۲- تعریف مسئله

در این مسئله با دو مجموعه از نقاط سروکار داریم؛ مجموعه (S) را به عنوان مجموعه تأمین کنندگان و مجموعه تک عضوی (C) را به عنوان مجموعه مشتری تعریف می‌کنیم. تولیدات اعضای مجموعه اول برای مشتری یا مجموعه دوم ارسال می‌شوند. فاصله زمانی لازم برای رسیدن کالای ارسالی از مجموعه اول به مجموعه دوم، بر اساس مطالعه موردی برابر با یک روز کاری و فاصله زمانی جابجایی بین نقاط درون هر مجموعه تقریباً برابر با صفر در نظر گرفته شده است چرا که زمان جابجایی بین نقاط درون هر مجموعه در مقایسه با فاصله زمانی جابجایی بین دو مجموعه، ناچیز تلقی می‌گردد. در این پژوهش یک مدل ریاضی برای سیستم حمل و نقل یکپارچه پیشنهاد شده است. باقی مفروضات مسئله به صورت خلاصه عبارت است از: ۱- میزان عرضه روزانه هر قطعه توسط کلیه تأمین کننده و تقاضای آن توسط مشتری برابر و ثابت است. ۲- برای هر قطعه، جمع میزان تقاضای روزانه با جمع میزان عرضه روزانه برابر است. ۳- تأمین کنندگان (قطعه سازان)



حداکثر حجم مجاز بار وسیله $v$	$ql_v$
هزینه ثابت استفاده از وسیله $v$	$fc_v$
هزینه نگهداری یک واحد قطعه $p$ در یک دوره (روز) توسط تأمین کننده	$h_p$
موجودی اولیه و یا موجودی دوره اول قطعه $p$ در انبار	$IS_{ps1}$
تأمین کننده $s$ قبل از ارسال $(IS_{ps1} \geq m_{ps})$	$IC_{p1}$
موجودی اولیه و یا موجودی دوره اول قطعه $p$ در انبار مشتری پس از دریافت کالا $(IC_{p1} \geq d_p)$	$TQ_{sp}^{max}$
حداکثر قابلیت ذخیره سازی تأمین کننده $s$ از تعداد کالای نوع $p$ در انبار خود	$TQ_p^{max}$
افق زمان با اندیس $t$	$T$
عددی بسیار بزرگ	$M$

### جدول ۳. تعریف متغیرها

متغیر	تعریف
$X_{psvt}$	میزان قطعه نوع $p$ که از تأمین کننده $s$ به مشتری توسط وسیله $v$ در ابتدای روز $t$ ارسال می شود
$IS_{pst}$	میزان موجودی تأمین کننده $s$ از قطعه $p$ که در ابتدای روز $t$ قبل از ارسال کالا محاسبه می شود
$IC_{pt}$	میزان موجودی مشتری از قطعه $p$ که در ابتدای روز $t$ پس از دریافت کالا محاسبه می شود
$Y_{vt}$	برابر یک است اگر وسیله $v$ در روز $t$ جهت حمل بار استفاده شود و صفر در غیر اینصورت

در این مدل فرض شده که تمامی تأمین کنندگان و مشتری تحت سیستم یکپارچه با یکدیگر در ارتباط باشند از این رو هر تأمین کننده برای ارسال کالای خود می تواند به تمامی وسایل حمل و نقل دسترسی داشته باشد، در ادامه مدل مسئله ارائه می شود.

$$\text{Minimize } \sum_{v=1}^{|V|} \sum_{t=1}^T fc_v Y_{vt} + \sum_{p=1}^{|P|} \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{t=1}^T h_p (IS_{pst} - m_{ps}/2) \quad (1)$$

$$\text{S. t. } \sum_{p=1}^{|P|} \sum_{s=1}^{|S|} w_p X_{psvt} \leq w_l v \cdot Y_{vt} \quad \begin{matrix} v = 1, \dots, |V| \\ t = 1, \dots, T \end{matrix} \quad (2)$$

