International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2016)

December 2016. Volume 27. Number 4
pp. 529- 546

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Heuristic and Meta-heuristic Algorithms for Integrated Scheduling of Production and Distribution in a Supply Chain

Negin Jamili & Mohammad Ranjbar*

Negin Jamili. *M.Sc. Student of Industrial Engineering- Ferdowsi University of Mashhad*
Mohammad Ranjbar. *Associate Professor of Industrial Engineering- Ferdowsi University of Mashhad*

Keywords

Supply chain, Management, Integrated scheduling, vehicle routing, tabu search

ABSTRACT

Motivated by the increasing importance of the supply chain management in order to achieve optimal performance. in this paper an integrated scheduling of production and distribution in a supply chain has been studied. There is a set of orders from several customers to be processed by a single machine at a plant. Prepared orders must be batched and routed to be delivered to the customers. The problem is to optimize the customer service level and also the transportation cost. Due to the complexity of the proposed linear integer model. especially in large instances. some algorithms including greedy algorithm. local search methods and tabu search algorithm are developed. By computational experiments. it is concluded that tabu search algorithm has the highest efficiency in comparison with other solution methods.

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۴، جلـــد ۲۷، زمستان ۱۳۹۵

صفحــــه۵۴۶ -۵۳۰

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید
دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

ارائه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای مسأله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع در یک زنجیره تأمین

نگین جمیلی و محمد رنجبر*

کلمات کلیدی

مدیریت زنجیره تأمین، زمان‌بندی یکپارچه، مسیریابی وسایل نقلیه، جستجوی ممنوعه

چکیده:

با توجه به اهمیت روز افزون مدیریت زنجیره تأمین در راستای دستیابی به عملکرد بهینه، در این مقاله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع در یک زنجیره تأمین مورد مطالعه قرار گرفته است. در مسأله‌ی مطرح شده، تولیدکننده‌ای با محیط تک ماشینی سفارش‌های چندین مشتری را تولید می‌کند. این سفارش‌ها پس از آماده‌سازی جهت ارسال به مشتری دسته‌بندی شده و محتویات هر دسته، برای تعیین ترتیب تحویل به مشتریان مربوطه مسیریابی می‌گردند. هدف در این مسأله حداکثرسازی خدمت‌دهی به مشتریان و کاهش هزینه‌های حمل و نقل شرکت می‌باشد. به دلیل زمان‌بر بودن حل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ارائه شده برای نمونه‌های بزرگ این مسأله، روش‌های حل ابتکاری از جمله الگوریتم حریصانه، روش‌های جستجوی محلی و همچنین روش جستجوی ممنوعه به عنوان روش فراابتکاری ارائه شده است. در پایان با مقایسه این روش‌ها، این نتیجه حاصل می‌شود که الگوریتم جستجوی ممنوعه بیشترین کارایی را دارا می‌باشد.

۱. مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین که یکی از موضوعات مهم و گسترده در زمینه سیستمهای تولیدی و خدماتی است، طی چندین دهه گذشته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. موضوع اصلی در مدیریت زنجیره تأمین هماهنگی بین تصمیمات صورت گرفته در مراحل مختلف، برای مثال بین یک تولیدکننده و یک توزیع‌کننده می‌باشد. به عبارت دیگر زمان‌بندی زنجیره تأمین در پی ادغام سه مرحله‌ی تأمین مواد، تنظیم تولید و تحویل محصول برای دستیابی به مدلی است که عملکرد بهینه سیستم را از طریق هماهنگی این مراحل حاصل نماید. مدل‌های زمان‌بندی سنتی به تعیین زمان-بندی تولید بدون در نظر گرفتن سایر مراحل از جمله توزیع می-پرداختند. در این قبیل مدل‌ها، این فرض درنظر گرفته شده است که وسایل نقلیه کافی جهت حمل و نقل محصولات به مشتریان موجود بوده، لذا سفارش‌ها بدون تاخیر به دست مشتری خواهد رسید.

حال آنکه در دنیای واقعی ممکن است تعداد وسایل محدود بوده و یا جهت افزایش بهره‌وری، هر وسیله به بیش از یک مشتری خدمت‌رسانی کند. بنابراین طرح مسائل زمان‌بندی در زنجیره‌های تأمین حائز اهمیت می‌باشد.

بسیاری از تحقیقات انجام شده طی سال‌های گذشته، دو مرحله از یک زنجیره را در نظر گرفته و با مفروضات و تابع هدف‌های مختلف به یکپارچه‌سازی زمان‌بندی تولید و توزیع محصولات پرداخته‌اند. اکثر مقالات انجام شده در این زمینه سیستم تک

تاریخ وصول:۹۳/۲/۷

تاریخ تصویب:۹۴/۲/۶

نگین جمیلی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد،negin.jamili@stu.um.ac.ir

***نویسنده مسئول مقاله:** **محمد رنجبر،** گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد ،m_ranjbar@um.ac.ir

ماشینی[1] را برای تولیدکننده در نظر گرفته‌اند. برای مثال ، در مقاله [۱] یک تولیدکننده تک ماشینی، سفارش‌های یک یا چند مشتری را با هدف کمینه کردن هزینه توزیع و حداکثر تاخیر صورت گرفته در تحویل سفارش‌ها تولید می‌نماید. در مسأله‌ای نسبتاً مشابه در [۲]، برای هر محصول از زمان صفر تا زمان ارسال آن هزینه نگهداری درنظر گرفته شده است و تابع هدف علاوه بر هزینه توزیع، هزینه نگهداری را نیز شامل می‌شود.

در سایر محیط‌های تولیدی از جمله ماشین‌های موازی[2] و محیط کارگاهی[3] نیز مطالعات متعددی موجود است. در مقاله‌ای در سال ۲۰۰۹ [۳] سفارش‌های دریافت شده از مشتریان (که در یک محل واقع شده‌اند) توسط تولیدکننده‌ای با چندین ماشین موازی تولید شده و توسط تعداد نامحدودی وسیله ظرفیت‌دار و در راستای کمینه‌سازی هزینه توزیع و همچنین مجموع وزن‌دار زمان آخرین سفارش دریافت شده توسط هر مشتری، توزیع می‌گردند. در این زمینه، سیستم کارگاهی در مقالات [۴] و [۵] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در [۴] جهت جابه‌جایی کالای نیم‌ساخته در میان ماشین‌آلات و همچنین تحویل کالای نهایی به مشتریان دو نوع وسیله وجود دارد و در [۵] کالاهای نهایی از طریق تنها یک وسیله با هدف حداقل‌سازی حداکثر زمان تولید[4] به مشتریان ارسال می‌گردد.

تحقیقاتی در زمینه زمان‌بندی با درنظر گرفتن سه مرحله‌ی تأمین، تولید و توزیع نیز ارائه شده است که از جمله این مطالعات می‌توان به مقاله [۶] اشاره نمود. هدف از بیان این مسأله تعیین زمان دریافت هر بسته کالای خام و اندازه آن (تعداد کالاهای موجود در هر بسته) از تأمین‌کننده و زمان و نحوه ارسال سفارش‌ها به مشتریان است، به نحوی که هزینه توزیع و نگهداری موجودی کمترین مقدار را داشته باشد. مقاله دیگر این دو نویسنده در همان سال ([۷]) نیز ۳مرحله‌ای بوده به طوری‌که جهت حمل و نقل کالا از تأمین‌کننده به تولیدکننده یک وسیله با ظرفیت محدود و برای ارسال کالای نهایی به مشتری نیز یک وسیله در دسترس است. هدف این مسأله کمینه‌سازی زمان آخرین کالای تحویلی به مشتری است و جهت حل آن چندین روش ابتکاری ارایه شده است.

در اغلب مطالعات انجام شده این فرض درنظر گرفته شده که تعداد نامحدودی وسیله جهت ارسال کالاها در دسترس است و هریک کالای نهایی را به دست مشتری می‌رساند، حال آنکه در دنیای واقعی ممکن است جهت افزایش بهره‌وری، وسایل ارسال شده در یک سفر خود به بیش از یک مشتری خدمت‌رسانی کنند، بدین ترتیب اتخاذ تصمیماتی جهت مسیریابی برای تحویل سفارش‌های مشتریان حائز اهمیت می‌باشد. در همین راستا در مقاله [۸] که در سال ۲۰۰۵ ارایه شد به بیان مسأله‌ای پرداخته که در آن تولیدکننده‌ای با محیط تک ماشینی سفارش‌های چندین مشتری را آماده کرده و با استفاده از تنها یک وسیله نقلیه و با هدف کمینه کردن مجموع زمان‌های تحویل آن‌ها، به مشتریان مربوطه تحویل می‌دهد. نویسندگان این مقاله حالت کلی مسأله را با استفاده از برنامه‌ریزی پویا حل نموده‌اند. در مقاله [۹] نیز مسأله‌ای با هدف بهینه‌سازی تاخیر در زمان‌های تحویل آورده شده است به طوری که تعدادی مشتری هر یک دارای یک سفارش بوده که این سفارش‌ها در محیط تک ماشینی تولید می‌گردند و در نهایت محصولات نهایی توسط یک وسیله با ظرفیت نامحدود ارسال می‌گردند. مقاله جدیدی که در سال ۲۰۱۳ ارایه شد [۱۰]، مفروضات مختلفی را به مسأله اضافه نموده است. سیستم تولیدی در این مسأله دارای ماشین‌های موازی بوده و برای هر محصول موعد تحویل[5]، اندازه و زمان پردازش مشخصی در نظر گرفته شده است. هر یک از وسایل حمل بار دارای ظرفیت مخصوص به خود بوده و علاوه بر این وسایل، ماشین‌آلات پردازش نیز دارای زمان آماده به کار[6] می‌باشند. برای هر محصول در مقصد نهایی آن زمانی تحت عنوان زمان سرویس در نظر گرفته شده و پنجره زمانی[7] مطرح شده به این صورت تعریف می‌گردد که محصول مورد نظر می‌بایست در بازه زمانی مشخصی به مشتری مربوطه تحویل داده شود.

