



ارائه مدلی برای یکپارچه سازی حمل و نقل کالاهای شرکت‌های تأمین‌کننده خودروسازی بدون در نظر گرفتن انبار موقت و حل توسط الگوریتم ابتکاری

محمد حسام شعلائی^a، محمد رنجبر^b

^{a,b} گروه مهندسی صنایع دانشگاه فردوسی، مشهد

نویسنده مسئول: محمد حسام شعلائی (Hesam_Shaelaie@stu.um.ac.ir)

چکیده

در این پژوهش با مجموعه‌ای از تولیدکنندگان خرد (تأمین‌کنندگان) سروکار داریم که همگی در حومه شهر مشهد با فاصله اندکی از یکدیگر قرار گرفته و به تأمین قطعات مورد نیاز شرکت ایران خودرو (مصرف‌کننده) مشغول هستند. هدف این مطالعه پیدا کردن برنامه زمانی برای ادغام و ارسال محصولات تأمین‌کنندگان است به طوری که تقاضای روزانه مصرف‌کننده را تأمین سازد، نرخ تولید تأمین‌کنندگان را در نظر بگیرد و نهایتاً هزینه حمل و نقل را کمینه کند. بدین منظور یک مدل عدد صحیح خطی با عناوین مدل یکپارچه ارائه نموده‌ایم که باعث ایجاد هماهنگی بیشتر در بین تأمین‌کنندگان شده و بدین سبب باعث کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌شود. حل دقیق مسئله در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار CPLEX صورت گرفته و برای حل مسئله در ابعاد واقعی یک الگوریتم ابتکاری طراحی شده است. 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: لجستیک، یکپارچه‌سازی، برنامه‌ریزی حمل و نقل، الگوریتم ابتکاری

۱. مقدمه

در این پژوهش سیستم حمل و نقل قطعات خودرو که توسط شرکت‌های قطعه ساز اطراف شهر مشهد تولید و به شرکت‌های خودروسازی نظیر ایران خودرو و سایپا فرستاده می‌شوند، مورد مطالعه قرار گرفته و سعی شده برای بهبود وضعیت کنونی آن راهکارهایی پیشنهاد شود. در وضعیت کنونی تأمین‌کنندگان قطعات شرکت ایران خودرو، محصولات خود را اغلب از طریق حمل و نقل جاده‌ای ارسال می‌کنند. هر تأمین‌کننده 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 تأمین‌کنندگان با محدودیت‌های زمانی روبرو هستند و از طرفی ظرفیت محدودی برای تولید کالا در اختیار دارند. به همین خاطر اغلب در ارسالات خود نمی‌توانند از تمامی ظرفیت وسایل حمل و نقل بهره بگیرند. حال شرایطی را فرض کنید که تمامی تأمین‌کنندگان 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 تأمین‌کنندگان 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 دریافتیم، تولیدکنندگانی که قطعات مورد نیاز این شرکت‌ها را تأمین می‌کنند اغلب به صورت توده‌ای در مکانی صنعتی مشغول به فعالیت هستند و کمتر تأمین‌کننده‌ای را می‌توان یافت که به صورت منزوی، در مکانی دور از تأمین‌کنندگان 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 تأمین‌کننده 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 (Lot sizing problem)، مسیریابی-موجودی (Inventory routing problem) و مسیریابی-تولید (Production routing problem) اشاره کرد. در مسائل تعیین اندازه سفارش تأکید بر تعادل سطح موجودی تأمین‌کننده و مشتری است، در شرایطی که ممکن است تقاضای تصادفی باشد، وجود و عدم وجود کمبود در این مسائل دخیل باشد و ... [1]–[2]. 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 تأمین‌کننده وجود داشته باشد و یا چندین تأمین‌کننده حضور داشته باشند و

... [3]-[4]. 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 تأمین‌کنندگان، وجود تنوع در ظرفیت وسایل حمل‌ونقل 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 نرم‌افزار 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 حل یک دوره‌ای 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.