همه در یک مکان (اطراف مشهد) قرار دارند. ۴- فاصله بین تأمین کنندگان و مشتری ثابت (فاصله تهران- مشهد) و مسیر آن ها کاملاً مشخص است. ۵- چندین نوع وسیله حمل و نقل در مسئله وجود دارد که ظرفیت و هزینه استفاده از هر یک از آن ها مشخص است مانند: انواع کامیون، تریلی و غیره. ۶- هر نوع وسیله حمل و نقل محدودیت حجم و وزن برای قطعات دارد که بسته به نوع وسیله حمل و نقل متفاوت است. ۷- هزینه حمل و نقل تنها شامل هزینه ثابت ارسال می- باشد. ۸- تعداد هر نوع از وسایل نقلیه به اندازه ای در نظر گرفته شده است که هیچ گونه محدودیتی برای ارسال کالا وجود نداشته باشد. ۹- ارسال هر مقدار بار از هر تأمین کننده در ابتدای روز مشخص و در ابتدای روز بعد توسط مشتری دریافت می شود. ۱۰- از هر قطعه مقداری موجودی اولیه در انبار مشتری و هر تأمین کننده وجود دارد. این مقدار موجودی باید در انتهای دوره برنامه ریزی برابر با میزان موجودی شروع دوره برنامه ریزی باشد. ۱۱- انبار مشتری و کلیه تأمین کنندگان برای انبارش کلیه محصولات بخش بندی شده است و بخش مربوط به هر قطعه دارای ظرفیت مشخصی بر اساس تعداد صحیحی از آن محصول است. ۱۲- تعداد موجودی های اولیه کلیه قطعات برای هر تأمین کننده (مشتری) از ظرفیت بخش مربوطه در انبار تأمین کننده (مشتری) بیشتر نخواهد بود. ۱۴- ارسال و دریافت کالا در کلیه دوره ها مجاز است. در ادامه مجموعه های تعریف شده برای مدل مسئله در جدول ۱، پارامترهای تعریف شده در جدول ۲ و متغیرهای مسئله در جدول ۳ نمایش داده شده است.

### جدول ۱. تعریف مجموعه ها

مجموعه	تعریف
$S = \{1, \dots,  S \}$	مجموعه تأمین کنندگان به تعداد $ S $ و با اندیس $s$
$P = \{1, \dots,  P \}$	مجموعه قطعات به تعداد $ P $ و با اندیس $p$
$V = \{1, \dots,  V \}$	مجموعه وسایل حمل و نقل به تعداد $ V $ و اندیس $v$

### جدول ۲. تعریف پارامترها

پارامتر	تعریف
$d_p$	میزان تقاضای روزانه مشتری از قطعه $p$
$m_{ps}$	میزان تولید روزانه تأمین کننده $s$ از قطعه $p$
$w_p$	وزن یک عدد قطعه $p$
$q_p$	حجم یک عدد قطعه $p$
$wl_v$	حداکثر وزن مجاز بار وسیله $v$



که تمامی تولیدات در طی دوره باید ارسال شوند تا سطح موجودی ابتدای دوره مشتری و تأمین‌کنندگان برابر با موجودی انتهای دوره آن‌ها باشد. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که تمامی ارسال‌های مربوط به یک نوع کالا در یک روز مشخص نباید از موجودی ابتدای آن روز بیشتر باشد. در ادامه محدودیت (۸) برای حداقل سطح موجودی مشتری تعریف می‌شود که نباید از میزان مصرف روزانه آن کمتر باشد. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) حداکثر ظرفیت انبار تأمین‌کنندگان و مشتری را برای نگهداری کالاها بیان می‌کنند. آخرین محدودیت نوع متغیرهای مسئله را مشخص می‌نماید که در آن  $\mathbb{Z}^+$  بیانگر مجموعه‌ی اعداد صحیح غیر منفی می‌باشد. لازم به ذکر است که عدم مجاز بودن کمبود با غیر منفی در نظر گرفتن متغیرها رعایت شده است.

