فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۹۳، زمستان ۱۳۹۸، ۹۴-۷۱

استفاده از یک روش ابتکاری برای مسأله بسته‌بندی اقلام ناهمگون سه‌بعدی درانتخاب ناوگان لجستیکی یک شرکت پخش قطعات یدکی در ایران

علی شجاع سنگچولی* سید مهدی سجادی‌فر**

دریافت: ۹۷/۳/۱۴ پذیرش: ۹۷/۶/۱۴

بسته‌بندی اقلام ناهمگون سه بعدی / بارگیری کانتینر / لجستیک / ترکیب ناوگان

چکیده

مسأله بسته‌بندی اقلام(جعبه‌ها) ناهمگون (با اندازه‌های مختلف) در داخل یک مجموعه از صندوق‌های ناهمگون(کانتینرها) یکی از مهمترین مسائل در حوزه مدیریت زنجیره‌تأمین و لجستیک می‌باشد. با افزایش ابعاد مسأله زمان حل این مسأله بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بنابرین مدل‌سازی و حل کارای این مسأله، تاثیر زیادی بر زمان و هزینه‌های حمل و نقل دارد. در این مقاله، مسأله با توجه به نیاز یک شرکت پخش و توزیع قطعات یدکی در ایران و محدودیت‌های موردنظر، مدل‌سازی و در نرم‌افزار گمز حل شد. سپس مدل پیشنهادی با یک روش ابتکاری حل گردید. نتایج حاکی از بهبود قابل توجه زمان حل بود. در نهایت با استفاده از داده‌های موجود و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، بهترین ترکیب ناوگان حمل و نقل انتخاب شد.

طبقه‌بندی JEL: D24, L90

* دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف

Shoja.email@gmail.com

** استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فرهنگ؛

sajadifar@usc.ac.irr

■ علی شجاع سنگچولی، نویسنده مسئول.

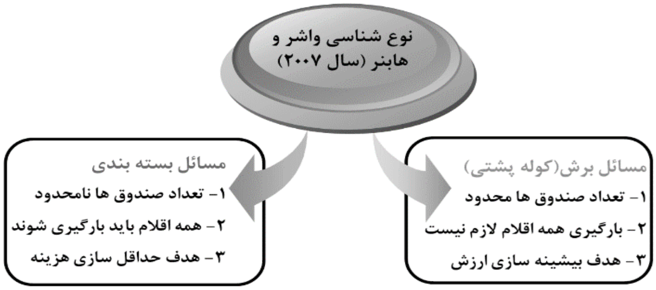
مقدمه

مسائل بسته‌بندی و برش جزو مسائلی هستند که در ادبیات بسیار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این مسائل کاربرد گسترده‌ای در صنعت و دنیای واقعی دارند، کاربردها از مسائل تولید و توزیع در لجستیک زنجیره‌تأمین(بسته‌بندی سفارشات در انبار) شروع و تا کاربردهای مختلف دیگر در زمینه‌هایی مانند علوم کامپیوتر و مدیریت مالی (تخصیص حافظه به پروسس‌ها، مسائل بودجه‌بندی سرمایه و ..) گستردگی دارند. توجه به راه‌حل‌های مناسب در زمینه مسأله بسته‌بندی اقلام، می‌تواند هزینه‌های حمل و نقل را کاهش داده و ازین طریق تولید کشور را رقابتی سازد. به عنوان مثال یک بسته‌بندی خوب، می‌تواند تعداد بیشتری کالا در یک پالت جا دهد و همینطور تعداد بیشتری پالت در یک کانتینر بچیند، و بنابرین تعداد کانتینرهای لازم برای ارسال یک سری کالا را کمینه کند. علاوه بر این، کاربردهای بسیار زیادی در دنیای واقعی برای این مسأله وجود دارد، مثال‌هایی از کاربردهای مسأله یک بعدی عبارتند از: تخصیص افراد به ایستگاه‌های کاری بطوریکه تعداد ایستگاه‌ها حداقل بشود، برش میله‌ها با کمترین پرت. کاربردهای مسأله دوبعدی شامل برش چوب، پارچه، صفحه‌بندی روزنامه و جایابی اجزای الکترونیکی و.. و کاربردهای سه بعدی مانند بسته‌بندی محصولات در پالت‌ها، بارگذاری کامیون‌های دارای محدودیت وزن و حجم، تهیه پشتیبان از فایل‌ها، طراحی تراشه‌ها و ....[1]

اکثر این مسائل بشدت سخت[2] هستند و با هر تغییر کوچکی در تابع هدف و یا محدودیت‌های برش- بسته‌بندی منجر به تعریف مسائلی با ساختار جدید می‌شود. اینچنین ادبیات وسیعی نیاز به نوع‌شناسی دقیق و مناسب دارد. دو نوع‌شناسی مشهور در ادبیات وجود دارد. اولین مقاله نوع‌شناسی در زمینه مسائل برش و بسته‌بندی توسط دایخوف در سال ۱۹۹۰ ارائه شده است.[3] واشر و هابنر در سال ۲۰۰۷ به بعضی از نقاط ضعف این نوع‌شناسی اشاره و اصلاحیات خود را در این زمینه ارائه دادند.[4] در نوع‌شناسی ارائه‌شده توسط آن‌ها، تمامی مسائل برش و بسته‌بندی به دو دسته‌ی کلی مسائل حداکثرسازی ارزش خروجی (مسائل

1. Bischoff and Wäscher, (1995).
2.Strongly NP-Hard
3. Dyckhoff, (1990).
4. Wäscher et al., (2007).

برش و کوله‌پشتی) و مسائل حداقل‌سازی ورودی (مسائل بسته‌بندی اقلام) تقسیم‌شده‌اند. ویژگی‌های هرکدام از این دسته‌ها در نمودار (۱) نشان داده‌شده است. تا سال ۲۰۰۰ میلادی بیشتر مطالعات در زمینه بسته‌بندی اقلام، بر روی مسائل یک بعدی، و نهایتاً دو بعدی متمرکز شده است. بیشتر روش‌هایی که برای مسائل یک بعدی و دو بعدی توسعه داده شده است، به راحتی نمی‌تواند به فضای سه‌بعدی گسترش داده شود، در بهترین حالت، ممکن است جوابی غیر کارا (جوابی که در آن بیشتر فضاهای صندوق خالی باقی بماند) برای مسأله به‌دست آید. بنابرین بایستی روش‌هایی که مخصوص مسائل سه بعدی طراحی شده است، درنظر گرفته شود.[1]



نمودار۱- ویژگی‌های کلی مسائل برش و بسته‌بندی

مسأله مورد نظردر این مقاله، طبق نوع‌شناسی واشر[2] «بسته‌بندی اقلام به شدت غیرهمگون[3] در کانتینرهای کمی غیرهمگون[4]» و به‌صورت مخفف 3D-MBSBPP است. براساس مقاله واشر تا سال ۲۰۰۴ هیچ مقاله‌ای در این زمینه انتشار پیدا نکرده است. فقط از ۴۱۳ منبع بررسی شده در این مقاله، چهار مقاله درباره MBSBPP می‌باشد که سه عدد از آنها مسأله را به‌صورت یک بعدی و دیگری دو بعدی درنظر گرفته‌اند. در بررسی جدیدتر توسط برتفلت و