۳. تعریف مسئله

لازم به یادآوری است در این مسئله، صرفاً بر مسئله حمل‌ونقل کالا شرکت‌های خودروسازی متمرکز هستیم. از این رو تنها با بخشی از تولیدات تأمین‌کنندگان سروکار خواهیم داشت که برای شرکت‌های خودروسازی تولید و ارسال می‌شوند. در این مسئله با دو مجموعه از نقاط سروکار داریم؛ مجموعه (S) را به عنوان مجموعه تأمین‌کنندگان و مجموعه تک عضوی (C) را به عنوان مجموعه مشتری تعریف می‌کنیم. مجموعه S شامل عناصری شود که در یک مکان صنعتی حضور دارند و فاصله بین آن‌ها بسیار نزدیک و قابل چشم‌پوشی است. 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 حمل‌ونقل یکپارچه پیشنهاد شده است. باقی مفروضات مسئله به صورت خلاصه عبارت است از: ۱- میزان عرضه روزانه هر قطعه توسط کلیه تأمین‌کننده 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- تأمین‌کنندگان (قطعه سازان) همه در یک مکان (اطراف مشهد) و مشتری (خودروسازان) نیز همه در یک مکان (اطراف تهران) قرار دارند. ۴- فاصله بین تأمین‌کنندگان و مشتری ثابت (فاصله تهران-مشهد) و مسیر آن‌ها کاملاً مشخص است. ۵- چندین نوع وسیله حمل‌ونقل در مسئله وجود دارد که ظرفیت و هزینه استفاده از هر یک از آن‌ها مشخص است مانند: انواع کامیون، تریلی و غیره. ۶- هر نوع وسیله‌ی حمل‌ونقل محدودیت حجم و وزن برای قطعات دارد که بسته به نوع وسیله حمل‌ونقل متفاوت است. ۷- هزینه حمل‌ونقل تنها شامل هزینه ثابت ارسال می‌باشد. ۸- تعداد هر نوع از وسایل نقلیه به اندازه‌ای در نظر گرفته شده است که در هر دوره فارغ از حضور دیگر انواع وسایل حمل‌ونقل قادر به ارسال کلیه محصولات باشد. ۹- ارسال هر مقدار بار از هر تأمین‌کننده که در ابتدای یک روز مشخص انجام می‌شود، در ابتدای روز بعد توسط مشتری دریافت می‌شود. ۱۰- از هر قطعه مقداری موجودی اولیه در انبار مشتری و هر تأمین‌کننده وجود دارد. این مقدار موجودی باید در انتهای دوره برنامه‌ریزی برابر با میزان موجودی شروع دوره برنامه‌ریزی باشد. علاوه بر این از هر قطعه مقداری موجودی اطمینان در انبار مشتری نگهداری می‌شود. ۱۱- انبار مشتری و کلیه تأمین‌کنندگان برای انبارش کلیه محصولات بخش‌بندی شده است و بخش مربوط به هر قطعه دارای ظرفیت مشخصی بر اساس تعداد صحیحی از آن محصول است. ۱۲- تعداد موجودی‌های اولیه کلیه قطعات برای هر تأمین‌کننده (مشتری) از ظرفیت بخش مربوطه در انبار تأمین‌کننده (مشتری) بیشتر نخواهد بود. ۱۳- از هر نوع وسیله حمل‌ونقل به تعداد کافی برای هر تأمین‌کننده وجود دارد. ۱۴- ارسال و دریافت کالا در کلیه دوره‌ها مجاز است. در ادامه مجموعه‌های تعریف شده برای مدل مسئله در جدول ۱، پارامترهای تعریف شده در جدول ۲ و نهایتاً متغیرهای مسئله در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۱. تعریف مجموعه‌ها

مجموعه	تعریف
$S = \{1, \dots, S \}$	مجموعه تأمین‌کنندگان 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 حمل‌ونقل 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 تأمین‌کننده 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
ql_v	حداکثر حجم مجاز بار وسیله v
fc_v	هزینه ثابت استفاده از وسیله v
h_p	هزینه نگهداری یک واحد قطعه p در یک دوره (روز) توسط تأمین‌کننده

$(IS_{ps1} \geq m_{ps})$	موجودی اولیه و یا موجودی دوره اول قطعه p در انبار تأمین‌کننده s قبل از ارسال	IS_{ps1}
$(IC_{p1} \leq d_p)$	موجودی اولیه و یا موجودی دوره اول قطعه p در انبار مشتری پس از دریافت کالا	IC_{p1}
	حداکثر قابلیت ذخیره‌سازی تأمین‌کننده s از تعداد کالای نوع p در انبار خود	TQ_{sp}^{max}
	حداکثر قابلیت ذخیره‌سازی مشتری 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 تأمین‌کننده s به مشتری توسط وسیله v ام در ابتدای روز t ارسال می‌شود
IS_{pst}	میزان موجودی تأمین‌کننده s از قطعه p که در ابتدای روز t قبل از ارسال کالا محاسبه می‌شود
IC_{pt}	میزان موجودی مشتری از قطعه p که در ابتدای روز t پس از دریافت کالا محاسبه می‌شود
Y_{vt}	برابر یک است اگر وسیله v ام در روز t جهت حمل بار استفاده شود و صفر در غیر اینصورت

در این مدل فرض شده که تمامی تأمین‌کنندگان و مشتری تحت سیستم یکپارچه با یکدیگر در ارتباط باشند از این رو هر تأمین‌کننده برای ارسال کالا خود می‌تواند به‌تمامی وسایل حمل‌ونقل دسترسی داشته باشد، در ادامه مدل مسئله ارائه می‌شود.

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

S. t.

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

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

$$IS_{pst} = IS_{ps,t-1} + m_{ps} - \sum_{v=1}^{|V|} X_{psv,t-1} \quad s = 1, \dots, |S|; \quad p = 1, \dots, |P|; \quad t = 2, \dots, T \quad (4)$$

$$IC_{pt} = IC_{p,t-1} - d_p + \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{v=1}^{|V|} X_{psv,t-1} \quad p = 1, \dots, |P|; \quad t = 2, \dots, T \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

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 X_{psvt} و Y_{vt} 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 که تمامی تولیدات در طی دوره باید ارسال شوند

تا سطح موجودی ابتدای دوره مشتری و تأمین کنندگان 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 تأمین کنندگان 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.