### ۳- روش حل (الگوریتم آزاد سازی)

به طور کلی روند این الگوریتم را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود؛ در مرحله اول مقدار کالاهای ارسالی در هر دوره توسط هر تأمین‌کننده تعیین می‌شود و در مرحله دوم، کالاهای تعیین شده به وسایل حمل‌ونقل تخصیص می‌یابند. برای دستیابی به جواب بهینه نمی‌توان این دو مرحله را به صورت مجزا از هم حل نمود؛ مرحله نخست در تخصیص بهینه کالا به وسایل حمل‌ونقل و مرحله دوم در تعیین مقدار کالای ارسالی تأثیرگذار است. بنابراین برای رسیدن به جواب بهینه باید منافع هر دوی این بخش‌ها را به صورت هم زمان در نظر گرفت که در این راستا الگوریتم گرد کردن سعی دارد با حفظ ارتباط این دو بخش مسئله را حل نماید. این الگوریتم در مرحله نخست با کم رنگ کردن و حذف برخی محدودیت‌های مسئله تخصیص (مرحله دوم) سعی دارد مقدار کالای ارسالی در هر دوره را به دست آورد، به طوری که حضور و نقش هزینه‌های تخصیص به طور کامل نادیده گرفته نشود. پس از آنکه مقدار کالای ارسالی تعیین گردید، در مرحله دوم تخصیص بهینه کالا به وسایل حمل‌ونقل صورت خواهد گرفت.

### ۳-۱- تعیین مقدار ارسال

در این بخش دو متغیر  $X_{pskt}$  و  $Y_{kt}$  را جایگزین متغیرهای  $X_{psvt}$  و  $Y_{vt}$  نموده و مدل ریاضی حاصل را مدل ثانویه می‌نامیم. حضور اندیس  $k$  در متغیرهای  $X_{pskt}$  و  $Y_{kt}$  بیانگر تنوع مسائل حمل‌ونقل بوده که در مجموعه محدود  $\{1, \dots, |K|\}$  تعریف شده و دامنه‌ی این دسته از متغیرها بر روی بازه اعداد صحیح غیر منفی قرار دارد. برای حل مدل ثانویه در ابتدا متغیرهای آن را آزاد کرده و مسئله را با نرم افزار CPLEX حل می‌نماییم. برای این کار متغیرهای پیوسته  $X'_{pskt}$ ،  $IS'_{pst}$  و  $IC'_{pt}$  را به ترتیب جایگزین متغیرهای گسسته  $X_{pskt}$ ،  $IS_{pst}$

$$\sum_{p=1}^{|P|} \sum_{s=1}^{|S|} q_p X_{psvt} \leq q_l v \cdot Y_{vt} \quad v = 1, \dots, |V|; \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$IS_{pst} = IS_{ps,t-1} + m_{ps} - \sum_{v=1}^{|V|} X_{psv,t-1} \quad (4)$$

$s = 1, \dots, |S|; \quad p = 1, \dots, |P|; \quad t = 2, \dots, T$

$$IC_{pt} = IC_{p,t-1} - d_p + \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{v=1}^{|V|} X_{psv,t-1} \quad (5)$$

$p = 1, \dots, |P|; \quad t = 2, \dots, T$

$$\sum_{v=1}^{|V|} \sum_{t=1}^{|T|} X_{psvt} = T m_{ps} \quad s = 1, \dots, |S|; \quad p = 1, \dots, |P| \quad (6)$$

$$\sum_{v=1}^{|V|} X_{psvt} \leq IS_{pst} \quad p = 1, \dots, |P|; \quad s = 1, \dots, |S|; \quad t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$IC_{pt} \geq d_p \quad p = 1, \dots, |P|; \quad t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$IS_{pst} \leq T Q_{sp}^{max} \quad p = 1, \dots, |P|; \quad s = 1, \dots, |S|; \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$IC_{pt} \leq T Q_p^{max} \quad p = 1, \dots, |P|; \quad t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$IS_{pst}, IC_{pt}, X_{psvt}, Y_{vt} \in \mathbb{Z}^+ \quad p = 1, \dots, |P|; \quad t = 1, \dots, T; \quad s = 1, \dots, |S|; \quad v = 1, \dots, |V| \quad (11)$$