1. Crainic et al., (2009).
2. Wäscher et al., (2007).
3. Strongly Heterogeneous
4. Weakly Heterogeneous

واشر[1] مشاهده می‌شود که تنها ۱۲ مقاله در این زمینه چاپ شده است. که این مقالات مواردی که سه بعدی می‌باشند و همچنین مقالات بعد از سال ۲۰۱۲ در ادامه مرور خواهد شد. ارتک و کیلیک اولین مقاله‌ای که مستقیما به حل و آنالیز مسأله 3D-MBSBPP می‌پردازد را در سال ۲۰۰۶ ارائه دادند.[2] آنها به این موضوع اشاره کردند که یکی از دلایل افزایش تحقیقات در مسائل بسته‌بندی اقلام، پیشرفت‌ها در زیرساخت‌های تکنولوژی اطلاعات و برچسب‌های تشخیص با امواج رادیویی[3] است. چون با استفاده از این آیتم‌ها، محققان داده‌های لازم برای کاهش هزینه‌های بسته‌بندی اقلام را دارند. این مقاله حاصل تحقیقات نویسندگان در بخش توزیع یک شرکت قطعات یدکی اتوموبیل در کشور ترکیه بوده است. نویسندگان سه روش ارائه داده‌اند که اولی یک الگوریتم ابتکاری حریصانه [4]، دومی یک روش جستجوی شعاعی[5] و آخرین روش یک روش جستجوی درختی بود. هوانگ و همکاران روش تولید ستون را با تابع هدف حداقل‌سازی هزینه‌های بارگیری برای یک کانتینر ارائه دادند.[6و7]. ابتدا مسأله به مسأله گسترش یافته پوشش مجموعه[8] تبدیل و با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدل می‌شود. سپس مدل با استفاده از یک روش ابتکاری تولید ستون[9] حل می‌شود. آلوارز-والدز و همکاران الگوریتمی با استفاده از جستجوی تصادفی حریصانه[10] برای حل مسأله MBSBPP دو بعدی و سه بعدی پیشنهاد دادند.[11] همچنین همین نویسندگان یک حد پایین برای جواب این مسائل ارائه کردند.[12] لی و ژانگ[13] نیز، ۱۲ مسأله از دنیای واقعی (یک کارخانه داروسازی) را با الگوریتم ژنتیک حل کرده‌اند. در این مقاله تابع هدف کمینه‌سازی فضای خالی موجود در کانتینرها است. همچنین محدودیت وزن نیز در نظر گرفته نشده است.

1. Bortfeldt and Wäscher, (2012).
2. Ertek and Kilic, (2006).
3. RFID
4. Greedy Heuristic
5. Beam Search
6. Che et al., (2011).
7. Zhu et al., (2012).
8. Extended Set Cover Problem
9. Column Generation
10. Grasp
11. Alvarez-Valdes et al., (2012).
12. Alvarez-Valdes et al, (2015).
13. (Li and Zhang, 2015)

در مطالعه‌ای دیگر، پکی و همکاران[1] با پیاده‌سازی یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و با هدف حداقل‌سازی فضای استفاده‌نشده، به ارزیابی و بهینه‌سازی 3D-MBSBPP درخصوص بسته‌بندی و بارگیری کانتینرها جهت حمل‌ونقل هوایی پرداختند. در مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها، محدودیت‌های کاربردی در حمل و نقل هوایی نظیر ثبات اقلام، شکننده بودن اقلام نیز مدنظر قرار داده‌شده است. وو و همکاران[2] نیز یک مسأله‌ی بسته‌بندی اقلام سه‌بعدی ناهنجار (غیر مکعب مستطیل) را در نظر گرفته و یک الگوریتم ابتکاری سه مرحله‌ای برای حلش ارائه دادند. بازویی و همکاران[3]، کاربرد خاصی از مسأله 3D-MBSB-PP را در یک شرکت صنعتی توضیح دادند که در آن بایستی فضای داخل کانتینر با برش‌های گیوتینی به اقلام اختصاص داده شود. آنها برای این مسأله یک حد بالا بر مبنای یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه کردند. لی و همکاران[4] با استفاده از اینترنت اشیاء و ابزارهای تکنولوژی اطلاعات، سناریویی برای بسته‌بندی در یک فروشگاه آنلاین ارائه کردند که حتی فرآیند پر کردن کانتینرها نیز توسط ربات‌ها اتوماتیک شده است.

برای حل یک مسأله مسیریابی وسیله نقلیه که ظرفیت سه بعدی کانتینر را در نظر می‌گیرد، لازم است که قادر باشیم هر دو مسأله بارگیری و مسیریابی را همزمان حل کنیم. مسأله ترکیبی این دو به‌عنوان مسأله بارگیری سه بعدی مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت‌دار[5] (یا اختصارا 3L-CVRP) نامیده می‌شود.[6] و [7].

هنگامی که شرکتی تصمیم می‌گیرد چه نوع وسایل نقلیه یا کامیون‌هایی تهیه کند تا هزینه‌های سالانه‌اش بهینه شود، مسأله تعیین ترکیب ناوگان[8] لجستیکی اتفاق می‌افتد. این مسأله یک تصمیم استراتژیک و بلندمدت است و عوامل زیادی در تعیین آن نقش دارد. با توجه به این عوامل مقالات زیادی در این زمینه توسعه‌یافته‌اند.[9] مقالات موجود بیشتر

1. Paquay et al, (2017).
2. Wu et al., (2017).
3. Baazaoui et al., (2017).
4. Li et al., (2017).
5. Three-Dimensional Loading Capacitated Vehicle Routing Problem
6. Iori, 2016, Yi and Bortfeldt, (2018).

۷. صباغ et al., (۲۰۱۵).

8. Fleet Composition
9. Fagerholt, 1999, Hoff et al., 2010, Jabali et al., 2012, Soonpracha et al., 2015, Koç et al., 2016, Nourinejad and Roorda, 2017, Rogge et al., 2018.

محدودیت‌های تحویل کالا به مشتری در مسأله مسیریابی را مدنظر قرار داده‌اند و مقالات کمی به ارائه روشی برای بسته‌بندی اقلام در مسأله ترکیب بهینه ناوگان پرداخته‌اند.[1]

در شرکت مورد نظر، محدودیت وزن که تا کنون در ادبیات دسته مسائل MSSBPP سه بعدی، توسط نویسندگان مشاهده نشده است، مورد نیاز است. همچنین محدودیت تعداد کانتینرهای موجود، یکی دیگر از محدودیت‌های این شرکت است که در ادبیات به آن اشاره نشده است. در ادامه این مقاله مدل ریاضی مسأله ارائه خواهد شد و سپس در بخش بعد، یک الگوریتم ابتکاری جهت حل این مسأله ارائه می‌شود، که با یک الگوریتم جستجوی حریصانه بهبود می‌یابد. برای بررسی کیفیت روش ارائه شده، الگوریتم با جواب‌های دقیق نرم‌افزار گمز مقایسه خواهد شد. پس از ارائه این الگوریتم، برای کمک به مدیریت در تعیین ترکیب بهینه ناوگان یک شبیه‌سازی به‌مدت یکسال انجام خواهد شد و برای سناریوهای درنظر گرفته شده هزینه‌های حمل و نقل برآورد خواهد شد. و در نهایت سناریوی بهینه برای ترکیب ناوگان لجستیکی شرکت پیشنهاد خواهد شد. در انتهای مقاله یک جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و ارائه مسیر برای مطالعات آتی خواهیم داشت.

۱. تعریف مسأله و مدل‌سازی ریاضی

در این بخش مسأله مورد نظر کامل بیان شده و سپس مدل ریاضی برای حل آن پیشنهاد خواهد شد.

۱-۱. تعریف مسأله

مطالعه‌ی حاضر، بر اساس نیاز یک شرکت بزرگ پخش و توزیع قطعات یدکی خودرو در ایران، توسعه داده شده است. انبار مرکزی این شرکت در شهر تهران که سفارشات را به‌صورت آنلاین از نمایندگی‌های خود در سراسر کشور دریافت می‌کند، باید به‌سرعت و در کمترین زمان ممکن به این نیازها پاسخ دهد. جهت بسته‌بندی سفارشات، کارکنان باتجربه، اندازه، تعداد و نوع صندوق‌های لازم برای هر سفارش را حدس می‌زنند. اما در بسیاری از موارد، بخش زیادی از صندوق‌ها خالی می‌ماند. خالی ماندن صندوق‌ها و همچنین دوباره‌کاری ناشی از

1. Bodin et al., 2000, Hoff et al., (2010).

حدس نادرست کارکنان، باعث به وجود آمدن هزینه‌های قابل‌توجهی می‌شود که شرکت سعی در کمینه کردن آن‌ها دارد. مسأله بسته‌بندی در این شرکت را می‌توان به دو مسأله مجزا که در نمودار (۲) نشان داده شده است، تقسیم کرد، که در این مقاله ما مسأله دوم را در نظر می‌گیریم.