۴. روش حل (الگوریتم حل یک دوره‌ای)

همان‌طور که از نام الگوریتم پیداست، روند کلی الگوریتم به صورت دوره به دوره خواهد بود. در هر دوره مشتری تقاضای مشخصی دارد که باید آن‌ها را برآورده ساخت اما تأمین این نیاز به سادگی قابل محاسبه نیست و برآورد کردن آن با رعایت محدودیت‌هایی همراه است. از طرفی نگاه مجزا به یک دوره و صرفاً برنامه‌ریزی برای آن بدون در نظر گرفتن دوره‌های قبل و بعد آن امکان پذیر نیست چرا که هر دوره با دوره‌های قبل و بعد خود مرتبط بوده و بدون در نظر گرفتن این ارتباطات نمی‌توان به برنامه‌ریزی جامعی دست یافت. با این طرز نگرش می‌توان گفت حتی دوره نخست افق برنامه‌ریزی از آخرین دوره مجزا نیست (با وجود اینکه فاصله بین این دو دوره در مواردی بسیار زیاد می‌باشد) و تصمیماتی که در دوره نخست گرفته می‌شود به قطع در تصمیمات دوره آخر تأثیرگذار خواهد بود. آشکار است که وجود چنین ارتباطی دشواری مسئله را دو چندان می‌نماید. الگوریتم یک دوره‌ای شامل سه مرحله اصلی است؛ تعیین مقدار ارسال در هر دوره، تخصیص کالاها به وسایل حمل‌ونقل و نهایتاً تخصیص کالاها به تأمین کنندگان. مهم‌ترین و تأثیرگذارترین بخش در حل مسئله تعیین مقدار ارسال در هر دوره است. در هر دوره باید محدودیت‌هایی را برای تعیین مقدار ارسال رعایت نمود. الگوریتم پیشنهادی در هر دوره $t = 1, \dots, T$ ؛ ابتدا میزان حداقل نیاز به ارسال کالای نوع p را مشخص می‌کند که مقدار آن را با R_{pt}^{min} نشان می‌دهیم. به منظور مشخص نمودن این مقدار برای هر نوع کالا و هر دوره باید محدودیت‌های تأمین کنندگان آن نوع کالا و همچنین محدودیت‌های مشتری را در نظر گرفت. از دیدگاه مشتری حداقل ارسال کالای نوع p در یک دوره t به معنی حداقل کالای نوع p است که باید توسط وی دریافت شود تا به واسطه آن‌ها مشتری با کمبود آن نوع کالا مواجه نگردد. حداقل ارسال از دیدگاه تأمین‌کننده به معنی مقدار کالا نوع p است که با ارسال آن‌ها حجمی از فضای انبار تأمین‌کننده آزاد می‌شود. مقدار فضای آزاد شده به انضمام فضای از پیش موجود، این امکان را برای تأمین‌کننده مهیا می‌سازد تا در ذخیره سازی موجودی انتهای دوره خود با مشکلی مواجه نگردد. پس از آنکه حداقل نیاز به ارسال تمامی انواع کالا توسط این الگوریتم مشخص شد، بحث ارسال مازاد بر نیاز مطرح می‌شود. هدف از ارسال مازاد بر نیاز کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل به جهت استفاده بهینه از ظرفیت وسایل حمل‌ونقل می‌باشد. الگوریتم برای تعیین این مقدار ابتدا حداکثر توان ارسال را مشخص می‌کند که مقدار آن را با نماد R_{pt}^{max} نمایش می‌دهد. پس از آن الگوریتم بر مبنای R_{pt}^{max} مقدار ارسال مازاد بر نیاز را محاسبه می‌نماید. محاسبه مقدار حداکثر توان ارسال همانند حداقل ارسال باید از هر دو دیدگاه مشتری و دیدگاه تأمین‌کننده مورد بررسی قرار گیرد. آشکار است که مشتری فضای محدودی برای ذخیره کردن کالای نوع p در اختیار دارد (TQ_p^{max}) و قسمت خالی این فضا مقدار حداکثر توان ارسال را از دیدگاه مشتری مشخص می‌کند. از طرف دیگر سطح موجودی کلیه تأمین‌کنندگان از کالای نوع p در دوره t $(\sum_{s=1}^{|S|} IS_{pst})$ محدودیتی است که حداکثر توان ارسال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در گام دوم الگوریتم نحوه تخصیص مناسب کالاها به وسایل حمل‌ونقل مطرح می‌شود. در این مرحله برای حجم کالای ارسالی از پیش تعیین شده، یک مدل ریاضی تخصیص در داخل الگوریتم طراحی و به وسیله نرم افزار CPLEX حل می‌شود. جواب حاصل، تخصیص بهینه را مشخص می‌کند. لازم به توضیح است که زمان حل بهینه مدل تخصیص توسط نرم‌افزار مذکور در مقایسه با مدل بسیار کوتاه‌تر است که دلیل آن کاهش قابل توجه تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای مسئله می‌باشد. در بخش سوم کالاهای ارسالی به تأمین‌کنندگان تخصیص داده می‌شوند. یادآوری می‌کنیم که برخی از کالاها توسط چندین تأمین‌کننده تولید و ارسال می‌شوند، از این رو نحوه تخصیص کالا بین تأمین‌کنندگان حائز اهمیت است، به طوری که تخصیص نادرست کالا می‌تواند در محاسبه R_{pt}^{min} برای دوره‌های آینده ($\tau = t + 1, \dots, T$) تأثیرگذار باشد و باعث افزایش هزینه حمل‌ونقل گردد. در ادامه مراحل و گام‌های الگوریتم حل یک دوره‌ای به طور خلاصه شرح داده شده و پس از آن اطلاعات جامع مربوط به نحوه سازوکار هر گام در بخش مربوطه به تفصیل بررسی و شرح داده می‌شود. بدین منظور، ابتدا نمادهای مورد استفاده مطابق جدول ۴ معرفی شده و به واسطه آن‌ها گام‌های الگوریتم توضیح داده می‌شود.

