یکپارچگی مسأله مسیریابی وسایل نقلیه با زمانبندی حمل‌ونقل و تولید در زنجیره‌تأمین

محمدعلی بهشتی‌نیا (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

داود فیض، دانشیار، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

فاطیما سدادی، دانش آموخته دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

E-mail: beheshtinia@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۵/۱۷ پذیرش:۹۶/۰۲/۳۱

چکیده

طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل نقش مهمی در کاهش قیمت تمام شدهٔ محصولات و افزایش رقابت‌پذیری آن‌ها دارد. از این رو، سازمان‌ها در پی راهی جهت تسریع حمل‌ونقل و کاهش هزینه‌های مربوط به آن هستند. این مقاله به ترکیب سه استراتژی نوین در مورد زمانبندی حمل‌ونقل در زنجیره‌تأمین شامل زمانبندی جامع تولید در تأمین‌کنندگان، استفاده از ناوگان حمل‌ونقل مشترک برای انتقال قطعات تولید شده در تأمین‌کنندگان به شرکت سازنده و یکپارچگی تصمیمات در حوزهٔ زمانبندی تولید و حمل‌ونقل می‌پردازد. در زنجیره‌تأمین مورد بررسی فرض می‌شود که تعداد No سفارش وجود دارد که پس از تولید توسط Ns تأمین‌کننده باید توسط Nv وسیله نقلیه به یک شرکت سازنده حمل شوند به‌منظور تحلیل این مدل پیشنهادی، ابتدا مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسأله با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان‌های تحویل سفارشات، توسعه داده شده است. سپس جهت حل مسأله یک الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبورعسل ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی الگوریتم کلونی زنبور عسل پیشنهادی، نتایج آن با نتایج الگوریتم مطرح شده برای نزدیک‌ترین مسأله در ادبیات موضوع به مسألهٔ مورد بررسی در این مقاله، مقایسه شده است. همچنین نتایج این الگوریم با جواب بهینه برای مسائل با ابعاد کوچک مقایسه شده است. نتایج مقایسات نشان از کارآیی بالای الگوریتم پیشنهادی دارد. همچنین روی سه پارامتر مساله شامل تعداد سفارشات، تعداد تأمین کنندگان و تعداد وسایل نقلیه تحلیل حساسیت صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد سفارشات، مجموع زمان‌های تحویل سفارشات کاهش می یابد. همچنین با افزایش تعداد تأمین کنندگان و تعداد وسایل نقلیه مجموع زمانهای تحویل سفارشات کاهش می‌یابد.

واژه های کلیدی: الگوریتم کلونی زنبور عسل، تولید، زمانبندی حمل‌ونقل، زنجیره‌تأمین، مسیریابی

۱. مقدمه

ویژگی کلیدی محیط کسب‌وکار کنونی، تغییرات سریع و ساختارشکن است. در این فضا، بنگاه‌های اقتصادی با محیطی رقابتی در تعامل هستند که پیچیدگی، پویایی و غیرقابل پیش‌بینی بودن از ویژگی‌های اصلی آن است [Acur and Bititci, 2003]. امروزه دیگر بنگاه‌ها به‌طور مجزا نمی‌توانند موفق به کسب مزیت‌های رقابتی و افزایش سهم بازار شوند و نیازمند یک مشارکت برنامه‌ریزی شده و اصولی با تأمین‌کنندگان و مشتریان خود هستند. تعامل مؤثر و مشارکت سودمند در این فضای رقابتی نیازمند بهره‌گیری از استراتژی‌های اثربخشی است که ضمن داشتن انعطاف‌پذیری و پویایی، قابلیت‌های مناسبی برای موفقیت در صحنهٔ رقابت به سازمان عرضه کند.