نمودار ۲- مسأله بسته‌بندی در شرکت مورد مطالعه

۱-۲. نمادهای مدل

در ادامه، نمادهای مدل ریاضی طراحی‌شده شامل مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول ۱- نمادهای مدل ریاضی مسأله

مجموعه‌ها	
$i \in I, j \in J$	مجموعه‌های جعبه‌های مورداستفاده
$k \in K$	مجموعه‌ی کانتینرهای مورداستفاده

پارامترها	
pl_i	طول اولیه جعبه i
pw_i	عرض اولیه جعبه i
ph_i	ارتفاع اولیه جعبه i
wt_i	وزن جعبه i
L_k	طول کانتینر k
W_k	عرض کانتینر k
H_k	ارتفاع کانتینر k
C_k	هزینه‌ی کانتینر k
WT_k	حداکثر وزن قابل‌تحمل کانتینر k

متغیرهای تصمیم	
G_k	اگر از کانتینر k استفاده شود ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد بود.
f_{ik}	اگر جعبه i در کانتینر k قرار گیرد ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد بود.
x_i, y_i, z_i	متغیرهای نامنفی مربوط به موقعیت هندسی جعبه i (مختصات گوشه سمت چپ- پایین پشت) در کانتینری که در آن قرار گرفته است.
l_i, w_i, h_i	متغیرهای مربوط به ابعاد جعبه i که با توجه به موقعیت چرخش فعلی آن تعیین می‌شود و در حالت بدون چرخش، برابر با ابعاد اولیه هستند.
s_{ij}	بیانگر موقعیت هندسی دو جعبه نسبت به یکدیگر است و اگر جعبه i سمت چپ جعبه j قرار داشته باشد (یعنی $x_i + l_i \le x_j$) ۱ و در غیر این صورت صفر است.
b_{ij}	بیانگر موقعیت هندسی دو جعبه نسبت به یکدیگر است و اگر جعبه i پشت جعبه j قرار داشته باشد (یعنی $yi+wi \le yj$) ۱ و در غیر این صورت صفر است.
p_{ij}	بیانگر موقعیت هندسی دو جعبه نسبت به یکدیگر است و اگر جعبه i زیر جعبه j قرار داشته باشد (یعنی $zi+hi \le zj$) ۱ و در غیر این صورت صفر است.

۱-۳. مدل ریاضی

با توجه به تعاریف ارائه‌شده از مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم، مدل ریاضی مسأله به‌صورت زیر خواهد بود که تابع هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌های کانتینرهای مصرفی است.

$$z = min \sum_{k=1}^{m} C_k G_k \quad (1)$$

$s.t.$

$$\sum_{k=1}^{m} f_{ik} = 1 \qquad ; \forall\, i \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$f_{ik} \le G_k \qquad ; \forall\, i \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall\, k \in \{1, \dots, m\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n} wt_{ik} \le WT_k \qquad ; \forall\, k \in \{1, \dots, m\} \quad (4)$$

$$p_{ij} + p_{ji} + b_{ij} + b_{ji} + s_{ij} + s_{ji} + (1 - f_{ik}) + \left(1 - f_{jk}\right) \ge 1 \qquad ; \forall\, i, j \in \{1, \dots, n\}, \forall\, k \in \{1, \dots, m\}; i < j \quad (5)$$

$$M\left(1 - s_{ij}\right) \ge x_i - x_j + l_i \qquad ; \forall\, i, j \in \{1, \dots, n\} \quad (6)$$

$$M\left(1 - b_{ij}\right) \ge y_i - y_j + w_i \qquad ; \forall\, i, j \in \{1, \dots, n\} \quad (7)$$

$$M\left(1 - p_{ij}\right) \ge z_i - z_j + h_i \qquad ; \forall\, i, j \in \{1, \dots, n\} \quad (8)$$

$$x_i \le L_k - l_i + M(1 - f_{ik}) \qquad ; \forall\, i \in \{1, \dots, n\}, \forall\, k \in \{1, \dots, m\} \quad (9)$$

$$y_i \le W_k - w_i + M(1 - f_{ik}) \qquad ; \forall\, i \in \{1, \dots, n\}, \forall\, k \in \{1, \dots, m\} \quad (10)$$

$$z_i \le H_k - h_i + M(1 - f_{ik}) \qquad ; \forall\, i \in \{1, \dots, n\}, \forall\, k \in \{1, \dots, m\} \quad (11)$$

$$x_i, y_i, z_i, l_i, w_i, h_i, \ge 0 \quad (12)$$

$$G_k, f_{ik}, s_{ij}, b_{ij}, p_{ij} \in \{0,1\} \quad (13)$$

در روابط ریاضی (۱) الی (۱۱)، محدودیت (۲) بیانگر این است که هر جعبه باید در یک کانتینر جایگذاری شود. محدودیت (۳) نشان می‌دهد که اگر حداقل یک جعبه (مانند i) در یک کانتینر (مانند k) قرار بگیرد، یعنی از آن کانتینر استفاده شده است و باید پر شود. محدودیت (۴) نیز بیان می‌کند که مجموع وزن جعبه‌های جایگذاری شده در یک کانتینر نباید از حداکثر وزن قابل‌تحمل آن کانتینر بیشتر باشد. همچنین محدودیت (۵) نشان‌دهنده‌ی عدم هم‌پوشانی جعبه‌ها است. در توضیح این محدودیت می‌توان گفت که اگر جعبه‌های i و j در کانتینر k قرار داشته باشند، آنگاه برای این‌که تداخلی صورت نگیرد بایستی این جعبه‌ها یا روی یکدیگر و یا در کنار هم باشند، یعنی یکی از حالاتِ $s_{ij}=1$ یا $s_{ji}=1$ یا $b_{ij}=1$ یا $b_{ji}=1$ یا $p_{ij}=1$ و یا $p_{ji}=1$ برقرار باشد و درواقع، تنها درصورتی‌که تمامی متغیرهای مذکور صفر باشند هم‌پوشانی (تداخل) اتفاق می‌افتد. لذا جهت جلوگیری از همپوشانی، محدودیت (۵) تعریف می‌شود. محدودیت‌های (۶)، (۷) و (۸) در رابطه با موقعیت‌های هندسی مختلف دو جعبه نسبت به یکدیگر و به ترتیب جهت مقداردهی به متغیرهای مربوط به سمت چپ، پشت و یا پایین قرار داشتن یک جعبه نسبت به دیگری تعریف شده‌اند. محدودیت‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) نیز بیانگر این هستند که هر جعبه باید در داخل محدوده‌ی فیزیکی کانتینر قرار بگیرد و

درنهایت محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳)، به ترتیب متغیرهای نامنفی و صفر و یک مدل را نشان می‌دهند.