جدول ۴. متغیرهای تعریف شده در الگوریتم حل یک دوره‌ای

تعریف	نماد
مقدار حداکثر کالای نوع p قابل ارسال از طرف کلیه تأمین‌کنندگان در دوره t	R_{pt}^{max}
مقدار حداقل کالای نوع p قابل ارسال از طرف کلیه تأمین‌کنندگان در دوره t	R_{pt}^{min}
حداکثر کالای نوع p قابل ارسال از طرف تأمین‌کننده s در دوره t	r_{pst}^{max}
حداقل کالای نوع p قابل ارسال از طرف تأمین‌کننده s در دوره t	r_{pst}^{min}
حداکثر کالای نوع p قابل دریافت توسط مشتری در دوره $t + 1$	ρ_{pt}^{max}
حداقل کالای نوع p قابل دریافت توسط مشتری در دوره $t + 1$	ρ_{pt}^{min}
مقدار کالای نوع p ارسال شده توسط تأمین‌کننده s در دوره t	χ_{pst}
مقدار کالای نوع p ارسال شده توسط وسیله نقلیه v در دوره t	χ_{pvt}

χ_{pt}	جمع متغیر χ_{pst} بر روی اندیس s
α_{pt}	درصد ارسال مازاد بر نیاز کالای نوع p در دوره t
pr_{ps}	معیار اولویت‌بندی تخصیص کالای نوع p به تأمین‌کننده s

در ادامه گام‌های کلی الگوریتم حل یک دوره‌ای آورده شده است.

- گام ۱. قرار دهید: $t = 1$
- گام ۲. مقادیر R_{pt}^{min} و R_{pt}^{max} برای $p = 1, \dots, |P|$ محاسبه کنید.
- گام ۳. مقادیر ارسال χ_{pt} را در دوره t را بر اساس R_{pt}^{min} و R_{pt}^{max} بدست آورید.
- گام ۴. مقادیر Y_{pt} را در دوره t بر اساس مدل تخصیص و توسط نرم‌افزار CPLEX به دست آورید.
- گام ۵. مقادیر ارسال χ_{pt} را به تولیدکنندگان تخصیص دهید.
- گام ۶. اگر $t \leq T$ است، قرار دهید $t = t + 1$ و به گام ۲ بروید.
- گام ۷. هزینه کل را محاسبه کرده و توقف کنید.

۱.۴. محاسبه مقادیر R_{pt}^{min}

هدف از تعریف متغیر R_{pt}^{min} ، به دست آوردن حداقل نیاز به ارسال کالای نوع p در دوره t می‌باشد. بنابراین مقدار R_{pt}^{min} متأثر از دو دسته محدودیت بوده، محدودیت‌هایی که به منظور تأمین حداقل نیاز مشتری در نظر گرفته شده‌اند و محدودیت‌هایی که ظرفیت نگهداری انبار تأمین‌کنندگان را کنترل می‌کنند. حداقل نیاز به ارسال کالای p از دیدگاه مشتری با ρ_{pt}^{min} و حداقل نیاز به ارسال کالای p از دیدگاه تأمین‌کننده با r_{pst}^{min} نمایش داده می‌شود. رعایت نیاز هر دو ذینفع با ماکزیمم‌گیری این دو مقدار به دست می‌آید و بر همین اساس مقدار R_{pt}^{min} به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$R_{pt}^{min} = \max \left(\rho_{pt}^{min}, \sum_{s=1}^{|S|} r_{pst}^{min} \right) \quad p = 1, \dots, |P|; \quad t = 1, \dots, T - 1 \quad (12)$$