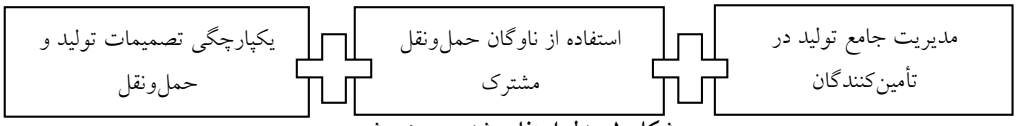
یکی از الگوهای نوین برای فعالیت در دنیای کنونی، مدیریت زنجیره‌تأمین[1] است که با توجه به الزامات اقتصاد نوین به‌طورجدی مورد توجه مدیران کسب‌وکار و محققان مدیریت صنعتی قرارگرفته است [Lee, 2002]. مدیریت زنجیره‌تأمین یک مجموعه از روش‌هایی است که برای یکپارچه نمودن مؤثر تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، انبارها و خرده‌فروشان به‌کار می رود، تا محصولات مورد نیاز به مقدار مشخص و در زمان و مکان معین تولید شده و به مشتریان عرضه شود به‌طوری‌که هزینه‌های کل زنجیره حداقل گردد و درضمن نیاز مشتریان با سطح خدمت بالا برآورده شود [Chandra and Fisher, 1994]. اهمیت یکپارچه‌سازی و همگام‌سازی جریان مواد و اطلاعات در یک سیستم زنجیره‌تأمین سبب ایجاد تمایل بسیار بالای صاحبان صنعت و پژوهشگران آکادمیک شده است [Chang and Lee, 2004]. چانگ و لی [۲۰۰٤] بر این موضوع تأکید می‌کنند که مطالعه موردی و جدا از هم مسائل مربوط به تولید و حمل‌ونقل، به جای مطالعهٔ یکپارچه و همزمان آن‌ها، لزوماً ما را به یک جواب بهینه نمی‌رساند. زمانبندی جریان مواد در بین بخش‌های مختلف یک زنجیره‌تأمین از جمله مهمترین مباحث کنترل موجودی و مدیریت زنجیره‌تأمین است که تا به‌حال توجه چندانی به آن نشده و مقالات کمی به طور مشخص به این حوزه پرداخته‌اند.

این مقاله با تلفیق استراتژی‌های نوین در زمانبندی حمل‌ونقل در زنجیره‌تأمین مدلی با تأکید بر سه مؤلفهٔ مدیریت جامع تولید در تأمین‌کنندگان[2]، ناوگان حمل‌ونقل مشترک برای انتقال قطعات تولید شده در تأمین‌کنندگان به شرکت سازنده و یکپارچگی تصمیمات در این دو حوزه پیشنهاد می‌کند (شکل ۱). هدف تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان، تعیین توالی تولید در تأمین‌کنندگان، تخصیص سفارش‌ها به وسایل نقلیه و تعیین اولویت حمل سفارش‌ها توسط وسایل نقلیه جهت کمینه نمودن مجموع زمان تحویل سفارش‌ها است. در ادامه هر یک از مؤلفه‌های استفاده شده در مدل پیشنهادی به اختصار توضیح داده می‌شوند.

۱-۱ مدیریت جامع تولید در تأمین‌کنندگان

در حال حاضر بیشتر شرکت‌های سازنده به تأمین‌کنندگان به دید یک فروشگاه نگاه می‌کنند و معتقدند تأمین‌کننده‌ای بهتر است که بتواند پس از اعلام نیاز در مورد تعداد مشخصی از یک قطعه، در سریع‌ترین زمان ممکن، آن قطعه را تحویل دهد. از سوی دیگر با توجه به نوساناتی که در مورد میزان تقاضا وجود دارد، تأمین‌کنندگان جهت جلب نظر شرکت سازنده و بستن قرارداد در شرایط رقابتی، مجبور به انباشت حجم انبوهی از محصولات خود در انبار می‌باشند، که این مسأله موجب افزایش هزینه های مربوط به خواب سرمایه شده و به تبع آن، بهای تمام‌شدهٔ محصول نیز افزایش می‌یابد.

در مدل پیشنهادی فرض می‌شود که این شرکت سازنده است که زمانبندی تولید در تأمین‌کنندگان را با رویکردی جامع انجام می دهد. به عبارت دیگر سفارشات هر زمان که لازم باشند در شرکت تأمین‌کننده زمانبندی و تولید خواهند شد. بنابراین انباشت قطعات مرتبط با عدم اطلاع تأمین‌کنندگان از تغییرات نیاز شرکت سازنده از بین می‌رود.



شکل ۱. مدل استفاده شده در پژوهش

۱-۲ استفاده از ناوگان حمل‌ونقل مشترک

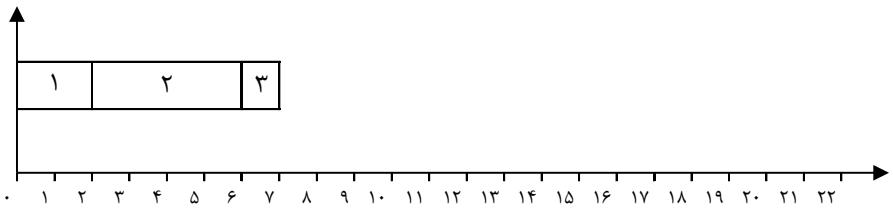
معمولاً پس از تخصیص سفارشات، هر تأمین‌کننده می‌بایست سفارشات تخصیص یافته به خود را به‌طور مستقل تا شرکت سازنده حمل نموده و تحویل دهد که این امر موجب ازدیاد تعداد رفت‌وآمدهای وسایل نقلیه و به‌تبع آن افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود و تأمین‌کنندگان نیز برای جبران این هزینه، بهای تمام‌شده قطعات را افزایش می‌دهند. استفاده از روش‌های حمل‌ونقل اشتراکی نظیر رویکرد مسألهٔ مسیریابی وسایل نقلیه (VRP[۳]) هزینه‌های حمل‌ونقل را تا حد زیادی کاهش می‌دهند. از ویژگی‌های حمل‌ونقل مشترک نسبت به حمل‌ونقل مستقل، این است که هر وسیله‌نقلیه می‌تواند، قطعات تولید شده توسط چندین تأمین‌کننده مختلف را در یک محموله حمل کند، که این امر موجب کاهش قابل توجه هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود. مدل پیشنهادی ما از چنین رویکردی در برنامه‌ریزی ناوگان حمل‌ونقل استفاده می‌کند.