در این مطالعه، قابلیت چرخش جعبه‌ها جهت قرارگیری در کانتینرها نیز به‌عنوان یک فاکتور قابل‌توجه و بسیار کاربردی، در مدل‌سازی اعمال شده است. یک مکعب، شش حالت چرخش می‌تواند داشته باشد. برای مدل‌سازی چرخش، ابتدا ماتریس Q را به‌عنوان ماتریس چرخش در معادله‌ی (۱۴) تعریف می‌کنیم:

$$\begin{pmatrix} l_i \\ w_i \\ h_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} pl_i \\ pw_i \\ ph_i \end{pmatrix} \quad (۱۴)$$

که به‌وسیله‌ی ضرب ماتریسی به معادله‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) تبدیل می‌شود. این معادله‌ها درواقع ابعاد جدید جعبه یا ابعاد ثانویه را پس از چرخش جعبه محاسبه می‌کنند. شش حالت چرخش و ماتریس مربوطه در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- شش حالت مختلف چرخش و ماتریس مربوطه

نام وضعیت	ماتریس	نام وضعیت	ماتریس
وضعیت ۰	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	وضعیت ۳	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
وضعیت ۱	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	وضعیت ۴	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
وضعیت ۲	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	وضعیت ۵	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

$$l_i = Q_{11}^i * pl_i + Q_{12}^i * pw_i + Q_{13}^i * ph_i \quad ; \forall\, i \in \{1, \dots, n\} \tag{۱۵}$$

$$w_i = Q_{21}^i * pl_i + Q_{22}^i * pw_i + Q_{23}^i * ph_i \quad ; \forall\, i \in \{1, \dots, n\} \tag{۱۶}$$

$$h_i = Q_{31}^i * pl_i + Q_{32}^i * pw_i + Q_{33}^i * ph_i \quad ; \forall\, i \in \{1, \dots, n\} \tag{۱۷}$$

ماتریس چرخش (Q) باید در هر سطر و در هر ستون فقط یک آرایه با مقدار یک داشته باشد، به این معنا که هر جعبه پس از چرخش باید دقیقاً یک طول، یک عرض و یک ارتفاع داشته باشد. بنابراین درایه‌های ماتریس باید این محدودیت‌ها را رعایت کنند. معادله‌های (۱۸) و (۱۹) بیانگر این محدودیت‌ها هستند.

$$Q_{d1}^i + Q_{d2}^i + Q_{d3}^i = 1 \quad ; \forall\, d \in \{1,2,3\} \tag{۱۸}$$

$$Q_{1d}^i + Q_{2d}^i + Q_{3d}^i = 1 \quad ; \forall\, d \in \{1,2,3\} \tag{۱۹}$$

با جمع اندیس‌های مربوط به تمامی متغیرها، تعداد متغیرهای مدل مسأله به ازای تعداد جعبه‌ها و کانتینرهای متفاوت از رابطه (۲۰) به دست می‌آید. همچنین با جمع تمامی اندیس‌های مربوط به کلیه محدودیت‌ها، تعداد محدودیت‌های مدل مسأله به ازای تعداد جعبه‌ها و کانتینرهای متفاوت از رابطه (۲۱) به دست می‌آید.

$$3n^2 + mn + 12n + m + 1 \tag{۲۰}$$

$$3n^2 + mn^2 + 3mn + 7n + 1 \tag{۲۱}$$

در مدل ریاضی ارائه‌شده، فرض شده است که m کانتینر و از هرکدام هم فقط یک نوع موجود است. فرض کنید m' برابر با نوع‌های متمایز کانتینرها باشد. درصورتی‌که محدودیتی برای تعداد کانتینرهای استفاده شده از هر نوع وجود نداشته باشد، از هر نوع کانتینر حداکثر n عدد مورد نیاز خواهد بود. بنابراین تعداد کل کانتینرهای موردنیاز از رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$m = nm' \tag{۲۲}$$

به‌عنوان نمونه، در جدول (۳)، تعداد نوع کانتینرها به‌صورت ثابت برابر با هشت در نظر گرفته شده و تعداد متغیرها و محدودیت‌های مسأله به ازای تعداد جعبه‌ها و کانتینرهای متفاوت به

دست آورده شده است. تعداد متغیرها و محدودیت‌ها، بالا بودن ابعاد مسأله را حتی برای سایزهای کوچک نشان می‌دهد.

جدول ۳- تعداد متغیرها و محدودیت‌های مسأله در ابعاد مختلف

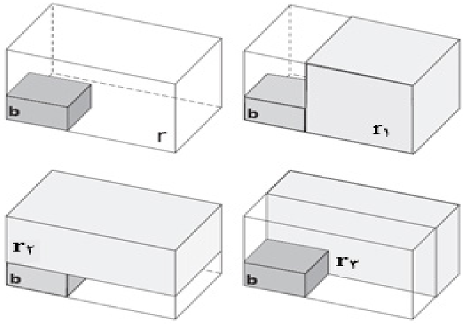
m'	۸	۸	۸
n	۸	۲۴	۴۰
m	۶۴	۱۹۲	۳۲۰
تعداد متغیرها	۸۶۵	۶۸۱۷	۱۸۴۰۱
تعداد محدودیت‌ها	۵۸۸۱	۱۲۶۳۱۳	۵۵۵۴۸۱

۲. روش ابتکاری

۲-۱ .شرح الگوریتم ابتکاری

الگوریتم‌های ابتکاری راه‌حلی قابل‌قبول در مدت‌زمان معقول ارائه می‌دهند، از این‌رو برای حل مسائل سخت از کارایی بالایی برخوردار هستند. در رابطه با مسأله‌ی بسته‌بندی اقلام ناهمگون سه‌بعدی، در شرایطی که تعداد جعبه‌ها و کانتینرها زیاد و سرعت در رسیدن به جواب فاکتور بسیار مهمی باشد، روش‌های ابتکاری بسیار کاربردی هستند.

در این روش برای جایگذاری جعبه در کانتینر از مفهوم فضای خالی بیشینه استفاده می‌کنیم. فضاهای خالی بیشینه، بزرگ‌ترین فضاهای خالی‌ای هستند که پس از قرار گرفتن هر جعبه در داخل کانتینر به وجود می‌آیند. در صورتی که در فضای سه بعدی یک جعبه در گوشه یک فضای سه بعدی مستطیل شکل قرار داده شود حداکثر سه فضای خالی بیشینه ایجاد خواهد شد (نمودار ۳). رویه جایگذاری رویه‌ای است که طی آن یک فضای خالی بیشینه و یک جعبه انتخاب و سپس جعبه مذکور در فضای خالی بیشینه انتخاب شده جایگذاری می‌شود. پس از جایگذاری جعبه، فضای خالی بیشینه مذکور بطور کامل یا جزئی استفاده شده و می‌بایست نسبت به بروز رسانی فضاهای خالی بیشینه اقدام گردد.



نمودار ۳- فضاهای خالی بیشینه r_1، r_2 و r_3

الگوریتم ابتکاری ارائه شده برای حل مسأله شامل گام‌های زیر است:

- **گام اول:** در ابتدا انواع کانتینرهای موجود را بر اساس نسبت هزینه به حجم (هزینه هر واحد حجم) مرتب می‌کنیم. در این لیست، کانتینری که کمترین هزینه در واحد حجم را دارد در ابتدای لیست قرار می‌گیرد. درصورتی‌که این عدد (هزینه در واحد حجم) برای دو کانتینر غیر یکسان برابر باشد، کانتینری که بزرگ‌ترین بُعد را دارد، جلوتر قرار می‌گیرد. درصورتی‌که بزرگ‌ترین بعد دو کانتینر نیز برابر باشد، بُعد بعدی کانتینرها را در نظر می‌گیریم و بازهم در صورت برابری، بُعد سوم را مدنظر قرار می‌دهیم.
- **گام دوم:** در این مرحله، جعبه‌ها را بر اساس حجم آن‌ها (از بیشترین حجم به کمترین حجم) مرتب می‌کنیم و جعبه‌ای که بیشترین حجم را دارد در ابتدای لیست قرار می‌دهیم. درصورتی‌که حجم دو جعبه غیر یکسان باهم برابر باشد، مانند کانتینرها، جهت اولویت‌بندی جعبه‌ها ابعاد آن‌ها را مدنظر قرار می‌دهیم و درنهایت این لیست تکمیل می‌گردد.
- **گام سوم:** اولین جعبه جایگذاری نشده از لیست جعبه‌ها انتخاب می‌شود. در صورتی که جعبه‌ای وجود ندارد، حل مسأله به پایان رسیده است.
- **گام چهارم:** چنانچه فضاهای خالی بیشینه‌ای موجود نباشد به گام هفتم می‌رویم در غیر این‌صورت فضاهای خالی بیشینه موجود را مرتب می‌کنیم. میان فضاهای خالی، فضایی را که حجم آن کمتر از سایرین است در ابتدای لیست قرار می‌دهیم. در صورت یکسان بودن حجم فضاها، مانند کانتینرها، ابعاد آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. درصورتی‌که ابعاد

نیز یکسان باشد، فضایی که در مرحله قدیمی‌تر تولید شده در اولویت است. درصورتی‌که فضاها نیز در یک مرحله تولید شده باشند، فضایی که نقطه گوشه سمت چپ پایین آن به گوشه سمت چپ پایین کانتینر نزدیک‌تر است، در اولویت بالاتر قرار خواهد گرفت.