محدودیت (۸) حداقل نیاز مشتری را مطرح می‌کند که بر اساس آن سطح موجودی تأمین‌کننده در تمامی دوره‌ها نباید از حد مشخصی کمتر باشد. در ادامه متغیر χ_{pst} جایگزین متغیر X_{pst} شده است تا بدین وسیله بتوان مقدار ارسال را بدون در نظر گرفتن نقش وسایل حمل‌ونقل تعیین کرد. اگر محدودیت‌های (۵) را با (۸) ترکیب کنیم، به ازای $p = 1, \dots, |P|$ و $t = 1, \dots, T$ ؛ داریم: $IC_{pt} - d_p + \sum_{s=1}^{|S|} \chi_{pst} \geq d_p \Rightarrow \sum_{s=1}^{|S|} \chi_{pst} \geq 2d_p - IC_{pt}$ ؛ چون ممکن است برای بعضی مقادیر t و p مقدار $2d_p - IC_{pt}$ منفی شود، بنابراین ρ_{pt}^{min} را بصورت $\rho_{pt}^{min} = \max(0, 2d_p - IC_{pt})$ مشخص می‌کنیم. بر اساس محدودیت (۵)، می‌توان IC_{pt} را بر حسب $IC_{p,t-1}$ نوشت و اگر این بازنویسی تا رسیدن به IC_{p1} ادامه یابد، می‌توان ρ_{pt}^{min} را بصورت رابطه (۱۳) بازنویسی کرد (مقدار $\sum_{\tau=1}^{t-1} \chi_{p\tau}$ به ازای $t = 1$ برابر با صفر است).

$$\rho_{pt}^{min} = \max \left(0, (t + 1)d_p - IC_{p1} - \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{\tau=1}^{t-1} \chi_{p\tau} \right) \quad p = 1, \dots, |P|; \quad t = 1, \dots, T - 1 \quad (13)$$

پس از به دست آوردن مقادیر ρ_{pt}^{min} نوبت به تعیین حداقل مقادیر ارسال از دیدگاه تأمین‌کنندگان است. در این قسمت محدودیت (۹) نقش اساسی دارد که به منظور رعایت ظرفیت انبار تأمین‌کننده طراحی شده است. اگر این محدودیت را با محدودیت‌های (۴) و (۹) ترکیب کنیم به ازای $p = 1, \dots, |P|$ و $s = 1, \dots, |S|$ ؛ داریم: $\chi_{pst} \geq IS_{pst} + m_{ps} - TQ_{ps}^{max}$ ؛ چون ممکن است برای بعضی مقادیر t و p مقدار $IS_{pst} + m_{ps} - TQ_{ps}^{max}$ منفی شود، بنابراین r_{pst}^{min} را بصورت $r_{pst}^{min} = \max(0, IS_{pst} + m_{ps} - TQ_{ps}^{max})$ مشخص می‌کنیم. بر اساس محدودیت (۴)، می‌توان IS_{pst} را بر حسب $IS_{ps,t-1}$ نوشت و اگر این بازنویسی تا رسیدن به IS_{ps1} ادامه یابد، می‌توان r_{pst}^{min} را بصورت رابطه (۱۴) بازنویسی کرد.

$$r_{pst}^{min} = \max \left(0, t m_{ps} + IS_{ps1} - TQ_{ps}^{max} - \sum_{\tau=1}^{t-1} \chi_{p\tau} \right) \quad \begin{matrix} p = 1, \dots, |P|; \\ s = 1, \dots, |S|; \\ t = 1, \dots, T - 1 \end{matrix} \quad (14)$$

لازم به توضیح است، چون بر اساس محدودیت شماره (۶) کل مقدار ارسال کالا از نوع p در تمامی T دوره زمانی ثابت است، بنابراین معادلات (۱۳)، (۱۴) و معادلات بخش بعدی برای دوره‌های زمانی $t = 1, \dots, T - 1$ معتبر می‌باشد. برای محاسبه مقدار ارسال در دوره T تنها کافی ست باقیمانده آنچه که ارسال

تا به دوره نشده را به دست آورد و برابر با مقدار R_{pT}^{min} و R_{pT}^{max} قرار داد به عبارتی مقدار $R_{pT}^{max} = R_{pT}^{min} = Td_p - \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{\tau=1}^{T-1} \chi_{p\tau}$ را بدست آورد.

۲.۴. محاسبه مقادیر R_{pt}^{max}

متغیر R_{pt}^{max} به منظور تعیین حداکثر ارسال مجاز در یک دوره تعریف شده است و در هر دوره مقدار آن محاسبه می‌شود. مقدار این متغیر بر اساس سه دسته از محدودیت‌های مدل به دست می‌آید، که عبارتند از: سطح موجودی انبار تأمین‌کنندگان برای ارسال کالا p در دوره t ، ظرفیت انبار مشتری برای دریافت کالا p در دوره $t + 1$ و نهایتاً عدم ارسال بیش از مقدار Td_p از کالا p در کل T دوره. در ادامه به منظور نشان دادن حداکثر توان ارسال کالای p در دوره t به واسطه تأمین‌کننده s از متغیر r_{pst}^{max} بهره می‌گیریم که این مقدار به وضوح از طریق محدودیت (۷) مشخص شده است. بنابراین به ازای $t = 1, \dots, T$ ، $p = 1, \dots, |P|$ و $s = 1, \dots, |S|$ داریم: $r_{pst}^{max} = IS_{pst}$ که اگر مقدار IS_{pst} را بر اساس رابطه بازگشتی (۴) بازنویسی کنیم، به رابطه (۱۵) خواهیم رسید: مقدار $\sum_{\tau=1}^{t-1} (m_{ps} - \chi_{p\tau})$ به ازای $t = 1$ برابر با صفر می‌باشد.