مسأله دیگری در [۱۱] به این شکل مطرح شد که محصولات تولید شده از طریق دو ماشین مختلف، می‌بایست پس از دسته بندی با هدف حداقل‌سازی مجموع هزینه تحویل و زمان انتظار مشتریان ارسال گردند. در این مسأله نیز تعدادی وسیله نقلیه نامحدود و ظرفیت‌دار در نظر گرفته شده و روش‌های ابتکاری با زمان حل چندجمله‌ای و همچنین الگوریتمهای تقریبی برای حل آن ارایه شده است. مشابه این مسأله در مقاله[۱۲] نیز مورد بررسی قرار گرفته با این تفاوت که دو ماشین پردازش در مکان‌های مختلف واقع شده‌اند و محصولات آماده شده در بسته‌هایی به یک مرکز توزیع ارسال می‌گردند. از آنجایی که مسأله فوق NP-hard است، نویسندگان یک روش ابتکاری ساده و پس از آن حالت پیچیده‌تر آن را بیان نموده‌اند. در مقاله [۱۳] تولیدکننده‌ای با سیستم تک ماشینی یا موازی، سفارش‌های چندین مشتری را تهیه نموده و آن‌ها را با وسایل نقلیه‌ای که در دسترس‌پذیری نامحدود دارند، ارسال می‌کند. در این مقاله دو تابع هدف میانگین و حداکثر زمان تحویل کالا به مشتریان و دو محیط تولیدی در نظر گرفته شده و جهت حل آن روشی بر مبنای برنامه‌ریزی پویا

مطرح شده است.

مسأله تعریف شده در این مقاله، از لحاظ مفروضات شباهت‌های زیادی به مسأله اخیر دارد با این تفاوت که مدل خطی عدد صحیح برای آن طراحی و پیاده‌سازی شده و الگوریتم‌های فراابتکاری که دارای زمان حل بسیار کمتری نسبت به روش‌های دقیق هستند نیز توسعه داده شده و پیاده‌سازی نیزه شده‌اند. در ادامه، ابتدا تعریف دقیق مسأله و مدل‌سازی در بخش ۲ بیان می‌شود. در بخش ۳ روش‌های حل مختلف تشریح می‌گردند. بخش ۴ به بررسی نتایج محاسباتی می‌پردازد و در نهایت در بخش ۵، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری این مسأله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. تعریف مسأله و مدلسازی

در این بخش جزئیات تعریف مسأله و مدل خطی عددصحیح ارائه شده برای آن، بیان شده است. در این مسأله تولیدکننده‌ای با محیط تک ماشینی در نظر گرفته شده که سفارش‌های چندین مشتری را تولید می‌نماید. مجموعه‌ی کارها پس از پردازش بر روی ماشین جهت ارسال به مشتری دسته‌بندی شده و پس از دسته‌بندی توسط تعداد نامحدودی وسیله حمل ظرفیت‌دار ارسال و برای تحویل به مشتری مربوطه مسیریابی می‌گردد به گونه‌ای که هر سفارش (کالا) تنها در یک بسته و هر بسته توسط یک وسیله ارسال می‌گردد. ارسال هر بسته شامل هزینه‌ی ثابتی بوده که این هزینه به عهده‌ی تأمین‌کننده می‌باشد. هدف از این مسأله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن سطح خدمت به مشتری و همچنین هزینه توزیع می‌باشد. جهت لحاظ نمودن سطح خدمت به مشتری تابعی از زمان تحویل کالا (میانگین زمان‌های تحویل کلیه سفارش‌ها به مشتریان) در نظر گرفته شده و هزینه توزیع دربر دارنده هزینه ثابت ارسال و همچنین هزینه وابسته به مسافت طی شده توسط وسایل حمل می‌باشد. به عبارت دیگر یافتن برنامه‌ریزی بهینه برای توالی پردازش کالاها بر روی ماشین، زمان ارسال بسته‌های محصولات نهایی و تعداد موجود در بسته‌ها و همچنین مسیریابی مشتریان در هر سفر، جهت حداقل نمودن هزینه‌ها و زمان تحویل به مشتریان مدنظر می‌باشد.

از آنجایی که تابع هدف مسأله شامل دو تابع هزینه و سطح خدمت می‌باشد که هر دو از جنس زمان می‌باشند، ثابت α جهت ایجاد نظر تصمیم‌گیرنده در اهمیت و برتری هر یک از این توابع در مسأله آورده شده است. بدین صورت که تابع هدف کلی به شکل $\alpha D_{mean} + (1-\alpha)T$ مطرح گردیده است که T تابع هزینه و D_{mean} میانگین زمان رسیدن سفارش به دست مشتری می‌باشد. تولید داده‌ها برای نمونه مسائل به گونه‌ای صورت می‌گیرد که دو تابع هدف هم‌واحد گردند که در بخش ۱-۴ توضیحات بیشتر آورده شده است.

پارامترهای مسأله به شرح جدول ۱ می‌باشند.

متغیرهای مورد استفاده در این مدل نیز در ادامه آورده شده است.

$$x_{jk} = \begin{cases} 1; & \text{اگر کار } j \text{ در } k\text{امین بسته از کارگاه خارج شود} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$B_k = \begin{cases} 1; & \text{اگر } k\text{امین بسته ارسالی غیرتهی باشد} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$z_{ijk} = \begin{cases} 1; & \text{اگر کار } j \text{ بلافاصله پس از کار } i \text{ در مشتری بسته } k \text{ به تحویل داده شود} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$z_{0jk} = \begin{cases} 1; & \text{اگر کار } j \text{ اولین کار تحویل داده شده به مشتری در بسته } k \text{ باشد} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$z_{j0k} = \begin{cases} 1; & \text{اگر کار } j \text{ آخرین کار تحویل داده شده به مشتری در بسته } k \text{ باشد} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$s_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{اگر کار } j \text{ پس از کار } i \text{ جهت تولید کارگاه در زمان‌بندی گردد} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$s_{0j} = \begin{cases} 1; & \text{اگر کار } j \text{ اولین کار انجام شده بر روی ماشین باشد} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$s_{j.n+1} = \begin{cases} 1; & \text{اگر کار } j \text{ آخرین کار انجام شده بر روی ماشین باشد} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

c_j : زمان اتمام تولید سفارش j در کارگاه

d_j:زمان تحویل سفارش j به مشتری

t_k:زمان اعزام بسته j از کارگاه

u_{ijk}:متغیر کمکی صحیح برای از بین بردن زیرتور

جدول ۱. تعریف پارامترها

پارامتر	تعریف
$\boldsymbol{J} = \{1.2.\ldots.n\}$	مجموعه‌ی کلیه سفارش‌ها
$\boldsymbol{K} = \{1.2.\ldots.n\}$	مجموعه‌ی بسته‌های بالقوه برای ارسال
p_j	زمان پردازش سفارش j
τ_{ij}	زمان سفر از مشتری مربوط به سفارش i به مشتری مربوط به سفارش j
τ_{0j}	زمان سفر از کارگاه تولیدی به مشتری سفارش j
c_{ij}	هزینه سفر از مشتری مربوط به سفارش i به مشتری مربوط به سفارش j
w	ظرفیت هر بسته ارسالی
f	هزینه ثابت ارسال
M	یک عدد بزرگ

مدل خطی عددصحیح ارائه شده برای مسأله به صورت زیر می‌باشد:

$$Min \quad \alpha\left(\frac{1}{n}\sum_{j\in J} d_j\right) + (1-\alpha)\times(f\times\sum_{k\in K} B_k + \sum_{i=0}^{n}\sum_{j\in J} c_{ij}\sum_{k\in K} z_{ijk}) \quad (۱)$$

subject to

$$\sum_{k\in K} x_{jk} = 1 \qquad \forall j\in J \quad (۲)$$

$$B_k \le \sum_{j\in J} x_{jk} \qquad \forall k\in K \quad (۳)$$

$$\sum_{j\in J} x_{jk} \le M\times B_k \qquad \forall k\in K \quad (۴)$$

$$\sum_{j\in J} x_{jk} \le w \qquad \forall k\in K \quad (۵)$$

$$B_{k+1} \le B_k \qquad \forall k = 1.\ldots.n-1 \quad (۶)$$

$$d_j \ge d_i + \tau_{ij} - M(1-z_{ijk}) \qquad \forall i.j\in J.k\in K \quad (۷)$$

$$d_j \ge t_k + \tau_{0j} - M(1-x_{jk}) \qquad \forall j\in J.k\in K \quad (۸)$$

$$x_{jk} = \sum_{i=0}^{n} z_{ijk} \qquad \forall j\in J.k\in K \quad (۹)$$

$$x_{jk} = \sum_{i=0}^{n} z_{jik} \qquad \forall j\in J.k\in K \quad (۱۰)$$

$$B_k = \sum_{j\in J} z_{0jk} \qquad k\in K \quad (۱۱)$$

$$c_j \ge c_i + p_j - M\big(1-s_{ij}\big) \qquad \forall i.j\in J.i\ne j \quad (۱۲)$$

$$c_j \geq s_{0j} \times p_j \qquad \forall j \in J \qquad (۱۳)$$

$$t_k \geq c_j - M(1 - x_{jk}) \qquad \forall j \in J. k \in K \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n+1} s_{ji} = 1 \qquad \forall j \in J \cup \{0\} \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{n} s_{ij} = 1 \qquad \forall j \in J \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{j \in J} u_{0jk} = \sum_{j \in J} x_{jk} \qquad \forall k \in K \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{i=0}^{n} u_{ijk} = \sum_{i=0}^{n} u_{jik} + 1 \times \sum_{i=0}^{n} z_{ijk} \qquad \forall j \in J. k \in K \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{j \in J} u_{j0k} = 0 \qquad \forall k \in K \qquad (۱۹)$$

$$u_{ijk} \leq M \times z_{ijk} \qquad \forall i. j \in J \cup \{0\}. k \in K \qquad (۲۰)$$

$$x_{jk} \in \{0.1\} \qquad \forall j \in J. k \in K \qquad (۲۱)$$

$$B_k \in \{0.1\} \qquad \forall k \in K \qquad (۲۲)$$

$$z_{ijk} \in \{0.1\} \qquad \forall i. j \in J \cup \{0\}. k \in K \qquad (۲۳)$$

$$s_{ij} \in \{0.1\} \qquad \forall i. j \in J \cup \{0\} \qquad (۲۴)$$

$$c_j. d_j \in \mathbb{Z}^+ \qquad \forall j \in J \qquad (۲۵)$$

$$t_k \in \mathbb{Z}^+ \qquad \forall k \in K \qquad (۲۶)$$

$$u_{ijk} \geq 0 \qquad \forall i. j \in J \cup \{0\}. k \in K \qquad (۲۷)$$

در مدل این مسأله، تابع هدف (۱) مجموع هزینه ارسال بسته‌ها و حمل و نقل سفارش‌های موجود در هر بسته و همچنین میانگین زمان تحویل کلیه کالاها به مشتریان را کمینه می‌کند. محدودیت (۲) برای اختصاص هر کار به تنها یک بسته بوده و محدودیت (۳) و (۴) جهت ارتباط دو متغیر x_{jk} و B_k آورده شده است، به طوری که B_k تنها در صورتی می‌تواند مقدار ۱ بگیرد که حداقل یک کار در بسته k زمان‌بندی شده باشد. محدودیت (۵) مربوط به ظرفیت وسایل نقلیه بوده، به طوری که کلیه سفارش‌های موجود در یک بسته از ظرفیت وسیله تجاوز نکند. محدودیت (۶) بیان می‌کند که اگر بسته k خالی باشد، بسته $k+1$ نیز می‌بایست خالی باشد، به عبارت دیگر بسته k تنها در صورتی می‌تواند فعال (دارای سفارش) محسوب گردد که بسته ماقبل آن نیز فعال باشد. زمان تحویل هر سفارش در محدودیت (۷) و (۸) لحاظ شده است، به این صورت که زمان تحویل اولین سفارش برابر است با زمان اعزام بسته به علاوه زمان جابه‌جایی از کارگاه به مقصد و زمان تحویل سایر کالاها از زمان تحویل کالای ماقبل از آن به علاوه زمان جابه‌جایی حاصل می‌گردد. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) بیان می‌کنند که وسیله حمل هر بسته جهت تحویل کالای j به مشتری مربوطه، یا از کارگاه یا از مشتری دیگری به آن سفر می‌کند و پس از خدمت‌دهی به مشتری دیگری مراجعه کرده یا به شرکت باز می‌گردد. محدودیت (۱۱) الزام می‌دارد که هر بسته