در این مدل تابع هدف (۱) هزینه کل را کمینه می‌کند. بخش اول تابع هدف، مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل را بیان می‌کند و بخش دوم آن شامل هزینه‌های نگهداری تأمین‌کننده است که از حاصل ضرب واحد هزینه نگهداری کالا در متوسط موجودی روزانه آن به دست می‌آید. محدودیت‌های (۲) و (۳) ارتباط موجود بین دو متغیر  $Y_{vt}$  و  $X_{psvt}$  را بیان می‌کند و همچنین ظرفیت وسایل حمل‌ونقل را نیز در محاسبات دخیل می‌کند. محدودیت (۴) سطح موجودی هر کالا از هر تأمین‌کننده را در ابتدای روز و قبل از ارسال کالا تعیین می‌کند. محدودیت (۵) سطح موجودی هر کالا را برای مشتری در ابتدای روز و پس از دریافت کالا محاسبه می‌نماید. تعادل عرضه و تقاضا در محدودیت (۶) در نظر گرفته شده است، این محدودیت بیان می‌کند





کالای بیشتر در انبار تأمین کننده است و از این رو ممکن است تأمین کننده ظرفیت لازم برای ذخیره کردن کالای اضافه را نداشته باشد. محدودیت دیگری که ممکن است تحت تأثیر به پایین گرد کردن متغیرهای اصلی قرار گیرد، مربوط به نیاز مشتری می باشد. ممکن است با گرد کردن متغیر  $X'_{pst}$  به پایین نتوان نیاز مشتری به کالا  $p$  را در دوره  $t + 1$  و یا دوره های بعد از  $t + 1$  را برطرف سازیم. محدودیت (۸) ارتباط سطح موجودی مشتری و متغیر  $X'_{pst}$  را به بیان می کند. روش حل ارائه شده در این قسمت بر مبنای برخی از ویژگی های موجود در مدل مسئله می باشد که پس از آزاد سازی متغیرهای مسئله به وجود آمده اند. به همین خاطر لازم می دانیم در مرحله اول این ویژگی ها را مرور کرده و پس از آن روش حل را توضیح می دهیم. بر این اساس داریم: (۱) مجموعه موجودی ابتدا و انتهای دوره هر تأمین کننده از کالاهای خود، مقدار صحیح خواهد بود. میزان تولید روزانه تأمین کنندگان نیز به صورت عدد صحیح فرض شده است، بنابراین مجموع میزان کل کالاهای ارسالی هر تأمین کننده (چه با آزادسازی متغیرهای و چه بدون آن) برابر با عدد صحیح خواهد بود. قالب ریاضی این مسئله به صورت زیر بیان می شود:

$$\sum_{t=1}^{|T|} X'_{pst} \in \mathbb{Z}^+ \quad \begin{matrix} p = 1, \dots, |P|; \\ s = 1, \dots, |S| \end{matrix} \quad (12)$$

$$X'_{pst} \geq 0 \quad \begin{matrix} p = 1, \dots, |P|; \\ t = 1, \dots, T; \\ s = 1, \dots, |S| \end{matrix} \quad (13)$$

(۲) اگر مقدار  $X'_{pst}$  غیر صحیح باشد؛ به این معنی است که کالایی از نوع  $p$  وجود دارد که قبل از دوره  $t$  به طور کامل تولید و در دوره  $t$  بخشی از آن ارسال شده است. (۳) در هر دوره و توسط هر تأمین کننده حداکثر یک کالا به صورت ناقص ارسال می شود. (۴) مشتری تا زمانی که یک واحد کالا را به صورت کامل (و نه کسری از آن) را دریافت نکرده باشد نمی تواند آن را مصرف نماید، چرا که میزان مصرف مشتری در هر دوره یک مقدار صحیح فرض شده است. (۵) در مدل  $MIP$  ارسال ناقص یک کالا تنها زمانی رخ خواهد داد که محدودیت ظرفیت وسایل حمل و نقل فعال مؤثر واقع شده باشد. (۶) در جواب حاصل از مدل  $MIP$  امکان ارسال کالای ناقص بر اساس ظرفیت انبار تأمین کنندگان و یا مشتری وجود ندارد، چرا که ظرفیت هر دوی این ها بر اساس تعداد صحیحی از کالاها بیان شده است.

### ۳-۲- تعیین مجموع مقدار ارسال در هر دوره ( $X'_{pt}$ )

در گام نخست این الگوریتم مقادیر متغیرهای  $X'_{pst}$  بر روی اندیس

$IC_{pt}$  کرده و مدل جدید را با عنوان مدل آزاد شده ( $MIP$ ) معرفی می نماییم.  $Y_{kt}$  تنها متغیر عدد صحیح موجود در مدل  $MIP$  می باشد که در این مدل دست نخورده باقی می ماند.