۱-۳ یکپارچگی تصمیمات تولید و حمل‌ونقل

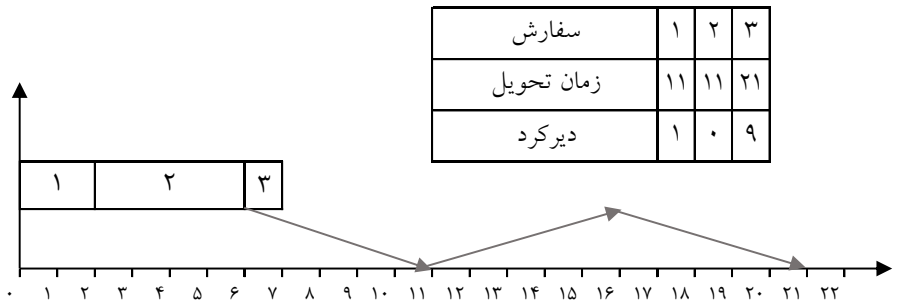
در رویکرد غیریکپارچه تصمیمات مربوط به تولید و حمل‌ونقل به‌صورت جداگانه و سلسله‌مراتبی گرفته می‌شوند، حال آنکه در رویکرد یکپارچه، این تصمیمات به صورت همزمان گرفته می‌شود. در نظرگرفتن جداگانهٔ برنامه‌ریزی تولید در تأمین‌کنندگان و حمل‌ونقل ممکن است ما را از رسیدن به نقطه بهینه عمومی بازدارد.

این امر را می‌توان با یک مثال عددی نشان داد. فرض کنید که یک تأمین‌کننده و یک وسیله‌نقلیه و سه سفارش وجود دارند که باید توسط تأمین کننده مورد پردازش قرار گرفته و توسط وسیله‌نقلیه به سمت شرکت سازنده حمل گردند. زمان تکمیل هر سفارش زمانی است که سفارش مذکور به شرکت سازنده تحویل داده می‌شود. اندازه هر سه سفارش برابر یک واحد است. زمان پردازش سفارشات ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۲ واحد، ٤ واحد و ۱ واحد و تاریخ های تحویل آن‌ها به ترتیب برابر ۱۰، ۱۱ و ۱۲ واحد است. تابع هدف مساله نیز کمینه نمودن مجموع دیرکرد تحویل سفارشات از تاریخ تحویلشان است. اگر زمانبندی تولید و حمل‌ونقل به‌صورت متوالی و مستقل انجام پذیرد، تأمین کننده در قسمت زمانبندی تولید ممکن است توالی پردازش سفارشات را بر اساس مرتب نمودن سفارشات بصورت صعودی از تاریخ تحویلشان به‌دست آورد (شکل ۲).

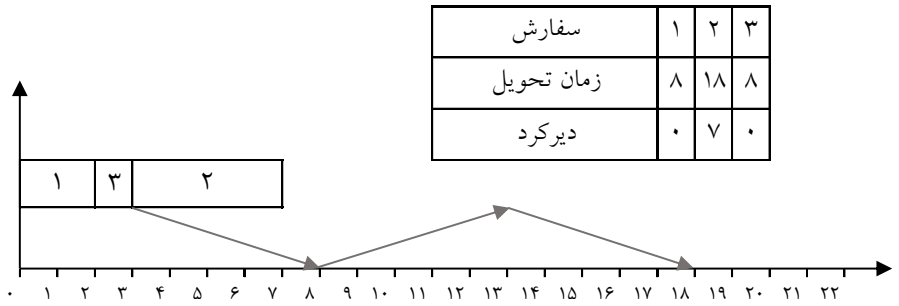
حال فرض کنید ظرفیت وسیله نقلیه برابر ۲ واحد است و این وسیله نقلیه فاصله‌ی بین تأمین‌کننده تا شرکت سازنده را در ۵ واحد زمانی طی می‌کند. بعد از زمانبندی تولید، زمانبندی حمل‌ونقل به‌صورت نشان داده شده در شکل ۳ انجام می‌پذیرد. به این ترتیب که به‌علت محدودیت ظرفیت وسیله‌نقلیه، این وسیله ابتدا دو سفارش ۱ و ۲ را به سمت شرکت سازنده حمل نموده و سپس به سمت تأمین کننده بازگشته و سفارش ۳ را به شرکت سازنده حمل می‌کند. در این حالت تابع هدف شامل ۱۰ واحد دیرکرد می‌شود. اما اگر روابط متقابل بین زمانبندی تولید و حمل ونقل در نظر گرفته شود ممکن است جواب نشان داده شده در شکل ٤ به‌دست آید که دارای ۷ واحد دیرکرد است. این امر نشان می‌دهد که حالت اول رسیدن به جواب بهینه‌ی عمومی را تضمین نمی‌نماید.