غیرتهی تنها یک بار از کارگاه خارج شود. در محدودیت (۱۲) و (۱۳) زمان تکمیل هر سفارش بر روی ماشین حداقل برابر زمان تکمیل کار ماقبل آن به علاوه زمان پردازش در نظر گرفته شده است. زمان ارسال یک بسته در محدودیت (۱۴) لحاظ شده است به طوری که این مقدار برای یک بسته همواره بزرگتر مساوی زمان تکمیل کلیه سفارش‌های موجود در آن می‌باشد. دو محدودیت (۱۵) و (۱۶) نیز برای تعیین توالی فعالیت بوده به طوری‌که هر سفارش تنها یک پس‌نیاز و یک پیش‌نیاز داشته باشد. در پایان محدودیت‌های (۱۷) تا (۲۰) مانع به وجود آمدن زیرتور[۸] در جواب به دست آمده می‌گردد و سایر محدودیت‌ها نوع متغیرهای مسأله را مشخص می‌نمایند که در آن‌ها $\mathbb{Z}^+$ بیانگر مجموعه اعداد صحیح غیرمنفی می‌باشد.

۳. روش حل

با توجه به پیچیدگی مسأله، از مدل ارائه شده نمی‌توان انتظار داشت که قابلیت حل نمونه مسایل با اندازه‌های بزرگ را در زمان کوتاه داشته باشد. بنابراین یک روش ابتکاری حریصانه و چند روش جستجوی محلی برای بهبود جواب حاصل ارائه شده است. روش جستجوی ممنوعه نیز به عنوان یک روش فراابتکاری که جواب بهتری را به دست می‌دهد، ارائه شده است. در این روش‌ها از نمادهایی استفاده شده است که در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

۳-۱. نمایش جواب و تعریف همسایگی

جواب $\boldsymbol{S_k}$ که به صورت $\left\{\left(j_1^1.\dots.j_{w'_1}^1\right).\dots.\left(j_1^{q'}.\dots.j_{w_{q'}}^{q'}\right)\right\}$ نمایش داده می‌شود، بیانگر نحوه دسته‌بندی سفارش‌ها بوده به طوری که j_o^b بیانگر کار oام در بسته bام می‌باشد. این جواب را می‌توان به صورت $\boldsymbol{S'_k} = \{b_1.\dots.b_n\}$ نیز نمایش داد که در این صورت b_o بیانگر شماره بسته‌ی سفارش o می‌باشد. برای مثال جواب مسأله‌ای با ۵ کار را به صورت $\boldsymbol{S_0} = \{(2.1).(5.4).(3)\}$ در نظر بگیرید. این جواب نشان‌دهنده این است که سفارش‌های ۲ و ۱ در بسته ۱، ۵ و ۴ در بسته ۲ و سفارش ۳ در آخرین بسته ارسال می‌گردند، لذا $\boldsymbol{S'_0} = \{1.1.3.2.2\}$.

همسایگی مجاز یک جواب به این صورت تعریف می‌شود که در هر همسایگی، تنها دو سفارش موجود در دو بسته‌ی متمایز، با یکدیگر تعویض می‌شوند. برای ایجاد همسایگی‌های جواب کنونی، از اولین سفارش موجود در اولین بسته شروع کرده و آن سفارش، با تک‌تک کارهای تخصیص داده شده به بسته‌های دوم به بعد، جابه‌جا می‌شود و همین روند برای همه‌ی سفارش‌ها تکرار می‌شود. بدین ترتیب برای هر سفارش در بسته‌ی b $(b = 1.2.\dots.q')$ به تعداد $\sum_{b'=b+1}^{q'} w'_{b'}$ همسایگی متمایز بررسی می‌گردد و تعداد کل همسایگی‌ها برای یک جواب مانند $\boldsymbol{S_0}$ برابر $T_0 = \sum_{b=1}^{q'-1} w'_b \sum_{b'=b+1}^{q'} w'_{b'}$ می‌باشد.

برای مثال برای ایجاد همسایگی‌های جواب $\boldsymbol{S_0} = \{(2.1).(5.4).(3)\}$، از اولین سفارش در بسته اول شروع کرده و آن را با سفارش دیگری در یک بسته متمایز جابه‌جا می‌کنیم. در حین این تغییر جایگاه سایر سفارش‌ها ثابت می‌ماند. به این ترتیب با هر تغییر یک همسایگی ایجاد می‌شود. بدین ترتیب در اولین همسایگی داریم: $\boldsymbol{S_1} = \{(5.1).(2.4).(3)\}$ همچنین در تکرار بعد خواهیم داشت: $\boldsymbol{S_2} = \{(4.1).(5.2).(3)\}$ و به همین ترتیب سایر همسایگی‌ها به دست می‌آیند.

$$S_3 = \{(3.1).(5.4).(2)\}. S_4 = \{(2.5).(1.4).(3)\},$$
$$S_5 = \{(2.4).(5.1).(3)\}.$$
$$S_6 = \{(2.3).(5.4).(1)\},$$
$$S_7 = \{(2.1).(3.4).(5)\}. S_8 = \{(2.1).(5.4).(3)\}$$

جدول ۲. نمادهای استفاده شده در روش‌های حل

نماد	تعریف
n	تعداد کل کارها
v	تعداد سفارش‌های موجود در یک بسته‌ی نیمه‌پر در یک جواب
q	تعداد بسته‌های ارسالی پر در یک جواب
q'	تعداد کل بسته‌های ارسالی در یک جواب
w'_j	تعداد سفارش‌های موجود در بسته j
$S_k = \left\{\left(j_1^1.\dots.j_{w'_1}^1\right).\dots.\left(j_1^{q'}.\dots.j_{w_{q'}}^{q'}\right)\right\}$	جواب kام انتخاب شده
$\boldsymbol{S_k^i}$	همسایگی iام جواب S_k
S_{best}	بهترین جواب به‌دست آمده
$\boldsymbol{S'_k} = \{b_1.\dots.b_n\}$	نمایش جواب S_k بر اساس شماره بسته‌ها
R_i	مقداری است جهت مقایسه و انتخاب سفارش‌ها

R'_{kj}	مقداری است جهت مقایسه و زمان‌بندی بسته‌ها در جواب k
F_k	مقدار تابع هدف جواب S_k
F_k^i	مقدار تابع هدف همسایگی iام جواب S_k
F_{best}	بهترین مقدار تابع هدف
T_k	تعداد همسایگی‌های جواب S_k
o و o'	اندیس‌های شمارنده‌ی سفارشها
b	اندیس شمارنده‌ی بسته‌ها
n_b	حداکثر تعداد تغییر در شماره‌ی بسته‌ی یک سفارش
L_T	طول لیست ممنوعه
max_{itr}	حداکثر تعداد تکرار الگوریتم بدون ایجاد بهبود در جواب
$count_i$	شمارنده تعداد دفعات بهبود در جواب
$count_{ni}$	شمارنده تعداد دفعات عدم بهبود در جواب

۳-۲. تولید جواب تصادفی

جواب‌های تصادفی برای الگوریتم‌های مطرح شده در این بخش بر اساس منطق حداکثر یک بسته‌ی نیمه‌پر تولید می‌شوند به این صورت که برای یک مسأله، پس از محاسبه‌ی q و v ($v = n - w \times q$. $q = \left\lfloor \frac{n}{w} \right\rfloor$) در صورتی که $v > 0$ باشد، ابتدا یک عدد صحیح تصادفی بین ۱ تا q (مثلا i) به عنوان شماره بسته‌ی نیمه‌پر تولید می‌شود. سپس برای هر یک از بسته‌های ۱ تا b-۱، w عدد صحیح تصادفی غیرتکراری از ۱ تا تعداد سفارش‌های انتخاب نشده به عنوان شماره‌ی سفارش تولید می‌شود. از بین مابقی سفارش‌ها که انتخاب نشده‌اند، v تا از آن‌ها به طور تصادفی برای بسته bام انتخاب می‌شود و به سایر بسته‌ها نیز هر یک به طور تصادفی w سفارش تخصیص می‌یابد. در صورتی که $v = 0$ باشد، تعداد کل سفارش‌ها مضربی از ظرفیت بسته‌های ارسالی می‌باشد و همه‌ی بسته‌ها دارای w سفارش می‌باشند. لذا در جواب تصادفی برای هر یک از بسته‌ها w سفارش به طور تصادفی انتخاب می‌گردد.

۳-۳. محاسبه تابع هدف یک جواب تصادفی

در جواب $\boldsymbol{S_k} = \left\{ \left(j_1^1.\dots.j_{w'_1}^1\right).\dots.\left(j_1^{q'}.\dots.j_{w_{q'}}^{q'}\right) \right\}$ که دارای q' بسته‌ی ارسالی می‌باشد، نحوه زمان‌بندی سفارش‌های موجود در یک بسته بر روی ماشین، تاثیری بر مقدار تابع هدف نخواهد داشت چرا که زمان خروج بسته از محل تولید برابر مجموع زمان-های پردازش همه‌ی محتویات آن به علاوه‌ی زمان خروج بسته‌ی ماقبل آن می‌باشد. از طرفی با توجه به تابع هدف مسأله که در بردارنده کمینه‌سازی هزینه حمل و نقل کالاها می‌باشد، ترتیب تحویل سفارش‌های موجود در یک بسته بر مقدار تابع هدف تاثیرگذار است. بنابراین از روش نزدیک‌ترین همسایه[۹] برای پیدا کردن مسیر مناسب استفاده می‌شود به این صورت که از میان سفارش‌های موجود برای هر بسته، هر کدام که کمترین هزینه را برای جابه‌جایی از محل تولید به محل دریافت سفارش مشتری مربوط) دارد، انتخاب کرده و پس از آن از میان سفارش‌های باقی‌مانده، هر یک که کمترین هزینه را برای انتقال از آخرین سفارش انتخاب شده دارد، انتخاب می‌شود و همین روند برای سایر سفارش‌ها نیز انجام می‌گیرد.