- **گام پنجم:** سعی می‌شود که جعبه انتخابی در داخل اولین فضای خالی بیشینه از لیست فضاهای ایجادشده در گام سوم قرار گیرد. همچنین بررسی می‌شود که مجموع وزن جعبه‌های قرار گرفته در درون کانتینر از حداکثر وزن قابل‌تحمل کانتینر بیشتر نباشد. درصورتی‌که محدودیت وزن رعایت می‌شود ولی جایگذاری جعبه به عات محدودیت‌های هندسی امکان‌پذیر نیست، سعی می‌شود جعبه مذکور با چرخش در داخل این فضا قرار گیرد و درصورتی‌که با هیچ حالتی از چرخش در فضای موردنظر قابل جایگذاری نباشد، فضای بعدی امتحان می‌شود. اگر یک فضای خالی بیشینه پیدا شود که جعبه در آن قابلیت جایگذاری داشته باشد، به مرحله بعد می‌رویم و درصورتی‌که فضایی موجود نباشد یا جعبه در هیچ‌کدام از فضاها قرار نگیرد، به گام هفتم می‌رویم.
- **گام ششم:** جعبه انتخابی در گوشه سمت چپ و پایین و پشت فضای خالی انتخاب‌شده قرار می‌گیرد و فضای خالی انتخابی از لیست فضاها حذف می‌شود. با انجام این کار و جایگذاری این جعبه، حداکثر سه فضای خالی بیشینه جدید تولید می‌شود و در لیست فضاها قرار می‌گیرد. به گام سوم می‌رویم.
- **گام هفتم:** در این مرحله برای ورود یک کانتینر جدید به مسأله تصمیم می‌گیریم. از آنجا که ممکن است تعداد جعبه‌های باقیمانده از حجم کانتینر خیلی کمتر باشد، احتمال این وجود دارد که ما یک کانتینر بزرگ برای حجم کمی از جعبه‌ها وارد مسأله کنیم و هزینه زیاد شود. برای همین جستجو می‌کنیم که آیا کانتینری با کمترین هزینه وجود دارد که حجمش بیش از مجموع حجم جعبه‌های باقیمانده باشد (احتمال جایگذاری همه جعبه‌ها در آن وجود داشته باشد) یا نه. در صورت وجود، این کانتینر به مسأله اضافه شده و به مرحله بعد می‌رویم در غیر این صورت یک کانتینر جدید که ابعادش بزرگ‌تر از ابعاد جعبه باشد از ابتدای لیست درخواست می‌شود. اگر تعداد استفاده شده از این نوع کانتینر در جواب، کمتر از تعداد در دسترسِ آن باشد، به مرحله بعد می‌رویم، در غیر این‌صورت کانتینر بعدی در لیست را بررسی می‌کنیم. چنانچه کانتینر دیگری وجود نداشته باشد، این روش حل‌شدنی برای مسأله به دست نیاورده است.

- **گام هشتم:** یک فضای خالی با ابعادی برابر با ابعاد کانتینر جدید و مختصات (۰,۰,۰) افزوده و در لیست فضاها قرار می‌دهیم. به مرحله چهارم می‌رویم.

۲-۲. بهبود جواب ها با یک الگوریتم حریصانه

هر الگوریتم جستجوی حریصانه دو فاز دارد. در فاز اولیه یک جواب تصادفی به‌دست آمده و سپس در گام دوم این جواب وارد فاز جستجوی محلی شده تا جواب بهینه محلی به‌دست آید. در صورتی که جواب به‌دست آمده از فاز جستجوی محلی، از بهترین جواب فعلی بهتر باشد، این جواب جایگزین بهترین جواب فعلی می‌شود. این مراحل تا برآورده شدن معیار توقف الگوریتم، ادامه می‌یابد.

برای فاز سازنده، ما الگوریتم ابتکاری ارائه شده را، تصادفی کرده‌ایم. موارد زیر تصادفی شده‌اند:

- ترتیب جعبه‌ها
- ترتیب کانتینر ها
- وضعیت اولیه چرخش جعبه

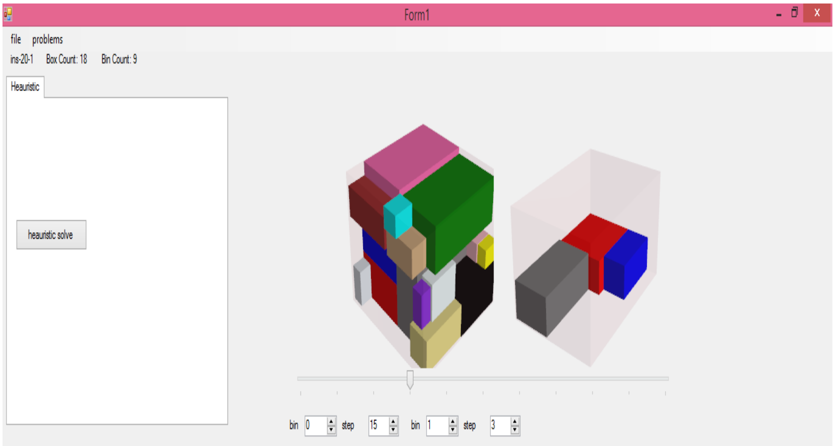
برای فاز بهبوددهنده، موارد زیر درنظر گرفته شده است:

برای همه کانتینرها سعی می‌شود که یک کانتینر تصادفی انتخاب و در صورت امکان با یک نوع کانتینر دیگر عوض می‌شود. بدیهی است این کانتینر بایستی هزینه کانتینر جدید از کانتینر فعلی کمتر باشد.

کانتینری که کمترین حجم اشغال شده را دارد انتخاب و سعی می‌کنیم از طریق انتقال جعبه هایش به درون کانتینرهای دیگر، فضای اشغال شده صفر و کانتینر حذف شود.

این دو مورد باعث می‌شود تا فضای محلی جواب بسمت بهینه‌ای محلی حرکت کند. در ادامه این مقاله ما به الگوریتم ارائه شده در بخش قبل الگوریتم ابتکاری و به این الگوریتم، الگوریتم ابتکاری حریصانه می‌گوییم.

نمودار(۴) محیط نرم‌افزار طراحی شده و نمونه جواب به دست آمده به‌وسیله آن را نشان می دهد.

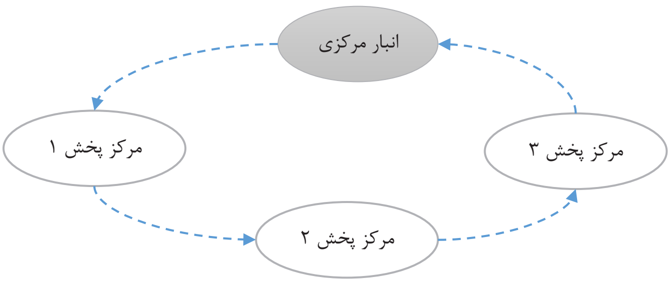


نمودار ۴- محیط نرم‌افزار طراحی‌شده جهت اجرای الگوریتم ابتکاری و جواب به دست آمده

۳. بیان مسأله مطالعه موردی

نمونه مورد مطالعه این مقاله، انبار مرکزی یک شرکت قطعات یدکی است که روزانه حجم بسیار گسترده‌ای از فعالیت‌های لجستیکی از قبیل بسته‌بندی و بارگیری اقلام به‌صورت پی در پی در آن صورت می‌گیرد. همانطور که نمودار (۵) نشان می‌دهد این شرکت سه مرکز پخش منطقه‌ای دارد، که این مراکز وظیفه پخش قطعات یدکی در منطقه خود را دارند.