بدیهی به نظر می رسد که اگر در جواب به دست آمده متغیرها مقدار صحیح اختیار کرده باشند، جواب حاصل برای مدل ثانویه بهینه نیز خواهد بود اما در واقع چنین اتفاقی تنها در شرایط خاص رخ می دهد و در اغلب موارد جواب به دست آمده شامل چندین متغیر با مقدار اعشاری می باشد که این امر جواب حاصل را غیر قابل قبول خواهد کرد. بنابراین باید متغیرهایی که مقدار اعشاری اختیار کرده اند را به عدد صحیح تبدیل نمود تا جواب حاصل مورد قبول واقع شود.

پس از حل شدن مدل  $MIP$  اطلاعات مربوط به کنترل موجودی از متغیرهای این مدل استخراج شده و اطلاعات مربوط به وسایل حمل و نقل آن نا دید گرفته می شود؛ برای این کار متغیر  $X'_{pst}$  با جمع بستن بر روی اندیس  $k$  جایگزین متغیر  $X'_{pskt}$  می شود و اطلاعات متغیر  $Y_{kt}$  از مسئله حذف می شود. حال باید مقادیر غیر صحیح متغیرهای  $X'_{pst}$ ،  $IS'_{pst}$  و  $IC'_{pt}$  به مقادیر صحیح تبدیل گردند. مقادیر متغیرهای  $IS'_{pst}$  و  $IC'_{pt}$  وابسته به متغیر  $X'_{pst}$  می باشند از این رو فرآیند گرد کردن با مقادیر متغیر  $X'_{pst}$  آغاز می شود. گرد کردن متغیرهای  $X'_{pst}$  ممکن است باعث نقض برخی از محدودیت ها شود. در ادامه به منظور سهولت در نمایش مقادیر گرد شده متغیرهای اصلی از نماد  $X'_{pst}^{new}$  استفاده می شود، همچنین برای نمایش مقادیر جدید سایر متغیرها که تحت تأثیر گرد کردن متغیر اصلی مقادیر آن ها تغییر کرده به ترتیب از نمادهای  $IS_{pst}^{new}$  و  $IC_{pt}^{new}$  بجای متغیرهای  $IS'_{pst}$ ،  $IC'_{pt}$  استفاده خواهد شد.

گرد کردن متغیر  $X'_{pst}$  به بالا این مفهوم را در پی دارد که کالای بیشتری از محصول  $p$  توسط تأمین کننده  $s$  در دوره  $t$  ارسال می شود. با انجام چنین اقدامی و با رعایت محدودیت های (۴) و (۵) ممکن است سطح موجودی تأمین کننده  $s$  در دوره  $t$  منفی شود ( $IS_{pst}^{new} \leq 0$ ) که چنین اتفاقی باعث غیر قابل قبول شدن جواب خواهد شد. دسته دیگری از محدودیت ها که با گرد کردن متغیر  $X'_{pst}$  به بالا امکان غیر مجاز شدن آن ها وجود دارد مربوط به ظرفیت نگهداری مشتری می باشد. با ارسال بیشتر کالا در دوره  $t$  این امکان وجود دارد که مشتری ظرفیت لازم برای نگهداری آن ها را نداشته باشد که این موضوع از طریق محدودیت (۱۰) نمایش داده شده است. از طرفی گرد کردن متغیر اصلی  $X'_{pst}$  به پایین ممکن است باعث نقض شدن محدودیت (۹) گردد که به منظور رعایت ظرفیت انبار تأمین کننده در نظر گرفته شده است. گرد کردن متغیر اصلی به پایین به معنی ذخیره کردن