۳-۴. الگوریتم ابتکاری H^1

در کلیه الگوریتم‌های ابتکاری مطرح شده، این فرض در نظر گرفته شده است که از حداکثر ظرفیت یک وسیله‌ی حمل و نقل استفاده می‌گردد. لذا در هر مسأله حداکثر یک بسته‌ی نیمه‌پر وجود دارد و مابقی بسته‌ها کاملا پر فرستاده می‌گردند. البته باید متذکر شد که در نظر گرفتن چنین فرضی ممکن است امکان دستیابی به جواب بهینه را از بین ببرد. از آنجایی که ارسال یک سفارش، تنها در یک بسته ممکن است، لذا الگوریتم H^1 انتخاب بسته‌ها را به چندین طریق انجام می‌دهد؛ چرا که با فرض وجود q بسته‌ی پر و ۱ بسته‌ی نیمه‌پر، نحوه و ترتیب انتخاب بسته‌های ارسالی جواب‌های متفاوتی را ارائه می‌دهد. بدین ترتیب اگر تعداد کل کارها مضربی از ظرفیت بسته‌ها نباشد، این الگوریتم گزینش بسته‌ی نیمه‌پر را در تمامی حالات در نظر می‌گیرد (به عبارت دیگر اولین انتخاب یا دومین انتخاب، ... یا $q + 1$امین انتخاب مربوط به بسته‌ی نیمه‌پر باشد) و پس از بررسی جواب‌های حاصل بهترین حالت را انتخاب می‌کند.

با توجه به توضیحات داده شده، در این الگوریتم K جواب متمایز به دست آمده و مقایسه می‌گردد که اگر تعداد کل کارها مضربی از ظرفیت بسته‌ها باشد $K = 1$ و در غیر این صورت $K = q + 1$

خواهد بود.

گام‌های پیاده‌سازی این الگوریتم به شرح زیر می‌باشد:

گام ۱) با توجه به تعداد کل کارها (n) و ظرفیت بسته‌ها (w)، تعداد بسته‌های ارسالی پر ($q = \left\lfloor \frac{n}{w} \right\rfloor$) و تعداد کارهای موجود در تنها بسته ارسالی نیمه‌پر ($v = n - w \times q$)، را محاسبه کنید. اگر $v > 0$ باشد، مقدار K (تعداد جواب‌ها) و همچنین تعداد کل بسته‌ها (q') را معادل $q + 1$ قرار دهید و در غیر این صورت قرار دهید $K = 1$ و $q' = q$.

گام ۲) گر $v > 0$ باشد در جواب kام ($k = 1.2.\dots.K$)، kامین بسته انتخاب شده نیمه‌پر است ($w'_k = v$)، در غیر این صورت در تنها جواب موجود همه‌ی بسته‌ها w سفارش خواهند داشت. قرار دهید $k = 1$ و $F_{best} = M$.

گام ۳) قرار دهید $b = 1$.

گام ۴) در صورتی که $b \le q'$ باشد، w'_b را اندازه‌ی بسته b (تعداد محتویات آن) در نظر بگیرید. در غیر این صورت به گام ۸ بروید.

گام ۵) برای هر یک از سفارش‌های موجود (فرستاده نشده) مقدار $R_i = \alpha \times p_i + (1 - \alpha) \times c_{0i}$ را محاسبه کرده و سفارشی را که دارای کمترین مقدار R_i است، به عنوان اولین سفارش زمان‌بندی شده بر روی ماشین و همچنین ارسال شده (در بین سفارش‌های بسته k) در نظر بگیرید و آن را با اندیس (۱) نمایش دهید.

گام ۶) انتخاب jامین سفارش به صورت مشابه انجام می‌گیرد، با این تفاوت که $R_i = \alpha \times p_i + (1 - \alpha) \times c_{(j-1)i}$. بدین ترتیب $w'_b - 1$ سفارش دیگر را برای بسته b انتخاب کنید. ($j = 1.2.\dots.w'_b$)

گام ۷) قرار دهید $b = b + 1$ و به گام ۴ بروید.

گام ۸) برای هر یک از بسته‌های انتخاب شده مجموع زمان-های پردازش کالاهای موجود در آن را بر تعداد محتویات آن تقسیم نموده و مقدار حاصل را با R'_{kj} نمایش دهید. ($j = 1.2.\dots.q'$)

گام ۹) R'_{kj} ($j = 1.2.\dots.q'$) را به طور غیر نزولی مرتب کرده و بر این اساس اعضای انتخاب شده را که در واقع بسته-های ارسالی می‌باشند، بر روی ماشین زمان‌بندی کنید. (سفارش‌های انتخاب شده برای هر بسته را نیز به همان ترتیب که انتخاب شده‌اند، بر روی ماشین زمان‌بندی کنید.)

گام ۱۰) ارسال سفارش‌های موجود در هر بسته به همان ترتیب زمان‌بندی بر روی ماشین انجام می‌گیرد، بنابراین با توجه به زمان‌بندی به دست آمده تابع هدف (F_k) را محاسبه کرده و آن را با F_{best} مقایسه کنید، اگر $F_k < F_{best}$ مقدار F_k را در F_{best} قرار دهید.

گام ۱۱) اگر $k < K$ قرار دهید $k = k + 1$ و به گام ۳ بروید. در غیر این صورت مقدار F_{best} را به عنوان جواب نهایی ارائه دهید.

۳-۵. الگوریتم ابتکاری $\mathbf{H^f}$

این الگوریتم بر اساس رویکر حریصانه اولین بهبود می‌باشد. در این روش با شروع از یک جواب اولیه، همسایگی‌های آن را جستجو کرده و اولین همسایگی را که بهبودی در تابع هدف ایجاد می‌کند، شناسایی نموده و بر اساس آن جواب فعلی به‌روز می‌شود. پس از به‌روزرسانی، شروع جستجو در همسایگی جواب فعلی آغاز می-گردد. این الگوریتم تا زمانی که هیچ بهبودی در جواب فعلی حاصل نشود، ادامه می‌یابد. در ادامه به توضیح این الگوریتم پرداخته شده است.

گام ۱) قرار دهید $k = 0$ و جواب اولیه $\boldsymbol{S_k}$ را یک جواب تصادفی در نظر بگیرید و F_k را برابر مقدار تابع هدف آن جواب در نظر بگیرید.

گام ۲) تعداد همسایگی‌های جواب $\boldsymbol{S_k}$ را طبق رابطه $T_k = \sum_{b=1}^{q'-1} w'_b \sum_{b'=b+1}^{q'} w'_{b'}$ محاسبه کنید.

گام ۳) قرار دهید $i = 1$.

گام ۴) در صورتی که $i \le T_k$ باشد، برای جواب $\boldsymbol{S_k}$ همسایگی iام ($\boldsymbol{S_k^i}$) را مطابق الگوریتم مطرح شده در بخش ۳-۳ تولید کرده و مقدار تابع هدف آن را معادل F_k^i قرار دهید. در غیر این صورت به گام ۶ بروید.

گام ۵) اگر $F_k^i < F_k$ باشد، قرار دهید $F_k = F_k^i$، $\boldsymbol{S_k} = \boldsymbol{S_k^i}$، $k = k + 1$ و به گام ۲ بروید. در غیر این صورت، قرار دهید $i = i + 1$ و به گام ۴ بروید.

گام ۶) جواب $\boldsymbol{S_0}$ را به عنوان جواب نهایی و مقدار F_{k-1} را به عنوان تابع هدف آن ارائه دهید.

۳-۶. الگوریتم ابتکاری $\mathbf{H^b}$

این الگوریتم بر اساس رویکر حریصانه بیشترین بهبود می‌باشد. در این روش ابتدا کلیه همسایگی‌های یک جواب را ایجاد و پس از مقایسه آن‌ها، بهترین آن را انتخاب کرده و بر اساس آن جواب فعلی به‌روز می‌شود. پس از به‌روزرسانی، جستجو پیرامون همسایگی جواب فعلی ادامه می‌یابد. شرط توقف این الگوریتم عدم بهبود جواب فعلی می‌باشد. شرح گام به گام این روش در ذیل آورده شده است.

گام ۱) قرار دهید $k = 0$ و جواب اولیه $\boldsymbol{S_k}$ را یک جواب تصادفی در نظر بگیرید و F_k را برابر مقدار تابع هدف آن

جواب قرار دهید.

گام ۲) تعداد همسایگی‌ها برای جواب فعلی ($\boldsymbol{S_k}$) را طبق فرمول $T_k = \sum_{b=1}^{q'-1} w'_b \sum_{b'=b+1}^{q'} w'_{b'}$ به‌دست آورید.

گام ۳) به ازای $i = 1.2.\ldots.T_0$، برای جواب $\boldsymbol{S_k}$ همسایگی $\boldsymbol{i}$ام ($\boldsymbol{S_k^i}$) را تولید کرده و تابع هدف آن را (F_k^i) محاسبه کنید.

گام ۴) در بین مقادیر F_k^i، ($i = 1.2.\ldots.T_k$)، کمترین مقدار را انتخاب کنید، اگر این مقدار کمتر از F_k بود، آن را در F_k قرار دهید. جواب حاصل از آن را نیز در $\boldsymbol{S_k}$ قرار داده و به گام ۲ بروید. در غیر این صورت توقف کرده و جواب $\boldsymbol{S_{k-1}}$ را به عنوان جواب نهایی و F_k را به عنوان مقدار تابع هدف ارائه دهید.

برای درک بهتر تفاوت دو الگوریتم فوق، جواب اولیه $\boldsymbol{S_0} = \{(2.1).(5.4).(3)\}$ در بخش ۳-۱ را در نظر بگیرید. در جدول ۲ برای مقایسه، چند گام از هر دو الگوریتم آورده شده است.