قطعات یدکی پس از جمع‌آوری از انبار مرکزی در صندوق‌ها قرار می‌گیرد. این صندوق‌ها سپس در ماشین‌های مختلف بارگیری می‌شود. هر کدام از ماشین‌ها بایستی مسیر نمودار (۵) را طی کنند که در واقع یک تور به طول ۱۸۰۰ کیلومتر را تشکیل می‌دهد.



نمودار ۵- مسیری که در هربار سفر، یک وسیله بایستی طی کند

آمار و اطلاعات مربوط به مصرف صندوق‌ها در مدت یک سال (۲۷۰ روز کاری) موجود می‌باشد. جدول (۴) ابعاد این صندوق‌ها و تعداد مصرف سالیانه و روزانه آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۴- صندوق‌های مختلف و تعداد مصرفی آنها

شماره	طول(متر)	عرض(متر)	ارتفاع(متر)	تعداد مصرف در یکسال	تعداد مصرف روزانه
۱	۱۰۵	۱۰۵	۷۱	۱۶۹۵۶	۶۲,۳
۲	۱۵۳	۱۰۵	۱۰۵	۱۸۰۵۹	۶۶,۴
۳	۱۰۵	۵۴	۵۳	۵۴۲۸	۲۰,۰
۴	۱۰۵	۴۷	۴۵	۷۳۷۳	۲۷,۱
۵	۸۱	۸۱	۸۱	۵۱۰	۱,۹
۶	۱۶۶	۳۵	۹۶	۳۶۷۲	۱۳,۵
۷	۱۵۰	۳۱	۱۲۰	۵۷۰	۲,۱
۸	۱۵۰	۴۸	۱۲۰	۵۴۰	۲,۰
۹	۱۲۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۷۸۳۶	۶۵,۶
۱۰	۵۰	۳۰	۷۰	۳۴۹۶	۱۲,۹
۱۱	۶۰	۵۰	۸۰	۴۴۱۳	۱۶,۲

صندوق‌ها پس از تکمیل و در انتهای روز، در ماشین‌های مختلف بارگیری می‌شوند. هر کدام از ماشین‌ها ابعاد خاص خود را دارند و هزینه آنها برای طی مسافت یکسان متفاوت می‌باشد. با استفاده از نظرات خبرگان و نرخ‌های کرایه هر کدام از ماشین‌ها، هزینه‌های زیر برای هر کدام از ماشین‌ها به‌دست آمده است. جدول (۵) این هزینه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵- ماشین‌های مختلف و هزینه آنها در هر کیلومتر

نام خودرو	عرض(متر)	طول(متر)	ارتفاع(متر)	هزینه در هر کیلومتر(ریال)
خاور	۲	۴	۱,۷۷	۷,۸۰۰
۹۱۱	۲,۲	۴,۵	۱,۷۷	۱۰,۰۰۰
تک (۱۰تن)	۲,۲۵	۵,۸	۱,۷۷	۱۱,۰۰۰
دوچرخ(جفت)	۲,۳	۶,۵	۱,۷۷	۱۲,۰۰۰
تریلر	۲,۳	۱۲	۱,۷۷	۱۴,۵۰۰

پنج سناریوی مختلف برای انتخاب ترکیب ناوگان حمل و نقل به این شرکت پیشنهاد شده است. جدول (۶) ترکیب ناوگان حمل و نقل در هر کدام از این سناریوها را نشان می‌دهد:

جدول ۶- سناریوهای مختلف پیشنهاد شده به شرکت

تریلر	دوچرخ(جفت)	تک(۱۰تن)	۹۱۱	خاور	نوع خودرو
۴	۳	۵	۱۰	۲۵	سناریو۱
۶	۳	۲	۱۵	۲۰	سناریو۲
۴	۵	۳	۱۰	۲۵	سناریو۳
۶	۴	۴	۱۵	۲۰	سناریو۴
۴	۵	۰	۱۰	۲۵	سناریو۵

۴. حل مسأله مطالعه موردی

۴-۱. مقایسه الگوریتم‌های ارائه شده با نرم‌افزار GAMS

در این بخش، جهت تحلیل کارایی الگوریتم ابتکاری و حریصانه، نتایج را از لحاظ کیفیت و سرعت حل با نتایج نرم‌افزار GAMS مقایسه خواهیم کرد. به این منظور مدل ریاضی ارائه شده در بخش ۱-۳، در نرم‌افزار گمز نوشته شد. برای مقایسه بهتر، چندین مسأله با تعداد جعبه به ترتیب ۵، ۸، ۱۲، ۱۵، ۲۰ و ۵۰ و ۷۰ درنظر گرفته شد. برای هر کدام از این دسته‌ها، سه مسأله

حل شد. نام مسأله، تعداد جعبه‌ها و همچنین شماره مسأله مربوط به آن را نشان می‌دهد. مثلاً مسأله ۷۰-۱ یعنی اولین مسأله که ۷۰ جعبه دارد.

خلاصه نتایج حاصله از الگوریتم‌های ابتکاری پیشنهادی و نرم‌افزار GAMS در جدول (۷) نشان داده‌شده است. الگوریتم ابتکاری و حریصانه در محیط C# کد نویسی شده و در قالب نرم‌افزار (exe.) جهت تحلیل مسائل مذکور مورد استفاده قرار گرفته است. حداکثر زمان حل نرم‌افزار GAMS تا یک ساعت تنظیم شده است.

جدول ۷- مقایسه نتایج به دست آمده به‌وسیله نرم‌افزار دقیق و الگوریتم ابتکاری

ابتکاری حریصانه			روش ابتکاری			GAMS		
درصد اختلاف با GAMS	زمان حل	امتیاز	درصد اختلاف با GAMS	زمان حل	امتیاز	زمان حل	امتیاز	نام مسأله
٪۰	۱۸٫۰	۲۵۰	٪۰	۰٫۱۴	۲۵۰	۱٫۸	۲۵۰	۱-۵
٪۰	۱۵٫۳	۵۰۰	٪۳۰	۰٫۰۱	۶۵۰	۳٫۲	۵۰۰	۲-۵
٪۰	۱۸٫۹	۵۰۰	٪۳۰	۰٫۰۱	۶۵۰	۲٫۰	۵۰۰	۳-۵
٪۰	۳۳٫۷	۵۰۰	٪۳۰	۰٫۰۱	۶۵۰	۳٫۶	۵۰۰	۱-۸
٪۰	۳۸٫۱	۵۰۰	٪۳۰	۰٫۰۱	۶۵۰	۳٫۵	۵۰۰	۲-۸
٪۰	۴۶٫۶	۵۰۰	٪۳۰	۰٫۰۲	۶۵۰	۱۵٫۴	۵۰۰	۳-۸
٪۰	۷۰٫۱	۷۵۰	٪۷	۰٫۰۴	۸۰۰	۴٫۵	۷۵۰	۱-۱۲
٪۲۵	۶۶٫۲	۱۰۰۰	٪۳۱	۰٫۰۴	۱۰۵۰	۳۶۰۰٫۹	۸۰۰	۲-۱۲
٪۳۳	۶۵٫۲	۱۰۰۰	٪۴۰	۰٫۰۵	۱۰۵۰	۶۹۵٫۷	۷۵۰	۳-۱۲
٪۰	۱۰۴٫۳	۷۵۰	٪۷	۰٫۰۵	۸۰۰	۳۶۰۰٫۰	۷۵۰	۱-۱۵
٪۱۷	۹۱٫۳	۱۰۵۰	٪۴۴	۰٫۰۵	۱۳۰۰	۳۶۰۰٫۰	۹۰۰	۲-۱۵
٪۲۰	۱۰۲٫۱	۹۰۰	٪۴۰	۰٫۰۴	۱۰۵۰	۳۶۰۰٫۰	۷۵۰	۳-۱۵
٪۱۴	۱۲۹٫۴	۱۲۰۰	٪۲۴	۰٫۰۶	۱۳۰۰	۳۶۰۰٫۰	۱۰۵۰	۱-۲۰
٪۰	۱۱۴٫۳	۱۲۰۰	٪۰	۰٫۱۴	۱۲۰۰	۳۶۰۰٫۰	۱۲۰۰	۲-۲۰
٪۱۴	۱۲۸٫۸	۱۲۰۰	٪۳۳	۰٫۰۷	۱۴۰۰	۳۶۰۰٫۰	۱۰۵۰	۳-۲۰
-	۳۵۹٫۶	۲۴۵۰	-	۰٫۵۵	۲۴۵۰	۳۶۰۰٫۰	۰	۱-۵۰