مسئله را رعایت نماید. برای انتخاب تأمین کننده مناسب مجموعه  $G$  به صورت  $G = \{\delta_i\}$  تعریف می شود که در آن  $\delta_i = (\delta_i^1, \delta_i^2, \delta_i^3)$  به صورت یک سه تایی نمایش داده می شود. متغیر سه تایی  $\delta_i$  اطلاعات تأمین کننده ای را در خود ذخیره می کند که در طول یک بازه زمانی یک واحد کالا را به صورت ناقص ارسال کرده است. برای این کار  $\delta_i^1$  اندیس تأمین کننده را در خود نگهداری می کند،  $\delta_i^2$  اولین دوری است که تأمین کننده  $S$  یک واحد کالا را به صورت ناقص ارسال کرده است و  $\delta_i^3$  بیانگر اولین دوری که ارسال تمامی بخش های کالا به اتمام رسیده است. در ادامه فرآیند گرد کردن به صورت گام های الگوریتم زیر خلاصه می شود:

**گام ۱.** قرار دهید:  $t = 1$

**گام ۲.** به ازای هر  $S \in S$  قرار دهید  $X_{pst}^{new} = \lfloor X_{pst}' \rfloor$  و همچنین

$$L_{pt} = \sum_{s=1}^{|S_p|} \lfloor X_{pst}' \rfloor$$

**گام ۳.** اگر  $L_{pt}$  برابر با  $X_{pt}'$  باشد به گام ۶ بروید در غیر این صورت مجموعه  $G'$  که زیر مجموعه  $G$  می باشد را به صورت  $G' = \{\delta_i | \delta_i \in G, \delta_i^2 \leq t\}$  تشکیل دهید.

**گام ۴.** از میان اعضای مجموعه  $G'$  عضوی مانند  $\delta_i^*$  را انتخاب

نمایید که کوچک تری مقدار  $\delta_i^3$  را داشته باشد. قرار دهید  $X_{p\delta_i^*t}^{new} =$

$$L_{pt} = L_{pt} + 1 + X_{p\delta_i^*t}^{new}$$

**گام ۵.** سه تایی مربوط به  $\delta_i^*$  را از مجموعه های  $G$  و  $G'$  حذف نمایید. اگر مقدار  $L_{pt}$  کوچک تر از  $X_{pt}'$  باشد به گام ۴ بروید و در غیر این صورت به گام ۶ بروید.

**گام ۶.** اگر  $t < T$  قرار دهید  $t = t + 1$  و به گام دوم باز گردید، در غیر این صورت توقف نمایید.

### ۳-۴- تخصیص کالا به وسایل نقلیه

برای این کار از یک مدل ریاضی تخصیص بهره گرفته شده است، بر این اساس یک مدل تخصیص ایجاد و با نرم افزار CPELX حل می شود. لازم به یادآوری است که در این مدل  $X_{pst}^{new}$  ها دیگر متغیر نبوده و به عنوان پارامتر در مدل ظاهر می شوند.

$$\text{Minimize } \sum_{v=1}^{|V|} \sum_{t=1}^T f_{cv} Y_{vt} \quad (14)$$

**S. t.**

$$\sum_{p=1}^{|P|} \sum_{s=1}^{|S|} w_p X_{psvt} \leq w_l v \cdot Y_{vt} \quad \begin{matrix} v = 1, \dots, |V|; \\ t = 1, \dots, T \end{matrix} \quad (15)$$

$S$  جمع شده و در متغیر  $X_{pt}'$  قرار داده می شود. متغیر  $X_{pt}'$  نمایانگر تمامی حجم ارسالی از کالای  $p$  در دوره  $t$  می باشد. روند کلی الگوریتم بدین صورت می باشد که بخش اعشاری متغیرهای  $X_{pt}'$  برای چندین دوره متوالی با یکدیگر جمع می شود و در دورهای که مجموع اعشارها (دوره  $t^*$ ) از یک بیشتر شود، یک واحد به میزان ارسال دوره  $t^*$  اضافه و قسمت اعشار دوره های پیش از  $t^*$  حذف خواهد. گام های الگوریتم به صورت زیر خلاصه می شود:

**گام ۱.** قرار دهید:  $t' = 1$  و  $\sum_{s=1}^{|S|} X_{pst}' = dec$  و  $dec = 0$

**گام ۲.** اگر  $\forall t \geq t': X_{pt}' \in \mathbb{Z}^+$  توقف نمایید و در غیر این صورت قرار دهید:  $\tau = \min_{t \geq t'} \{t | X_{pt}' \notin \mathbb{Z}^+\}$