جدول ۳. گام‌های پیاده‌سازی دو الگوریتم در مثال

		الگوریتم $\mathrm{H^f}$		الگوریتم $\mathrm{H^b}$	
	جواب فعلی			۱۵۳.۲ : مقدار تابع هدف ⇦ $S_0 = \{(2,1),(5,4),(3)\}$	
گام اول	همسایگی‌ها	$S_1 = \{(5,1),(2,4),(3)\}$	۱۵۴.۸ ✗	$S_1 = \{(5,1),(2,4),(3)\}$	۱۵۴.۸
		$S_2 = \{(4,1),(5,2),(3)\}$	۱۵۵ ✗	$S_2 = \{(4,1),(5,2),(3)\}$	۱۵۵
		$S_3 = \{(3,1),(5,4),(2)\}$	۱۵۳.۸ ✗	$S_3 = \{(3,1),(5,4),(2)\}$	۱۵۳.۸
		$S_4 = \{(2,5),(1,4),(3)\}$	۱۵۲.۵ ☑	$S_4 = \{(2,5),(1,4),(3)\}$	۱۵۲.۵
				$S_5 = \{(2,4),(5,1),(3)\}$	۱۵۸
				$S_6 = \{(2,3),(5,4),(1)\}$	۱۵۴.۸
				$S_7 = \{(2,1),(3,4),(5)\}$	۱۵۲ ☑
				$S_8 = \{(2,1),(5,4),(3)\}$	۱۵۳
	جواب فعلی	$S_0 = \{(2,5),(1,4),(3)\}$	۱۵۲.۵	$S_0 = \{(2,1),(3,4),(5)\}$	۱۵۲
گام دوم	همسایگی‌ها	$S_1 = \{(3,1),(2,4),(5)\}$	۱۵۴ ✗	$S_1 = \{(3,1),(2,4),(5)\}$	۱۵۴
		$S_2 = \{(4,1),(3,2),(5)\}$	۱۵۳.۵ ✗	$S_2 = \{(4,1),(3,2),(5)\}$	۱۵۳.۵
		$S_3 = \{(5,1),(3,4),(2)\}$	۱۵۳.۲ ✗	$S_3 = \{(5,1),(3,4),(2)\}$	۱۵۳.۲
		$S_4 = \{(2,3),(1,4),(5)\}$	۱۵۱.۸ ✗	$S_4 = \{(2,3),(1,4),(5)\}$	۱۵۱.۸
		$S_5 = \{(2,4),(3,1),(5)\}$	۱۵۱ ☑	$S_5 = \{(2,4),(3,1),(5)\}$	۱۵۱ ☑
				$S_6 = \{(2,5),(3,4),(1)\}$	۱۵۳.۵
				$S_7 = \{(2,1),(5,4),(3)\}$	۱۵۳
				$S_8 = \{(2,1),(3,5),(4)\}$	۱۵۴

۳-۷.الگوریتم ابتکاری $\mathbf{H^f + H^1}$

این الگوریتم کاملا مشابه الگوریتم $\mathrm{H^f}$ می‌باشد، با این تفاوت که در گام ۱ جواب اولیه $\boldsymbol{S_k}$، جواب حاصل از الگوریتم $\mathbf{H^1}$ در نظر گرفته شده است.

۳-۸.الگوریتم ابتکاری $\mathbf{H^b + H^1}$

تفاوت این الگوریتم با الگوریتم $\mathbf{H^b}$ تنها در گام ۱ و جواب اولیه $\boldsymbol{S_k}$ می‌باشد که در آن $\boldsymbol{S_k}$ جواب حاصل از الگوریتم $\mathbf{H^1}$ در نظر گرفته شده است. سایر گام‌ها مشابه الگوریتم $\mathbf{H^b}$ می‌باشد.

۳-۹. الگوریتم جستجوی ممنوعه

یکی از معایب روش‌های جستجوی محلی، متوقف شدن آن‌ها در نقاط بهینه محلی است. Glover در سال ۱۹۸۶، یک الگوریتم فراابتکاری به نام جستجوی ممنوعه[۱۰] (TS)، برای رفع این مشکل مطرح نمود [۱۴]. در این روش پس از مواجه شدن به یک بهینه محلی، الگوریتم فرآیند جستجو را با حرکت به سمت جواب‌های غیربهبوددهنده ادامه می‌دهد. همچنین برای جلوگیری از بازگشت مجدد به جواب‌هایی که قبلا به دست آمده‌اند، از لیستی به نام لیست ممنوعه[۱۱] که در بردارنده پیشینه‌ی جستجو است، استفاده می‌شود. علاوه بر این، الگوریتم مطرح شده برای جستجوی تمامی قسمت‌های فضای جواب از دو عملگر تقویت[۱۲] و تنوع‌بخشی[۱۳] استفاده می‌کند. هدف از عملگر تقویت، جستجوی زیاد در قسمت-هایی با شانس بالای وجود جواب‌های خوب در آن‌ها و هدف از عملگر تنوع‌بخشی جستجو در قسمت‌هایی از فضای جواب است که قبلا مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. ساختار کلی الگوریتم جستجوی ممنوعه ما در شکل ۱ نشان داده شده است که در ادامه به توضیح جزئیات آن پرداخته شده است.

۳-۹-۱. فضای جستجو و ساختار همسایگی

انتخاب فضای جستجو و ساختار همسایگی مهم‌ترین گام در

طراحی هر الگوریتم جستجوی ممنوعه است [۱۵]. در این بخش همسایگی یک جواب از تغییر مجاز در شماره‌ی بسته‌ی سفارش‌های آن جواب حاصل می‌شود. بدین صورت که برای هر سفارش در جواب S'_0 بسته‌ی مربوط به آن سفارش حداکثر n_b بار تغییر می‌کند. تغییر مجاز در شماره بسته به این معناست که یک سفارش در بسته‌ی b در صورتی می‌تواند به بسته‌ی b' $(b' = b - {n_b}/_2 . \dots . b-1 . b+1 . \dots . b + {n_b}/_2)$ جابه‌جا شود که پس از این جابه‌جایی الف) تعداد سفارش‌های بسته‌ی b' از w تجاوز نکند، ب) تعداد محتویات بسته‌ی b صفر نشود. به عنوان مثال در جواب $\boldsymbol{S_0} = \{(1.2).(4).(3.5)\}$ سفارش‌های ۱ و ۲ در بسته‌ی اول، سفارش ۴ در بسته‌ی دوم و سفارش ۳ و ۵ در بسته‌ی آخر قرار داده شده است. این جواب را می‌توان به شکل $\boldsymbol{S'_0} = \{1.1.3.2.3\}$ نشان داد که در آن اعداد موجود در جایگاه ۱ تا ۵ شماره بسته‌ی سفارش ۱ تا ۵ را نمایش می‌دهد. با فرض اینکه $n_b = 2$ ، بسته‌ی مربوط به هر سفارش حداکثر ۲ بار تغییر خواهد کرد (ترجیحاً ۱ $({n_b}/_2)$ بار تغییر به بسته‌های ماقبل و ۱ $({n_b}/_2)$ بار تغییر به بسته‌های مابعد). بدین ترتیب همسایگی‌های این جواب عبارتند از:

$$S'_1 = \{2.1.3.2.3\} \Rightarrow S_1 = \{(2).(1.4).(3.5)\}$$
$$S'_2 = \{4.1.3.2.3\} \Rightarrow S_2 = \{(2).(4).(3.5).(1)\}$$
$$S'_3 = \{1.2.3.2.3\} \Rightarrow S_3 = \{(1).(2.4).(3.5)\}$$
$$S'_4 = \{1.4.3.2.3\} \Rightarrow S_4 = \{(1).(4).(3.5).(2)\}$$
$$S'_5 = \{1.1.2.2.3\} \Rightarrow S_5 = \{(1.2).(3.4).(5)\}$$
$$S'_6 = \{1.1.4.2.3\} \Rightarrow S_6 = \{(1.2).(4).(5).(3)\}$$
$$S'_7 = \{1.1.3.2.2\} \Rightarrow S_7 = \{(1.2).(4.5).(3)\}$$
$$S'_8 = \{1.1.3.2.4\} \Rightarrow S_8 = \{(1.2).(4).(3).(5)\}$$

بدیهی است که در این صورت فضای جستجو جواب‌های با بیش از q' بسته را نیز دربر می‌گیرد. این در حالی است که در بخش روش‌های جستجوی محلی با توجه به نحوه‌ی تعریف همسایگی، این قبیل جواب‌ها مورد بررسی قرار نمی‌گرفت.

۳-۹-۲. لیست ممنوعه و معیار آزادسازی[۱۴] از آن

از این لیست کوتاه‌مدت برای جلوگیری از بازگشت به جواب‌های تکراری استفاده می‌شود. با شروع از یک جواب اولیه، پس از انجام هر حرکت به یک جواب همسایه، لیست ممنوعه با طول L_T به روزرسانی می‌گردد. به این ترتیب که اگر حرکت به یک همسایگی منجر به تغییر بسته‌ی سفارش o از b به b' گردد، بسته‌ی b برای سفارش o به لیست ممنوعه اضافه می‌شود و در صورتی که تعداد همسایگی‌های ممنوع از L_T بیشتر شود، اولین عضو وارد شده به لیست از آن خارج می‌شود، چرا که لیست ممنوعه توانایی نگهداری حداکثر L_T عضو را دارا می‌باشد. برای مثال اگر از میان همسایگی‌های جواب $\boldsymbol{S_0}$ در قسمت قبل، $\boldsymbol{S_7} = \{(1.2).(4.5).(3)\}$ به عنوان بهترین آن‌ها انتخاب گردد، عضو (5.3) به لیست اضافه می‌شود (عدد اول بیانگر شماره سفارش و عدد دوم شماره بسته می‌باشد، یعنی وجود سفارش ۵ در بسته‌ی ۳ ممنوع تلقی می‌گردد). از آنجایی که تعریف این لیست ممکن است مانع از بررسی جواب‌های خوب شود، ایجاد یک حرکت حتی اگر در موارد ممنوعه لحاظ شده باشد، در صورتی که منجر به جوابی بهتر از بهترین جواب موجود گردد، مجاز می‌باشد.

۳-۹-۳. عملگر تقویت

عملگر تقویت برای این الگوریتم به این صورت طراحی شده است که بر اساس تعداد دفعاتی که از شروع الگوریتم، هر سفارش در هر بسته باعث بهبود جواب شده است، به هر همسایگی جواب فعلی امتیازی داده می‌شود. سپس همسایگی‌ای که دارای بیشترین امتیاز است برای جستجوهای بعدی انتخاب می‌شود. این عملگر برای بررسی ویژگی مشترک کلیه جواب‌های بهبود داده شده و جستجوی بیشتر همسایگی نواحی آن‌ها انجام می‌شود.