$$r_{pst}^{max} = IS_{ps1} + \sum_{\tau=1}^{t-1} (m_{ps} - \chi_{p\tau}) \quad p = 1, \dots, |P|; s = 1, \dots, |S|; t = 1, \dots, T - 1 \quad (15)$$

وجود ظرفیت برای انبار مشتری محدودیت دیگری است که مقدار R_{pt}^{max} را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این رابطه متغیر ρ_{pt}^{max} تعریف شده که نقش آن به دست آوردن حداکثر توان مشتری برای دریافت کالای p می‌باشد. اگر محدودیت‌های (۵) با محدودیت (۱۰) ترکیب کنیم، به ازای $t = 1, \dots, T$ و $p = 1, \dots, |P|$ داریم: $\sum_{s=1}^{|S|} \chi_{pst} \leq TQ_p^{max} + d_p - IC_{pt}$ و بنابراین $\rho_{pt}^{max} = TQ_p^{max} + d_p - IC_{pt}$ اگر IC_{pt} را بر حسب رابطه (۵) بازنویسی کنیم، می‌توانیم ρ_{pt}^{max} را بصورت رابطه (۱۶) نشان دهیم.

$$\rho_{pt}^{max} = TQ_p^{max} + td_p - \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{\tau=1}^{t-1} \chi_{p\tau} - IC_{p1} \quad p = 1, \dots, |P|; t = 1, \dots, T - 1 \quad (16)$$

حال با مشخص شدن مقادیر r_{pt}^{max} و ρ_{pt}^{max} می‌توان مقدار R_{pt}^{max} را بر اساس رابطه (۱۷) محاسبه نمود.

$$R_{pt}^{max} = \min \left(\sum_{s=1}^{|S|} r_{pst}^{max}, \rho_{pt}^{max}, \left(Td_p - \sum_{s=1}^{|S|} \sum_{\tau=1}^{t-1} \chi_{p\tau} \right) \right) \quad t = 1, \dots, T - 1; p = 1, \dots, |P| \quad (17)$$

تاکنون دو عامل از سه عامل تأثیرگذار در تعیین مقدار R_{pt}^{max} تشریح شده است. عامل سوم را با عنوان باقی‌مانده ارسال‌ها معرفی می‌نماییم؛ این مقدار تضمین می‌کند که مجموع کالاهای ارسالی از حد مقرر بیشتر نشود.

۳.۴. محاسبه تعداد کالای ارسالی در دوره (t)

در مدل مسئله پنج محدودیت سخت وجود دارد که عدم رعایت آن‌ها باعث غیر موجه شدن جواب می‌گردد. اگر مقدار ارسال از کالای نوع p در دوره t از مقدار R_{pt}^{max} کمتر باشد سه محدودیت آن‌ها رعایت شده و اگر مقدار ارسالی از R_{pt}^{min} بزرگ‌تر باشد دو محدودیت از این پنج محدودیت رعایت می‌شود. رابطه میان مقدار ارسال و محدودیت‌ها را می‌توانید در جدول ۵ مشاهده نمایید.

جدول ۵. رابطه مقدار ارسال کالای p در دوره t با محدودیت‌های مدل

مقدار ارسال		محدودیت‌ها
بیشتر از R_{pt}^{min}	کمتر از R_{pt}^{max}	رعایت فضای انبار تأمین‌کننده (۹)
✓		رعایت موجودی تأمین‌کننده (۷)
✓		رعایت مقدار کل ارسال (۶)
✓		رعایت فضای انبار مشتری (۱۰)
	✓	رعایت نیاز مشتری (۸)

بنابراین اگر مقدار ارسال در بازه $[R_{pt}^{min}, R_{pt}^{max}]$ تعریف شود، تمامی محدودیت‌ها رعایت شده و هیچ یک از آن‌ها نقض نمی‌گردد. حال این سؤال مطرح می‌شود که آیا در مراحل حل الگوریتم ممکن است دوره‌ای وجود داشته باشد که مقدار R_{pt}^{min} از مقدار R_{pt}^{max} بزرگ‌تر باشد؟ به بیان ساده‌تر آیا در روند حل