**گام ۳.** قرار دهید:

$$t^* = \min_{t \geq \tau} \{t | \sum_{t=\tau}^t (X_{pt}' - \lfloor X_{pt}' \rfloor) \geq 1\}$$

**گام ۴.** مجموعه  $RD$  را به صورت  $RD = \{X_{pt}' | \tau \leq t \leq t^*\}$  تعریف کنید.

**گام ۵.** مقدار متغیر  $dec$  را به صورت زیر محاسبه کنید:

$$dec = \sum_{t=\tau}^{t^*} (X_{pt}' - \lfloor X_{pt}' \rfloor)$$

**گام ۶.** تمامی اعضای مجموعه  $RD$  را به پایین گرد کنید و قرار

$$\text{دهید } X_{pt}^{*'} = \lfloor X_{pt}^{*'} \rfloor + dec$$

**گام ۷.** اگر  $t < T$  باشد قرار دهید  $t' = t^*$ ،  $RD = \emptyset$ ،  $dec =$

$0$  و به گام ۲ بروید، در غیر این صورت توقف نمایید.

### ۳-۳- محاسبه مقدار ارسال هر تأمین کننده

در این بخش میزان ارسال تک تک تأمین کنندگان به گونه ای باید مشخص گردد که برآیند آن ها مقادیر  $X_{pt}'$  را تأمین نماید. در هر دوره حداقل ارسال با متغیرهای  $L_{pt}$  نمایش داده می شود که مقادیر آن ها از مجموع جزء صحیح مقادیر متغیرهای  $X_{pst}'$  حاصل می شود  $(L_{pt} = \sum_{s=1}^{|S_p|} \lfloor X_{pst}' \rfloor)$ . اختلاف بین دو متغیر  $X_{pt}'$  و  $L_{pt}$  مبنای عملکرد الگوریتم می باشد. اگر مقدار  $L_{pt}$  برابر با  $X_{pt}'$  باشد؛ برای به دست آوردن مقدار  $X_{pst}^{new}$  تنها کافی ست مقدار  $X_{pst}^{new}$  را برابر با مقدار جزء صحیح  $X_{pst}'$  قرار دهیم  $(X_{pst}^{new} = \lfloor X_{pst}' \rfloor)$  اما اگر مقدار  $L_{pt}$  کمتر از مقدار  $X_{pt}'$  باشد؛ الگوریتم از میان تأمین کنندگان محصول  $p$  یک عضو را انتخاب کرده و یک واحد به میزان ارسال آن اضافه می نماید و به این ترتیب مقدار  $L_{pt}$  نیز یک واحد افزایش پیدا می کند و این روند تا زمانی ادامه خواهد داشت که  $L_{pt}$  و  $X_{pt}'$  برابر شوند، در این میان نحوه انتخاب تأمین کننده باید به گونه ای باشد که محدودیت های

CPLEX 12.3 با محدودیت زمانی ۲ ساعت حل شده که نتایج حاصل از آن در جدول ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است که محاسبات صورت گرفته توسط کامپیوتری با پردازشگر Intel® Pentium® 2.9GH و مقدار حافظه ۴ GB انجام شده است. همان طور که در جدول ۶ مشاهده می‌نمایید، میانگین مقدار زمان محاسباتی برای الگوریتم کمتر از ۲ ثانیه است که این امر نشان از کارایی الگوریتم می‌باشد. بیشترین اختلاف تقریباً ۴ درصد و میانگین اختلاف جواب‌ها کمتر از ۱ درصد می‌باشد، از این رو می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم پیشنهادی کیفیت و کارایی خوبی در حل مسائل مدل یکپارچه داشته است.

هدف از انجام این مقاله، یکپارچه‌سازی تأمین‌کنندگان به جهت کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌باشد؛ به این منظور یک مدل عدد صحیح پیشنهاد شده است. از آنجایی که حل این مدل در نرم افزارهای موجود تحقیق در عملیات بسیار زمان‌بر است، یک روش ابتکاری مبتنی بر آزاد سازی پیشنهاد گردیده که از کارایی و کیفیت بسیار مناسبی برخوردار می‌باشد.