ابتکاری حریصانه			روش ابتکاری			GAMS		
درصد اختلاف با GAMS	زمان حل	امتیاز	درصد اختلاف با GAMS	زمان حل	امتیاز	زمان حل	امتیاز	نام مسأله
–	۲۹۸٫۵	۲۷۰۰	–	۰٫۴۹	۲۷۰۰	۳۶۰۰٫۰	۰	۲-۵۰
–	۳۵۵٫۹	۲۰۰۰	–	۱٫۵۵	۲۰۰۰	۳۶۰۰٫۰	۰	۳-۵۰
–	۵۶۶٫۰	۳۴۵۰	–	۱٫۱۳	۳۵۰۰	۳۶۰۰٫۰	۰	۱-۷۰
–	۵۴۵٫۵	۳۷۰۰	–	۱٫۰۰	۴۱۰۰	۳۶۰۰٫۰	۰	۲-۷۰
–	۵۶۳٫۱	۳۷۰۰	–	۱٫۳۴	۳۷۵۰	۳۶۰۰٫۰	۰	۳-۷۰

با توجه به جدول (۷)، مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده برای مقادیر تابع هدف به‌وسیله الگوریتم ابتکاری حریصانه، اختلاف اندکی با نتایج این نرم‌افزار دارند. همچنین به‌وضوح مشاهده می‌شود که الگوریتم ابتکاری با سرعت بسیار بالا و در زمان بسیار کمتری نسبت به نرم‌افزار GAMS به جواب می‌رسد. با افزایش ابعاد مسأله، زمان حل نرم‌افزار GAMS بشدت بالاتر می‌رود. نرم‌افزار GAMS از الگوریتم‌های پیشرفته شاخه و کران و روش‌های ابتکاری برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده می‌کند تا جواب بهینه را به‌دست آورد. از آنجا که ما ماکزیمم زمان اجرا را ۳۶۰۰ ثانیه گرفته‌ایم در مورد ۵ مسأله، نرم‌افزار جوابی به‌دست آورد، ولی ممکن است جواب به‌دست آمده بهینه نباشد. در مورد ۶ مسأله دیگر یعنی مسائل ۵۰ و ۷۰ تایی این نرم‌افزار حتی موفق به یافتن جوابی شدنی نشده است. ولی در مورد مسائلی که کمتر از ۳۶۰۰ ثانیه حل شده‌اند جواب گمز همان جواب بهینه است.

۴-۲. حل مسأله مطالعه موردی

برای بررسی این سناریوها و انتخاب سناریوی بهینه، ما با توجه به میانگین مصرف هر کدام از صندوق‌ها در طی یک روز، یک شبیه‌سازی به مدت ۲۷۰ روز (یکسال) انجام دادیم. در این شبیه‌سازی، توزیع تعداد مصرف شده هرکدام از صندوق‌ها در طی یک روز، پواسون در نظر گرفته شد. ۲۷۰ مسأله تصادفی با استفاده از توزیع پواسون تولید شد. برای مسأله اول با استفاده از گمز سعی شد تا مسأله حل شود، ولی بعد از ۲۴ ساعت نرم‌افزار جوابی به‌دست نیاورد، ازاین‌رو، از الگوریتم ابتکاری ارائه شده برای به‌دست آوردن هزینه استفاده شد.

هرکدام از این مسائل با پنج سناریوی مختلف، توسط الگوریتم ابتکاری ارائه شده حل شد و بنابر این جمع هزینه سالیانه در هر سناریو به‌دست آورده شده است. این هزینه‌ها در جدول (۸) آورده شده است. لازم به ذکر است این هزینه در واحد کیلومتر به‌دست آمده است. با توجه به مسیر حدود، ۱۸۰۰ کیلومتری، این هزینه بایستی ضربدر ۱۸۰۰ شود. سناریویی که کمترین هزینه را دارد، سناریوی چهار، انتخاب خواهد شد. با توجه به اینکه در این بخش فقط هزینه‌های مستقیم حمل و نقل درنظر گرفته شده، نتایج حاصل جهت اخذ بهترین تصمیم به مدیریت ارائه شده است.

جدول ۸- هزینه برآورد شده‌ی هر سناریو

سناریو	جمع هزینه به ازای هر کیلومتر	جمع هزینه سالیانه
سناریوی ۱	۷۱,۰۹۴,۰۰۰	۱۲۷,۹۶۹,۲۰۰,۰۰۰
سناریو۲	۵۷,۹۳۷,۴۰۰	۱۰۴,۲۸۷,۳۲۰,۰۰۰
سناریوی ۳	۶۷,۲۷۷,۲۰۰	۱۲۱,۰۹۸,۹۶۰,۰۰۰
سناریو۴	۵۴,۰۸۳,۶۰۰	۹۷,۳۵۰,۴۸۰,۰۰۰
سناریوی ۵	۶۸,۵۹۳,۰۰۰	۱۲۳,۴۶۷,۴۰۰,۰۰۰

جمع‌بندی و ملاحظات

ناوگان حمل و نقل ناهمگون به حالتی اشاره دارد که وسایل نقلیه متفاوت ظرفیت‌های متفاوت، هزینه ثابت متفاوت و هزینه متغیر متفاوتی دارند. اکثر سازمان‌ها ناوگان حمل و نقل ناهمگونی دارند و یا وسایل با ظرفیت‌های مختلفی را کرایه می‌کنند تا به مشتریان خود سرویس دهند. اینجا است که بحث انتخاب ناوگان، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. چون با درنظرگرفتن سطح خدماتی که به مشتری می‌دهند و هزینه‌های این خدمت رسانی بایستی بهترین انتخاب درنظرگرفته شود. از آنجا که ترکیب بهینه ناوگان یکبار تعیین می‌شود و اثر آن مدت زیادی باقی می‌ماند، این مسأله یک مسأله استراتژیک می‌باشد، با توجه به میزان هزینه‌های به‌دست آمده برای هر کدام از سناریوها بهتر متوجه استراتژیک بودن این تصمیم می‌شویم.