۳-۹-۴. عملگر تنوع‌بخشی

برای پیاده‌سازی این عملگر که منجر به جستجو در قسمت‌های جستجو نشده‌ی فضای جواب می‌گردد، از شروع الگوریتم، بر اساس تعداد دفعاتی که هر سفارش در هر بسته قرار گرفته است (صرف‌نظر از بهبود یا عدم بهبود جواب) به همسایگی‌های جواب فعلی امتیازی داده می‌شود. سپس همسایگی‌ای که کمترین امتیاز را دارد انتخاب می‌شود. از این عملگرها زمانی استفاده می‌شود که پس از max_{itr} تکرار، بهبودی در بهترین جواب ایجاد نشده باشد. در این صورت اگر تعداد تکرارهایی که جواب را نسبت به جواب فعلی بهبود داده‌اند، بیشتر از تکرارهایی باشد که بهترین جواب را تغییر نداده‌اند، از عملگر تقویت و در غیر این صورت از عملگر تنوع بخشی استفاده می‌شود. شرط خاتمه محدودیت زمان تعریف شده و شمای کلی الگوریتم جستجوی ممنوعه در ادامه آورده شده است.

۴. نتایج محاسباتی

کلیه روش‌های حل ارائه شده در این تحقیق در محیط Microsoft visual C++ 2010، بر روی رایانه‌ای با مشخصات CPU Core i7، 4GB RAMکه مجهز به سیستم عامل Windows XP بوده، کد نویسی شده است و نتایج حاصل در ادامه آورده شده است.

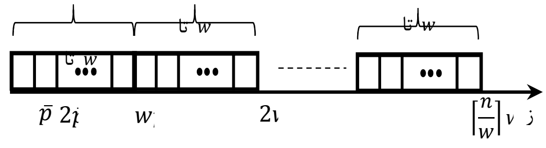
۴-۱. نحوه ایجاد نمونه مسائل

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مطرح شده و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، مثال‌های تصادفی در ۳ اندازه کوچک (۵۴۰ نمونه

مسأله)، متوسط (۱۶۲۰ نمونه مسأله) و بزرگ (۱۶۲۰ نمونه مسأله) تولید شده است که نحوه تولید این مثال‌ها به شرح زیر می‌باشد. برای مسائل با اندازه کوچک، تعداد کارها (n) ۵، ۶، ۷، برای اندازه متوسط ۲۰، ۳۰، ۴۰ و برای اندازه بزرگ ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ در نظر گرفته شده است که زمان پردازش آن‌ها یک عدد تصادفی از توزیع گسسته یکنواخت $U[1.100]$ می‌باشد. ظرفیت وسایل نقلیه در مسائل کوچک ۲ و در مسائل متوسط و بزرگ اعداد ۵، ۱۰، ۱۵، پارامتر وزن‌دهی در تابع هدف ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸ و تعداد کل مشتریان اعداد ۲، ۳، ۴، ۵ را اختیار می‌کند. محل استقرار مشتریان به طور یکنواخت در مربعی به عرض λ پراکنده شده که تولیدکننده در مرکز آن واقع شده است. برای این پارامتر (λ) مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ انتخاب شده است و زمان جابه‌جایی میان دو مشتری i و j (τ_{ij}) معادل قسمت صحیح فاصله اقلیدسی آن دو در نظر گرفته می‌شود. هزینه ثابت جهت هر بار ارسال یک بسته یک عدد تصادفی از توزیع گسسته یکنواخت $U[50\rho.250\rho]$ و هزینه متغیر c_{ij} اعداد صحیح تصادفی از توزیع گسسته یکنواخت $U[0.8t_{ij}\rho.1.2t_{ij}\rho]$ می‌باشد، به طوری که ρ یک پارامتر هم مقیاس‌سازی برای هم واحد نمودن مقادیر D_{mean} (میانگین زمان‌های تحویل) و T (کل هزینه حمل و نقل) می‌باشد و از تقسیم مقدار تقریبی متوسط D_{mean} بر مقدار تقریبی متوسط T حاصل می‌شود که در ادامه نحوه محاسبه آنها تشریح شده است. در نهایت برای از بین بردن خاصیت تصادفی بودن نتایج داده‌های اولیه، هر نمونه مسأله با پارامترهای یکسان ۵ بار تولید شده و بدین ترتیب ۵۴۰ مسأله در اندازه کوچک، ۱۶۲۰ نمونه مسأله در اندازه متوسط و ۱۶۲۰ مسأله بزرگ تولید شده که کلیه روش‌ها با استفاده از این تعداد مسأله تحلیل می‌گردند.

۴-۱-۱. محاسبه مقدار تقریبی متوسط D_{mean}

با فرض وجود n کار (سفارش) و ظرفیت w و ارسال بسته‌ها به صورت پر، سفارش‌ها حداکثر در $\left\lceil\frac{n}{w}\right\rceil$ بسته، بسته‌بندی می‌گردند. زمان‌بندی تقریبی کارها بر روی ماشین به شکل زیر خواهد بود.



با توجه به حداقل و حداکثر فاصله بین دو مشتری (صفر و $\sqrt{2}\lambda$)، میانگین فاصله‌ی $\frac{\sqrt{2}}{2}\lambda$ برای هر دو مشتری در نظر گرفته می‌شود و با توجه به وجود n سفارش مربوط به k مشتری، هر w سفارش مربوط به $\frac{kw}{n}$ مشتری می‌باشد، لذا برای بسته‌ی iام که شامل w سفارش بوده و پردازش آن‌ها بر روی ماشین در زمان $iw\bar{p}$ پایان می یابد، نیاز به زمانی معادل $\frac{\sqrt{2}}{2}\lambda\frac{kw}{n}$ واحد جهت ارسال سفارش‌های آن وجود دارد. بدین ترتیب میانگین زمان تحویل n سفارش به مشتریان مربوطه عبارتست از

میانگین زمان لازم برای رسیدن بدست مشتری + میانگین زمان خروج از محل تولید

$$\frac{w\times\left(w\bar{p}+2w\bar{p}+\cdots+\left\lceil\frac{n}{w}\right\rceil w\bar{p}\right)}{\left\lceil\frac{n}{w}\right\rceil\times w}+\frac{\sqrt{2}\lambda}{2}\times\frac{kw}{n\times w}$$
$$=\frac{w\bar{p}n\times\left(\left\lceil\frac{n}{w}\right\rceil+1\right)+\sqrt{2}\lambda k}{2n}$$

۴-۱-۲. محاسبه مقدار تقریبی متوسط T

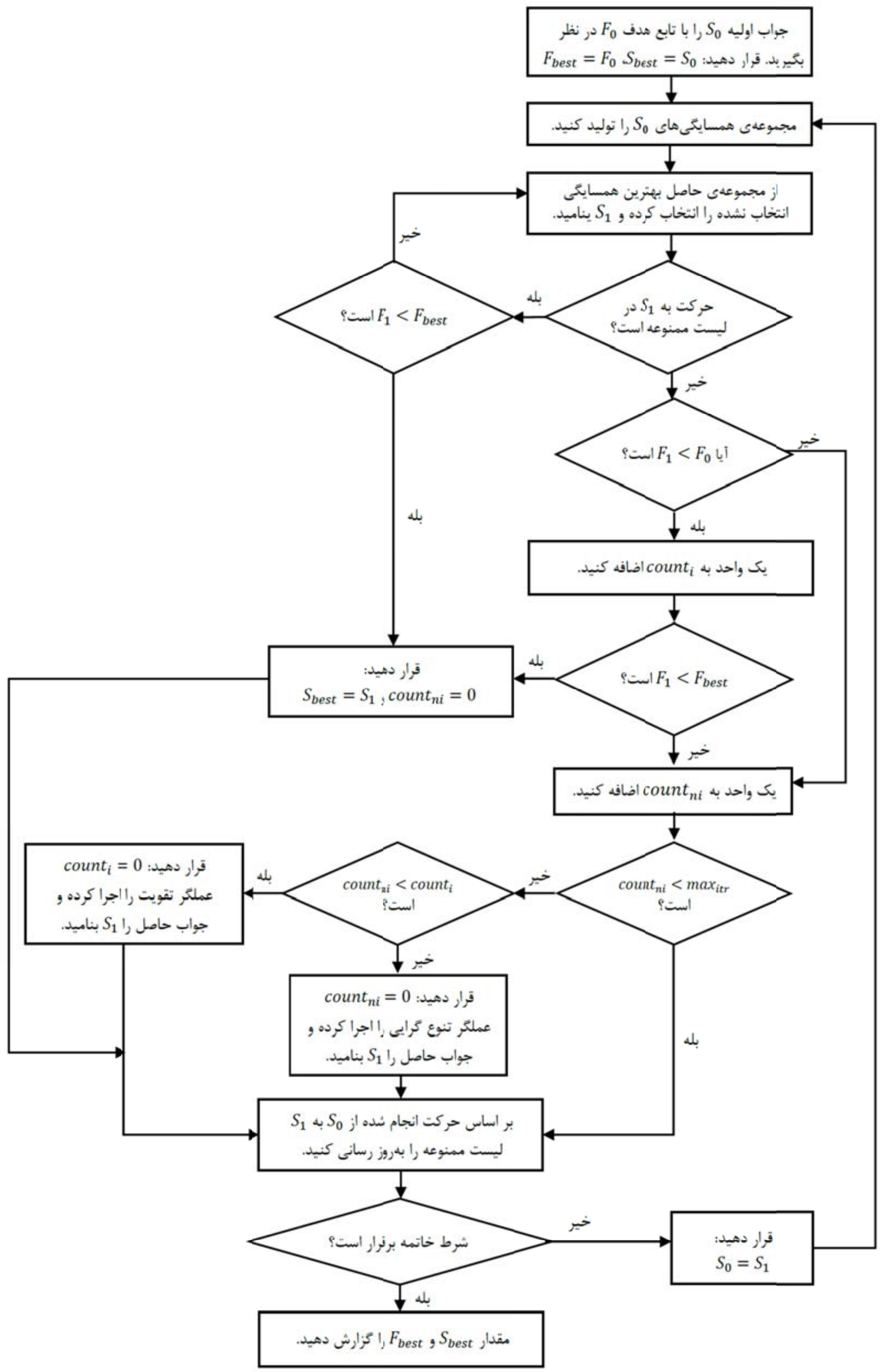
از آنجایی که هزینه جابه‌جایی از هزینه ثابت و هزینه متغیر تشکیل شده و تعداد حداکثر $\left\lceil\frac{n}{w}\right\rceil$ بسته در نظر گرفته شده است، متوسط هزینه‌ی کل معادل $\left\lceil\frac{n}{w}\right\rceil\times 150+\left\lceil\frac{n}{w}\right\rceil\frac{\sqrt{2}}{2}\lambda\times\frac{kw}{n}$ می‌باشد.