$$\sum_{p=1}^{|P|} \sum_{s=1}^{|S|} q_p X_{psvt} \leq q_{lv} \cdot Y_{vt} \quad \begin{matrix} v = 1, \dots, |V|; \\ t = 1, \dots, T \end{matrix} \quad (16)$$

$$\sum_{v=1}^{|V|} X_{psvt} = X_{pst}^{new} \quad \begin{matrix} p = 1, \dots, |P|; \\ s = 1, \dots, |S|; \\ t = 1, \dots, T \end{matrix} \quad (17)$$

$$\begin{matrix} X_{psvt} \in \mathbb{Z}^+ \\ Y_{vt} \in \{0,1\} \end{matrix} \quad \begin{matrix} p = 1, \dots, |P|; \\ s = 1, \dots, |S|; \\ v = 1, \dots, |V|; \\ t = 1, \dots, T \end{matrix} \quad (18)$$

#### ۴- نتایج محاسباتی و جمع‌بندی

با مراجعه به شرکت ساپکوی خراسان رضوی اطلاعات کلی در پیرامون پژوهش به دست آمد و بر اساس آن‌ها ۱۰ نمونه مسئله تعریف شد که جزئیات آن در جدول ۶ نمایش داده شده است. در این جدول T به عنوان طول دوره بررسی، |P| به عنوان تعداد تنوع کالا، |S| به عنوان تعداد تأمین‌کنندگان و |V| به عنوان تعداد وسایل حمل‌ونقل تعریف شده است. داده‌ها تعریف شده توسط بسته نرم‌افزار IBM ILOG

جدول ۶. نتایج محاسباتی مقایسه‌ای

شماره داده	T	S	P	V	حل دقیق		الگوریتم آزاد سازی		درصد اختلاف
					هزینه کل	زمان (ثانیه)	هزینه کل	زمان (ثانیه)	
۱	۶	۲	۴	۶	۲۲۶۵/۴۴	۰/۱۱	۲۲۶۵/۵۳	۰/۱	۰
۲	۶	۲	۶	۱۵	۳۳۳۵/۲۶	۱/۲۵	۳۳۳۵/۶	۰/۱	۰/۰۱
۳	۶	۲	۸	۳۰	۲۴۳۲/۲۴	۱۸/۷۶	۲۴۳۴/۴۱	۰/۴۸	۰/۰۸
۴	۶	۴	۴	۱۸	۱۷۳۲/۹۳	۳۵/۷۹	۱۷۴۳/۳۲	۰/۸۲	۰/۴۲
۵	۶	۴	۶	۲۸	۱۷۵۷/۵۴	۷۰/۶۵	۱۷۶۰/۷۳	۱/۱۴	۰/۱۸
۶	۶	۴	۸	۷۹	۴۵۰۵/۳۲	۳۶۱/۲۱	۴۵۱۵/۱۲	۲/۴۲	۰/۲۱
۷	۶	۶	۴	۴۹	۲۴۶۶/۳۳	۱۹۴/۶	۲۵۰۶/۲۹	۱/۱۷	۱/۶۲
۸	۶	۶	۶	۷۰	۳۴۸۱/۶۱	۸۶۳/۸۹	۳۴۹۴/۵۳	۳	۰/۳۷
۹	۶	۶	۸	۸۲	۷۶۵۰/۴۲	۷۲۰۰	۷۹۶۱/۴۲	۴/۲	۴/۰۶
۱۰	۶	۸	۴	۳۶	۳۵۶۵/۳۴	۴۷۷/۵۶	۳۶۰۲/۰۵	۳/۱	۱/۰۳
میانگین داده‌ها					۳۳۱۹/۵۵	۹۲۲/۳۷	۳۳۶۱/۸۵	۱/۶۳	۰/۸

## ۵- مراجع

Coelho, L. C., Cordeau, J. F., Laporte, G.; "Thirty years of inventory routing", *Transportation Science*, 48, 1-19, 2013.

Adulyasak, Y., Cordeau, J. F., Jans, R.; "The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms", *Computers & Operations Research*, 55, 141-152, 2015.

[۳]

[۴]

Glock, C. H.; "The joint economic lot size problem: A review", *International Journal of Production Economics*, 135, 671-686, 2012.

Kimms, A.; "Multi-level lot sizing and scheduling: methods for capacitated, dynamic, and deterministic models", Springer Science & Business Media, 2012.

[۱]

[۲]