این مقاله، براساس نیاز یک شرکت پخش و توزیع قطعات یدکی در ایران، برای تعیین ترکیب ناوگان لجستیکی خود توسعه داده شده است. همانطور که در بخش مرور بر ادبیات

گفته شد، اکثر مقالاتی که تا کنون چاپ شده‌اند مسأله مسیریابی و نیازهای آن را برای بررسی ترکیب بهینه ناوگان مورد بررسی قرار داده‌اند. ولی در مورد این شرکت پخش قطعات یدکی، به خاطر انبارهای منطقه‌ای خاص مورد مطالعه قرار گرفته و مسیرخاصی که وجود دارد، مسأله مسیریابی مطرح نمی‌باشد. بنابرین برای اینکه به‌صورت بهینه از ظرفیت کانتینرها استفاده شود تا هزینه کل کاهش یابد، از مسأله بسته‌بندی اقلام ناهمگون در داخل یک مجموعه از صندوق‌های ناهمگون، استفاده شد. این مهمترین نوآوری ارائه شده در این تحقیق می‌باشد. ابتدا یک الگوریتم ابتکاری حریصانه برای حل مسائل ۳D-MSBPP با محدودیت وزن و همچنین محدودیت تعداد کانتینر ارائه شد و با مقایسه با نرم‌افزار گمز کارایی این روش ابتکاری اثبات شد. سپس با استفاده از به‌کارگیری این روش ابتکاری و شبیه‌سازی یکسال آینده هزینه‌های حمل و نقل در سناریوهای مختلف برآورد شد. بهترین سناریو از منظر هزینه‌های حمل و نقل به شرکت پیشنهاد گردید.

هر چند اختلاف هزینه بین سناریوها زیاد به نظر می‌رسد ولی مدیریت تنها با استناد به این هزینه‌ها نخواهد توانست تصمیم درست بگیرد و خروجی این مقاله درکنار درنظر گرفتن داده‌های دیگر ارزشمند خواهد بود. عوامل بسیار مهم دیگری مانند هزینه اولیه خرید هر وسیله نقلیه، میزان و درصد استهلاک سالیانه، میزان هزینه‌های ثابت به ازای هر ماشین مانند حقوق راننده‌های متخصص، میزان مصرف سوخت و ...، در تصمیم‌گیری درست می‌تواند بسیار موثر باشد. متاسفانه داده‌های کافی جهت بررسی دقیق‌تر برخی از هزینه‌ها موجود نبود. جهت مطالعات آتی، بعضی از داده‌ها را از اکنون می‌توان به مدیریت پیشنهاد کرد که جمع‌آوری شود تا تحلیل‌های آینده دقیق‌تر انجام شود. بنابرین گسترش این مدل و درنظر گرفتن این هزینه‌ها می‌تواند یکی از زمینه‌های تحقیقات آتی این مقاله باشد. اعداد هزینه‌ها این نکته را یادآور می‌شود که استفاده از روش‌های علمی و دقیق در تصمیمات این چنینی از هر نظر اقتصادی است و می‌تواند کمک شایانی به صرفه‌جویی در هزینه‌ها و ارتقای صنعت لجستیک نماید. برای مطالعات آتی همچنین می‌توان مسائل دیگر مانند مسیریابی و ترتیب چیدمان اقلام را با مسأله فعلی ترکیب کرد، تا برای سایر شرکت‌ها نیز قابل پیاده‌سازی باشد. پیچیده‌تر شدن مدل نیازمند روش‌های حل فراابتکاری خواهد بود. استفاده از این روش‌ها، مانند الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه منجر به بهبود جواب‌ها در تحقیقات آتی خواهد شد.

منابع

صباغ، م. س.، علینقیان، م. زمانلو، ک. ۲۰۱۵. مسأله مسیریابی وسیله نقلیه وابسته به زمان با محدودیت‌های بارگیری دوبعدی: مدل‌سازی و حل. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۳، ۴۳-۵۹.

ALVAREZ-VALDES, R., PARREÑO, F. & TAMARIT, J. 2012. A GRASP/Path Relinking algorithm for two-and three-dimensional multiple bin-size bin packing problems. Computers & Operations Research.

ALVAREZ-VALDES, R., PARREÑO, F. & TAMARIT, J. 2015. Lower bounds for three-dimensional multiple-bin-size bin packing problems. OR Spectrum, 37, 49-74.

BAAZAOUI, M., HANAFI, S. & KAMOUN, H. 2017. Three-Dimensional Multiple-Bin-Size Bin Packing: A Case Study with a New MILP-Based Upper Bound. Operational Research in Business and Economics. Springer.

BISCHOFF, E. & WÄSCHER, G. 1995. Cutting and packing. European Journal of Operational Research, 84, 503-505.

BODIN, L., MINGOZZI, A., BALDACCI, R. & BALL, M. 2000. The rollon–rolloff vehicle routing problem. Transportation Science, 34, 271-288.

BORTFELDT, A. & WÄSCHER, G. 2012. Constraints in container loading–A state-of-the-art review. European Journal of Operational Research.

CHE, C. H., HUANG, W., LIM, A. & ZHU, W. 2011. The multiple container loading cost minimization problem. European Journal of Operational Research, 214, 501-511.

CRAINIC, T. G., PERBOLI, G. & TADEI, R. 2009. TS2PACK: A two-level tabu search for the three-dimensional bin packing problem. European Journal of Operational Research, 195, 744-760.

DYCKHOFF, H. 1990. A typology of cutting and packing problems. European Journal of Operational Research, 44, 145-159.

ERTEK, G. & KILIC, K. 2006. Decision support for packing in warehouses. Computer and Information Sciences–ISCIS 2006. Springer.

FAGERHOLT, K. 1999. Optimal fleet design in a ship routing problem. International Transactions in Operational Research, 6, 453-464.

HOFF, A., ANDERSSON, H., CHRISTIANSEN, M., HASLE, G. & LØKKETANGEN, A. 2010. Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. Computers & Operations Research, 37, 2041-2061.

IORI, M. 2016. An annotated bibliography of combined routing and loading problems. Yugoslav Journal of Operations Research, 23.

JABALI, O., GENDREAU, M. & LAPORTE, G. 2012. A continuous approximation model for the fleet composition problem. Transportation Research Part B: Methodological, 46, 1591-1606.

KOÇ, Ç., BEKTAŞ, T., JABALI, O. & LAPORTE, G. 2016. The impact of depot location, fleet composition and routing on emissions in city logistics. Transportation Research Part B: Methodological, 84, 81-102.

LI, T.-H. S., LIU, C.-Y., KUO, P.-H., FANG, N.-C., LI, C.-H., CHENG, C.-W., HSIEH, C.-Y., WU, L.-F., LIANG, J.-J. & CHEN, C.-Y. 2017. A three-dimensional adaptive PSO-based packing algorithm for an IoT-based automated e-fulfillment packaging system. IEEE Access.

LI, X. & ZHANG, K. 2015. A hybrid differential evolution algorithm for multiple container loading problem with heterogeneous containers. Computers & Industrial Engineering, 90, 305-313.

NOURINEJAD, M. & ROORDA, M. J. 2017. A continuous approximation model for the fleet composition problem on the rectangular grid. OR spectrum, 39, 373-401.

PAQUAY, C., LIMBOURG, S. & SCHYNS, M. 2017. A tailored two-phase constructive heuristic for the three-dimensional Multiple Bin Size Bin Packing Problem with transportation constraints. European Journal of Operational Research.

ROGGE, M., VAN DER HURK, E., LARSEN, A. & SAUER, D. U. 2018. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. Applied Energy, 211, 282-295.

SOONPRACHA, K., MUNGWATTANA, A. & MANISRI, T. A re-constructed meta-heuristic algorithm for robust fleet size and mix vehicle routing problem with time windows under uncertain demands. Proceedings of the 18th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems-Volume 2, 2015. Springer, 347-361.

WÄSCHER, G., HAUßNER, H. & SCHUMANN, H. 2007. An improved typology of cutting and packing problems. European Journal of Operational Research, 183, 1109-1130.

WU, H., LEUNG, S. C., SI, Y.-W., ZHANG, D. & LIN, A. 2017. Three-stage heuristic algorithm for three-dimensional irregular packing problem. Applied Mathematical Modelling, 41, 431-444.

YI, J. & BORTFELDT, A. 2018. The Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-Dimensional Loading Constraints and Split Delivery—A Case Study. Operations Research Proceedings 2016. Springer.

ZHU, W., HUANG, W. & LIM, A. 2012. A prototype column generation strategy for the multiple container loading problem. European Journal of Operational Research, 223, 27-39.