مسئله شریای وجود دارد که بازه $[R_{pt}^{min}, R_{pt}^{max}]$ شامل هیچ عدد صحیحی نباشد؟ پاسخ این سؤال خیر است و این امر را می توان با روابط ریاضی اثبات کرد. در ادامه نحوه محاسبه مقدار ارسال در هر دوره توضیح داده می شود. واضح است که مقدار ارسال کالای نوع p در دوره t حداقل به اندازه R_{pt}^{min} می باشد اما به دلیل وجود هزینه های حمل و نقل، شاید بهتر باشد بخشی از کالای نوع p مورد نیاز در دوره های بعد از t نیز همراه با ارسال های دوره t انتقال داده شوند، البته این مقدار ارسال اضافی نباید از $R_{pt}^{max} - R_{pt}^{min}$ بیشتر باشد. به منظور تصمیم گیری در مورد ارسال میزان کالای هر دوره از رابطه (۱۸) استفاده می کنیم که در آن مقدار ضریب α_{pt} مشخص کننده میزان ارسال کالای اضافی نوع p در دوره t است. برای محاسبه مقدار α_{pt} ابتدا چند نمونه مسئله در ابعاد کوچک توسط نرم افزار CPLEX حل شده و بر اساس جواب های حاصل دامنه ای برای مقدار α_{pt} تعریف می شود. پس از آن یک مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت در داخل این دامنه، محاسبه و به α_{pt} تخصیص داد می شود.

$$\chi_{pt} = R_{pt}^{min} + [\alpha_{pt}(R_{pt}^{max} - R_{pt}^{min})] \quad p = 1, \dots, |P|; t = 1, \dots, T - 1 \quad (18)$$

۴.۴. تخصیص کالاهای ارسالی به وسایل حمل و نقل

در این قسمت ابتدا یک مدل ریاضی تخصیص به شرح ذیل ایجاد و سپس با استفاده از CPLEX به صورت بهینه حل می شود. زمان حل این مدل در مقایسه با مدل اصلی مسئله بسیار کوتاه تر است که علت آن حذف تعداد اکثر متغیرها و محدودیت های آن مدل ها می باشد. لازم به توضیح است که در مدل زیر χ_{pt} به عنوان یک پارامتر ظاهر شده است که مقدار آن در گام های قبلی الگوریتم تعیین شده بنابراین Y_{vt} تنها متغیرهای این مدل می باشند.

$$\text{Minimize } \sum_{v=1}^{|V|} f_{cv} Y_{vt} \quad (19)$$

S. t.

$$\sum_{p=1}^{|P|} w_p \chi_{pvt} \leq w_l Y_{vt} \quad v = 1, \dots, |V| \quad (20)$$

$$\sum_{p=1}^{|P|} q_p \chi_{pvt} \leq q_l Y_{vt} \quad v = 1, \dots, |V| \quad (21)$$

$$\sum_{p=1}^{|P|} \sum_{v=1}^{|V|} \chi_{pvt} = \sum_{p=1}^{|P|} \chi_{pt} \quad (22)$$

$$\chi_{pvt} \in \mathbb{Z}^+ \quad p = \{1, \dots, |P|\}; v = 1, \dots, |V| \quad (23)$$

$$Y_{vt} \in \{0,1\}$$

۵.۴. تخصیص کالاهای ارسالی به تأمین کنندگان

پیش تر اشاره نمودیم که ممکن است چندین تأمین کننده یک کالای بخصوص را تولید نمایند. سؤال اساسی در این بخش تخصیص مقدار χ_{pt} به تأمین کنندگان مناسب کالای نوع p می باشد. بخشی از کالاهایی ارسالی ممکن است شامل محصولاتی باشد که تأمین کننده مجبور به ارسال آن ها شده است. بنابراین اولویت تخصیص مربوط به تأمین کنندگانی می باشد که فضای ذخیره کمتری برای آن ها باقی مانده است. فضای ذخیره به دو عامل وابسته است؛ عامل اول مقدار فضای باقی مانده از انبار تأمین کننده و عامل دوم مقدار نرخ تولید روزانه تأمین کننده می باشد. بدین منظور تأمین کنندگان کالای نوع p بر اساس مقادیر غیر صعودی پارامتر pr_{ps} اولویت بندی می شوند که این مقدار از رابطه (۲۴) محاسبه می گردد. در این رابطه، تأمین کنندگانی که تولید روزانه بیشتری از کالای نوع p و محل ذخیره سازی کمتری برای این نوع کالا دارند در اولویت ارسال این نوع کالا قرار می گیرند. (مقدار عدد یک در مخرج برای جلوگیری از تقسیم بر صفر است.)

$$pr_{ps} = \frac{m_{ps}}{TQ_{ps}^{max} - IS_{pst} + 1} \quad p = 1, \dots, |P|; s = 1, \dots, |S| \quad (24)$$

در ادامه گام های الگوریتم تخصیص عبارت اند از:

گام ۱. قرار دهید: $p = 1$

گام ۲. اگر مقدار $\chi_{pt} = 0$ به گام ۴ بروید، در غیر این صورت مقدار pr_{ps} را برای تمامی تأمین کنندگان بر اساس رابطه (۲۴) محاسبه کرده و تأمین کننده ای را انتخاب نمایید که بیشترین مقدار pr_{ps} را دارد. (به عنوان مثال S)

گام ۳. قرار دهید: $\chi_{pst} = \chi_{pst} + 1$; $\chi_{pt} = \chi_{pt} - 1$ و به گام ۲ بروید.

گام ۴. اگر مقدار $|P| \leq p$ ، قرار دهید $p = p + 1$ و به گام ۲ باز گردید، در غیر این صورت توقف نماید.