۴-۲. تنظیم پارامترها

در الگوریتم جستجوی ممنوعه برای هر یک از ۳ پارامتر L_T، n_b و max_{itr}، ۳ مقدار متفاوت در نظر گرفته شده است. با استفاده از تئوری طراحی آزمایشها و پس از مقایسه این مقادیر در نتایج اجرای برنامه، مقدار مناسب این پارامترها برای ۳ اندازه‌ی مسائل مختلف به صورت زیر انتخاب شده است.

۴-۳. مقایسه روش‌های ابتکاری

برای مقایسه روش‌های مطرح شده، ابتدا کلیه الگوریتم‌های H^1، H^f، H^b، $\mathrm{H}^\mathrm{f}+\mathrm{H}^1$، $\mathrm{H}^\mathrm{b}+\mathrm{H}^1$ (۱ تا ۵) و همچنین الگوریتم جستجوی ممنوعه با محدودیت زمانی ۱، ۵، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه اجرا شده و مقادیر جدول ۵ برای مسائل متوسط و بزرگ میانگین درصد انحراف هر روش از بهترین جواب به دست آمده و همچنین متوسط زمان اجرای هر مسأله (به ثانیه) را در داخل پرانتز نمایش می‌دهد. بهترین جواب به دست آمده بر اساس اجرای تمام روش‌های طراحی شده در این مقاله برای هر نمونه مسأله



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم جستجوی ممنوعه

جدول ۴. مقادیر کلی پارامترها

پارامتر	مقادیر		
n_b	۲	۴	۶
L_T	$\frac{n}{2}$	n	$2n$
max_{itr}	۵	۱۰	۱۵

جدول ۵. مقدار پارامترها برای مسائل مختلف

اندازه مسأله	n_b	L_T	max_{itr}
کوچک	۴	$\frac{n}{2}$	۵
متوسط	۶	$\frac{n}{2}$	۱۵
بزرگ	۴	$2n$	۱۵

به دست آمده است. برای مسائل با اندازه‌ی کوچک نیز مدل ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX_Optimizer نسخه‌ی 12.3 حل شده و از جواب آن برای مقایسه روش‌ها استفاده شده است (میانگین زمان حل برای مسائلی با ۵ سفارش ۶ ثانیه، ۶ سفارش ۴ دقیقه و ۷ سفارش در حدود ۴/۵ ساعت می‌باشد)، لذا مقادیر جدول برای مسائل کوچک از مقایسه با جواب دقیق حاصل شده است.

جدول ۶. مقایسه روش‌های ابتکاری

الگوریتم / اندازه مسئله	H^1	H^f	H^b	$H^f + H^1$	$H^b + H^1$
کوچک	۵/۳۹	۳/۴۷۲	۶/۰۶۹	۱/۹۸۱	۲/۷۰۹
	(۰/۰۰۷)	(۰/۰۰۹)	(۰/۰۰۷)	(۰/۰۰۷)	(۰/۰۱۵)
متوسط	۸/۴۳۸	۱۰/۴۷۰	۳۰/۱۹۷	۴/۷۹۹	۵/۸۳۹
	(۰/۰۰۲)	(۵۵۱/۱۳۱)	(۰/۰۰۷)	(۰/۰۱۲)	(۰/۰۰۴)
بزرگ	۱/۱۷۸	۱۵/۸۹۳	۶۶/۶۱۲	۰/۵۵۰	۰/۸۹۶
	(۰/۰۳۶)	(۱۳۹/۹۸۴)	(۰/۴۷۹)	(۷/۵۱۱)	(۰/۱۴۶)

با توجه به مقادیر به دست آمده، مشاهده می‌شود که در بین ۵ روش ابتکاری ارائه شده، الگوریتم $H^f + H^1$ در هر سه گروه نمونه مسأله، انحراف کمتری نسبت به بهترین جواب شناخته شده دارد. این روش با شروع از جواب اولیه تصادفی (الگوریتم H^f) جواب بدتری را ارائه می‌دهد، که این مطلب نشان‌دهنده تاثیر جواب اولیه در روش‌های جستجوی محلی می‌باشد. بر خلاف انتظار روش بیشترین بهبود چه با استفاده از جواب اولیه تصادفی (الگوریتم H^b) و چه با استفاده از جواب به دست آمده از یک الگوریتم حریصانه ($H^b + H^1$) دارای انحراف بیشتری نسبت به جواب حاصل از سایر روش‌ها می‌باشد، که این بدان معناست که این الگوریتم با انتخاب بهترین‌ها، در نقاط بهینه محلی متوقف می‌شود.

۴-۴. نتایج الگوریتم جستجوی ممنوعه

مقایسه جواب‌های اجرای الگوریتم TS در زمان‌های مختلف با بهترین جواب به‌دست آمده در جدول ۷ ارائه شده است.

با بررسی نتایج جدول مشاهده می‌شود که الگوریتم جستجوی ممنوعه درصد انحراف را برای هر سه گروه نمونه مسأله کاهش داده است. البته این روش با افزایش اندازه مسأله انحراف کمتری از بهترین جواب شناخته شده ایجاد می‌کند، که این مطلب می‌تواند به دلیل فاصله جواب حاصل از کلیه روش‌ها از جواب بهینه باشد.

برای بررسی کارایی عملگرهای تقویت و تنوع‌بخشی، این دو عملگر حذف شده و الگوریتم با محدودیت زمانی ۱ ثانیه حل شده است. همانطور که در شکل ۲ آورده شده، استفاده از این دو عملگر باعث بهبود جواب در کلیه مسائل شده است.

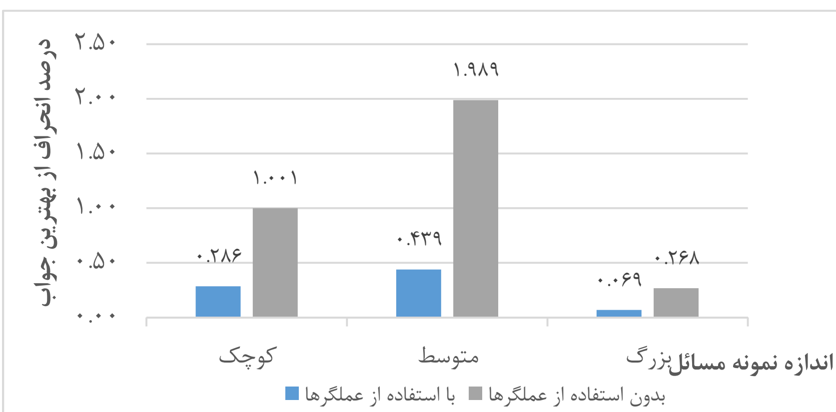
جدول ۷. متوسط درصد انحراف جواب حاصل از اجرای الگوریتم جستجوی ممنوعه از بهترین جواب

الگوریتم / اندازه مسئله	۱ (ثانیه)	۵ (ثانیه)	۱۰ (ثانیه)	۳۰ (ثانیه)	۶۰ (ثانیه)
کوچک	۰/۲۸۶	۰/۲۰۸	۰/۱۷۷	۰/۱۷۷	۰/۱۷۲
متوسط	۰/۶۵۲	۰/۵۳۷	۰/۵۱۵	۰/۴۵۹	۰/۴۴۲
بزرگ	۰/۵۰۴	۰/۴۲۴	۰/۳۹۸	۰/۳۷۸	۰/۳۶۹

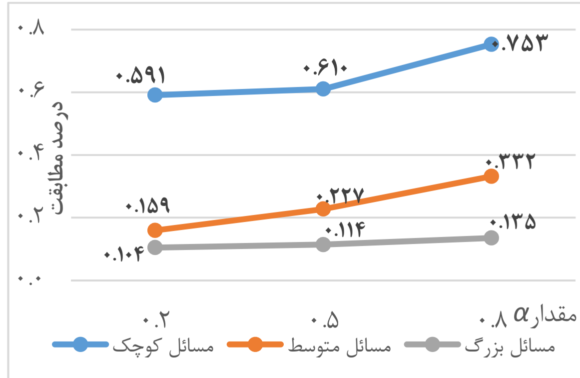
۴-۵. اثر ضریب α

با توجه به تابع هدف مسأله که برابر $\alpha D_{mean} + (1-\alpha)T$ می‌باشد، بدیهی است که با افزایش مقدار α تابع D_{mean} که بیانگر زمان تحویل سفارش به مشتری می‌باشد، اهمیت بیشتری می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش این مقدار، بهینه کردن زمان‌بندی تولید سفارش‌ها پررنگ شده و مسأله را می‌توان به عنوان یک مسأله زمان‌بندی در محیط تک‌ماشینی در نظر گرفت. مقدار بهینه این قبیل مسائل با تابع هدف مجموع زمان‌های تکمیل با استفاده از قاعده SPT[۱۵] (کارها بر اساس زمان پردازش به‌صورت غیرنزولی مرتب و پردازش شوند) حاصل می‌شود[۱۶]. با بررسی جواب‌های نمونه مسائل کوچک مشاهده می‌شود که در مسائل با $\alpha = 0.2$ ۲۷ درصد از جواب‌ها از قاعده SPT پیروی می‌کند که این مقدار در مسائلی با $\alpha = 0.8$ برابر ۴۵ درصد است.

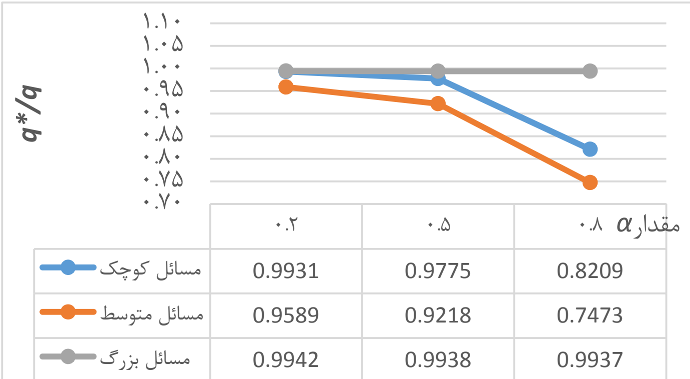
برای مقایسه جامع‌تر، توالی به دست آمده در جواب هر مسأله با توالی حاصل از قاعده SPT مطابقت داده شده و بر اساس میزان شباهت این دو جواب عددی به عنوان "درصد مطابقت" به دست آمده است. شکل ۳ میانگین این مقدار را برای تمامی مسائل نشان می‌دهد.