۵. نتایج محاسباتی

با مراجعه به شرکت ساپکوی خراسان رضوی توانستیم اطلاعات کلی در زمینه تأمین کنندگان، کالاها و تقاضای روزانه شرکت ایران خودرو به دست آوریم. بر اساس این اطلاعات پارامترهای ورودی مسئله را برآورد و ۱۲ داده ورودی برای مسئله تعریف کردیم که در جدول ۶ نمایش داده شده است. در جدول ۶، T به عنوان طول دوره بررسی، $|P|$ به عنوان تعداد تنوع کالا، $|S|$ به عنوان تعداد تأمین کنندگان و نهایتاً $|V|$ به عنوان تعداد وسایل حمل و نقل تعریف شده است. داده‌ها تعریف شده توسط بسته نرم‌افزاری IBM ILOG 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 4GB انجام شده است. از آنجایی که در داخل الگوریتم حل یک دوره‌ای از متغیر تصادفی استفاده شده است (محاسبه مقدار α_{pt})، جواب حاصل ماهیت تصادفی خواهد داشت. از این رو برای کم رنگ کردن تأثیرات تصادفی الگوریتم، چندین تکرار برای اجرای آن در نظر گرفته‌ایم (۱۰۰ تکرار). زمان اجرایی الگوریتم را معادل با مجموع زمان تکرارهای آن قرار داده و جواب الگوریتم را نیز بهترین جواب حاصل از تکرارهای آن منظور می‌نماییم. برای محاسبه دامنه مقدار α_{pt} از جواب دقیق ۶ داده نخست استفاده شده است. همان طور که در جدول ۶ مشاهده می‌نمایید، میانگین مقدار زمان محاسباتی برای الگوریتم کمتر از یک ثانیه می‌باشد که این امر نشان از کارایی الگوریتم می‌باشد همچنین شاهد آن هستیم که بیشترین اختلاف تقریباً ۳ 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. در راستای تحقیقات آتی به دنبال راهکارهایی خواهیم بود که دامنه‌ای دقیق‌تر برای α_{pt} ارائه نماید که بدین تدبیر بتوان درصد اختلاف موجود را همچنان کاهش داد.

جدول ۶. نتایج محاسباتی مقایسه‌ای

شماره داده	$ T $	$ S $	$ P $	$ V $	جواب حاصل از حل دقیق		جواب حاصل از الگوریتم ابتکاری		درصد اختلاف
					هزینه کل	زمان (ثانیه)	هزینه کل	زمان (ثانیه)	
۱	۶	۲	۴	۶	۱۸۸۲/۳۱	۰/۱۱	۱۸۸۳/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۵
۲	۶	۲	۶	۱۵	۲۵۲۴/۲۵	۱/۲۵	۲۵۲۴/۵	۰/۰۳	۰/۰۱
۳	۶	۲	۸	۳۰	۵۰۹۶/۲۳	۱۸/۷۶	۵۱۰۱/۳۳	۰/۰۵	۰/۱
۴	۶	۴	۴	۱۸	۱۷۳۵/۹۸	۰/۷۹	۱۷۴۲/۹۲	۰/۰۶	۰/۴
۵	۶	۴	۶	۲۸	۱۷۵۷/۵۴	۱/۵۶	۱۷۶۱/۰۶	۰/۰۶	۰/۲
۶	۶	۴	۸	۷۹	۶۵۱۴/۱	۷۲۰۰	۶۵۴۶/۶۷	۰/۰۷	۰/۵
۷	۶	۶	۴	۴۹	۱۳۵۴/۶۱	۱/۲	۱۳۶۹/۵۱	۰/۰۷	۱/۱
۸	۶	۶	۶	۷۰	۲۶۰۶/۰۹	۴/۸۱	۲۶۵۰/۵۴	۰/۰۶	۱/۷۱
۹	۶	۶	۸	۸۲	۲۶۲۳/۰۵	۲۳/۱۴	۲۶۶۰/۹۲	۰/۰۷	۱/۴۴
۱۰	۶	۸	۴	۳۶	۳۰۰۹/۶۲	۸۶۳/۸۹	۳۰۴۰/۶۹	۰/۰۷	۱/۰۳
۱۱	۶	۸	۶	۴۵	۴۵۲۴/۴۶	۹۵/۶۷	۴۶۶۲/۳۲	۰/۰۸	۳/۰۵
۱۲	۶	۸	۸	۹۰	۱۲۰۰۱/۹۶	۷۲۰۰	۱۲۲۵۷/۹۷	۰/۰۹	۲/۱۳
میانگین داده‌ها					۳۸۰۲/۵۲	۱۲۸۴/۳۹	۳۸۵۰/۱۴	۰/۰۶	۰/۹۸

۶. مراجع

- [1] Glock, C. H., 2012. The joint economic lot size problem: A review, International Journal of Production Economics, 135, 671-686.
- [2] Kimms, A., 2012. Multi-level lot sizing and scheduling: methods for capacitated, dynamic, and deterministic models, Springer Science & Business Media.
- [3] Coelho, L. C., Cordeau, J. F., Laporte, G., 2013. Thirty years of inventory routing, Transportation Science, 48, 1-19.
- [4] 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.