شکل ۲. بررسی کارایی عملگرها



شکل ۳. تاثیر α بر نحوه زمان‌بندی



شکل ۴.تاثیر α بر نحوه بسته‌بندی

از طرف دیگر کاهش ضریب α، اهمیت تابع T (هزینه حمل و نقل) را افزایش می‌دهد. از آنجایی که ارسال بسته‌ها علاوه بر هزینه متغیر دربردارنده هزینه ثابت می‌باشد، می‌توان گفت که ارسال سفارش‌ها در حداقل تعداد بسته‌ی ممکن می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ی حمل و نقل گردد. لذا انتظار می‌رود که با کاهش α برای دستیابی به هزینه‌ی حمل و نقل کمتر، نسبت حداقل تعداد بسته-های ممکن ($q^* = \left\lceil \frac{n}{w} \right\rceil$) به کل بسته‌ها ($q$) در جواب به‌دست آمده کاهش یابد. در شکل ۴ مقایسه نتیجه حاصل از بررسی مسائل در این رابطه آورده شده است.

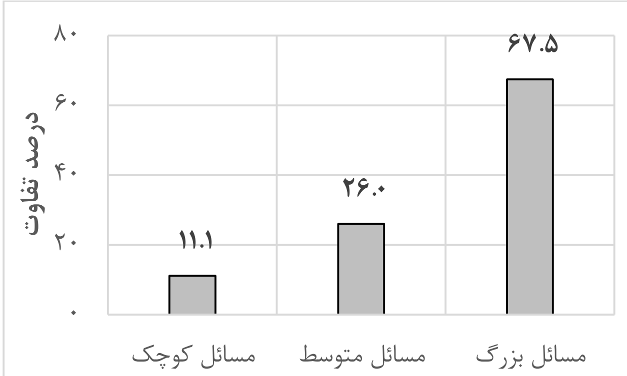
۴-۶. اثر یکپارچه‌سازی

جهت بررسی مسأله مطرح شده تحت عنوان زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از مسأله زمان-بندی تولید و توزیع محصولات به صورت غیریکپارچه مقایسه - گردده است. بدین منظور در کلیه نمونه مسائل تولید شده، ابتدا مسأله زمان‌بندی تولید با هدف حداقل‌سازی زمان‌های تکمیل سفارش‌ها، بدون در نظر گرفتن نحوه توزیع و با استفاده از قاعده SPT که منجر به جواب بهینه در این گونه مسائل زمان‌بندی می-گردد (بخش ۴-۴)، حل شده و سپس جهت تعیین چگونگی ارسال سفارش‌ها، بسته‌بندی سفارش‌های آماده شده به ترتیب پردازش آن‌ها بر روی ماشین و بلافاصله پس از تکمیل آن‌ها انجام می‌گیرد، به طوری که در تمامی بسته‌ها (به جز بسته آخر، در صورتی که تعداد سفارش‌ها به ظرفیت بسته‌ها بخش‌پذیر نباشد) w سفارش گنجانده می‌شود. به عبارت دیگر از حداکثر ظرفیت وسایل نقلیه استفاده می‌گردد. نحوه مسیریابی برای تحویل سفارش‌های موجود در هر بسته نیز همانند مسأله دو مرحله‌ای از طریق روش نزدیک‌ترین همسایه (بخش ۳-۳) انجام می‌گیرد.

در نهایت جواب حاصل از حل مسأله به صورت غیریکپارچه، با جواب به دست آمده از الگوریتم TS با محدودیت زمانی ۱ ثانیه برای مسأله دو مرحله‌ای (یکپارچه) مقایسه می‌گردد. به این صورت که برای حل مسأله تفاوت بین تابع هدف‌های حاصل از هر دو حالت به صورت درصدی تحت عنوان درصد تفاوت به دست آمده و میانگین این مقادیر برای کلیه مسائل در سه اندازه مختلف در شکل ۵ آورده شده است.

$$\left(\frac{\text{تابع هدف مسأله غیریکپارچه} - \text{تابع هدف مسأله یکپارچه}}{\text{تابع هدف مسأله یکپارچه}} * 100\right)$$

همانطور که در شکل ۵ مشهود است، حل مسأله به صورت غیریکپارچه منجر به بیشتر شدن مقادیر تابع هدف و در نتیجه افزایش هزینه‌ها و زمان تحویل سفارش‌ها شده که این مطلب منجر به کاهش کارایی تولیدکننده و نارضایتی مشتریان می‌گردد. لازم به ذکر است که تفاوت در دو حالت یکپارچه و غیریکپارچه، با افزایش ابعاد مسأله و پیچیدگی آن افزایش می‌یابد. نتایج حاصل حاکی از آن است که در مسائل کوچک ۲۰٪ نمونه مسائل دارای جواب یکسان برای هر دو حالت می‌باشد.



شکل ۵. تاثیر یکپارچه‌سازی

این در حالی است که این عدد در نمونه مسائل متوسط تنها ۱٪ و در مسائل بزرگ صفر می‌باشد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه با هدف زمان‌بندی یکپارچه‌ی دو مرحله از یک زنجیره تأمین (تولید و توزیع) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ارائه و پیاده‌سازی شد که به دلیل پیچیدگی بالای مسأله، مدل طراحی شده تنها قادر به حل مسائل با ابعاد کوچک است. برای حل مسائلی با اندازه‌های بزرگ یک روش حل ابتکاری و دو نوع جستجوی محلی (اولین بهبود و بهترین بهبود) مطرح شد. برای دستیابی به جواب‌های بهتر از روش فراابتکاری جستجوی ممنوعه نیز استفاده گردید که این روش در مقایسه با حل دقیق مسائل کوچک انحراف ۰/۱۷درصدی داشته و در سایر مسائل با مقایسه بهترین جواب حاصل از همه الگوریتم‌ها به طور میانگین دارای ۰/۴ درصد است که بیانگر کارایی این الگوریتم می‌باشد.

بررسی نتایج حاصل از تغییر ضریب α در تابع هدف نشان داد که افزایش این پارامتر منجر به تطابق بیشتر جواب‌های به دست آمده با قاعده SPT می‌گردد، ضمن اینکه در صورت کاهش آن، که اهمیت بیشتر تابع T را به دنبال دارد، ارسال بسته‌ها به صورت نیمه‌پر و تا حد امکان در حداقل تعداد آن‌ها می‌تواند مفیدتر واقع گردد. در پایان مقایسه مسأله با حالت غیر یکپاچه آن نشان داد که در نظر گرفتن هم زمان هر دو مرحله تنظیم تولید و تحویل مواد (یکپارچه) جواب-های به دست آمده را، به خصوص در مسائل بزرگ، تا حد زیادی بهبود خواهد داد.

از جمله پیشنهادات برای تحقیقات آتی می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد. در نظر گرفتن سایر محیط‌های تولیدی مانند ماشین‌های موازی یا محیط‌های کارگاهی برای تولیدکننده به دلیل تطابق بیشتر با شرایط واقعی، لحاظ نمودن اندازه‌ی هر سفارش در زمان بسته‌بندی، به این صورت که هر سفارش فضای خاصی را در وسیله حمل اشغال کند، در نظر گرفتن مهلت جهت تحویل سفارش‌ها به مشتریان و اعمال جریمه در صورت عدم تحویل به موقع آن‌ها و بررسی تابع هدف‌های دیگر همچون کمینه کردن تأخیرهای صورت گرفته در تحویل سفارش‌ها.

پی نوشت

1. Single machine
2. Parallel machines
3. Flow shop
4. Makespan
5. Due date
6. Ready time
7. Time windows
8. sub-tour
9. Nearest neighbor
10. Tabu search
11. Tabu list
12. Intensification
13. Diversification
14. Aspiration criteria
15. Shortest processing time

۵. مراجع

[1] Chang, Y. C., & Lee, C. Y. Machine scheduling with job delivery coordination. European Journal of Operational Research, (2004), Vol. 158, No. 2, pp. 470-487.

[2] Selvarajah, E., & Steiner, G. Batch scheduling in a two-level supply chain— a focus on the supplier. European Journal of Operational Research, (2006), Vol. 173, No. 1, pp. 226-240.

[3] Wang, X., & Cheng, T. C. E. Heuristics for parallel-machine scheduling with job class setups and delivery to multiple customers. International Journal of Production Economics, (2009), Vol. 119, No. 1, pp. 199-206.

[4] Lee, C.-Y., Chen, Z.-L. Machine scheduling with transportation considerations. Journal of Scheduling, (2001), Vol. 4, pp. 3–24.

[5] Soukhal, A., Oulamara, A., & Martineau, P. Complexity of flow shop scheduling problems with transportation constraints. European Journal of Operational Research, (2005), Vol. 161, No. 1, pp. 32-41.

[6] Wang, X., & Cheng, T. C. E. Logistics scheduling to minimize inventory and transport costs. International Journal of Production Economics, (2009), 121(1), 266-273.

[7] Wang, X., & Cheng, T. E. Production scheduling with supply and delivery considerations to minimize the makespan. European journal of operational research, (2009), Vol. 194, No. 3, pp. 743-752.

[8] Li, C. L., Vairaktarakis, G., & Lee, C. Y. Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations. European Journal of Operational Research, (2005). Vo. 164, No. 1, pp. 39-51.

[9] Levin, A., & Penn, M. Approximation algorithm for minimizing total latency in machine scheduling with deliveries. Discrete Optimization, (2008), Vol. 5, No. 1, pp. 97-107.

[10] Ullrich, C. A.Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows. European Journal of Operational Research, (2012).

[11] Li, C. L., & Vairaktarakis, G.. Coordinating production and distribution of jobs with bundling operations. IIE Transactions, (2007), Vol. 39, No. 2, pp. 203-215.

[12] Li, C. L., & Ou, J, Coordinated scheduling of customer orders with decentralized machine locations. IIE Transactions, (2007), Vol. 39, No. 9, pp. 899-909.

[13] Chen, Z. L., & Vairaktarakis, G. L. Integrated scheduling of production and distribution operations. Management Science, (2005), Vol. 51, No. 4, pp. 614-628.

[14] Glover, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers & Operations Research, (1986), Vol. 13, No. 5, pp. 533-549.

[15] Glover, F., & Kochenberger, G. A. HANDBOOK OF METAHEURISTICS. Kluwer Academic Publishers New York. Boston, Dordrecht, London, Moscow (Print ISBN: 1-4020-7263-5, ebook ISBN: 0-306-48056-5), (2003).

[16] Pinedo, M. Scheduling: theory, algorithms, and systems. Springer, (2012).