شکل ۲. توالی پردازش سفارشات در تأمین‌کننده



شکل ۳. جواب نهایی در حالت اول



شکل ٤. جواب به‌دست آمده در حالت دوم

این مقاله به بررسی یکپارچگی زمانبندی تولید و حمل‌ونقل بین یک شرکت سازنده و تأمین‌کنندگانش با تأکید بر زمانبندی تولید جامع در تأمین‌کنندگان و استفاده از ناوگان حمل‌ونقل مشترک می‌پردازد. با توجه به جدید بودن مسأله و جدید بودن آن در ادبیات موضوع و همچنین ماهیت NP-hard آن پس از مدلسازی این مسأله به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، یک الگوریتم کلونی زنبور عسل[٤] برای حل آن ارائه شده است. از آنجایی‌که در سالهای اخیر در بسیاری از مسائل زمان‌بندی از الگوریتم کلونی زنبور عسل استفاده فراوانی شده است و این الگوریتم در بسیاری از این قبیل مسائل کارآیی بالای خود را نشان داده است، سعی گردید عملکرد این الگوریتم در مسأله مورد بررسی در این مقاله مورد بررسی قرار گیرد. نوآوری‌های این پژوهش به شرح زیر است:

۱. ارائه یک مدل جدید در مدیریت زنجیره تأمین با در نظرگرفتن استراتژی‌های یکپارچگی زمانبندی تولید و حمل‌ونقل، استفاده از ناوگان حمل‌ونقل مشترک و مدیریت جامع تولید در تأمین‌کنندگان

۲. توسعهٔ مدل ریاضی برای مسأله مذکور

۳. ارائه الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبورعسل برای حل مسأله مذکور

در ادامه در بخش ۲ به بررسی ادبیات موضوع پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مفروضات مسأله تبیین و مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسأله ارائه شده است. در بخش ٤ الگوریتم روش حل پیشنهادی مسأله ارائه می‌شود. در بخش ۵ به اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی روی طیف متنوعی از مسائل تصادفی پرداخته می‌شود و بخش آخر نیز به خلاصه، نتیجه‌گیری و بیان زمینه‌های تحقیقات آتی اختصاص دارد.

۲. ادبیات موضوع

در این بخش به بررسی تحقیقاتی می‌پردازیم که تاکنون در حوزهٔ زمانبندی در زنجیره‌تأمین صورت پذیرفته‌اند. بیمیر و دمیرلی یک الگوریتم ژنتیک به‌منظور زمانبندی در یک زنجیره‌تأمین دو مرحله‌ای ارائه نموده‌اند. آن‌ها یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط نیز به‌منظور بهینه‌سازی تأمین

و مونتاژ قطعات و همچنین زمانبندی توزیع ارائه نموده‌اند [Yimer and Demirli, 2010]. آورباخ به بررسی زمانبندی برخط[5] در زنجیره‌تأمینی متشکل از یک کارخانه و چند مشتری با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی جریان کاری سفارشات پرداخته است [Averbakh, 2010]. رستمیان دلاور، حاجی آقایی کشتلی و ملا علی زاده زواردهی یک الگوریتم ژنتیک به منظور یکپارچگی زمانبندی تولید و حمل‌ونقل هوایی ارائه نموده‌اند. پس از ارائه مدل ریاضی مسأله، دو الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله پیشنهاد شده است [Rostamian Delavar, Hajiaghaei-Keshteli and Molla-Alizadeh-Zavardehi, 2010]. اسکولز ریتر، فرازون و ماکوچویچ یکپارچگی تولید و حمل‌ونقل در یک زنجیره‌تأمین عمومی را بررسی و یک مدل ریاضی به‌منظور حل مسأله ارائه نموده‌اند [Scholz-Reiter, Frazzon and Makuschewitz, 2010]. باتنگر، مهتا و چانگ‌تاو به بررسی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و زمانبندی در حالت وجود دو نوع حمل‌ونقل هوایی و دریایی پرداخته‌اند [Bhatnagar, Mehta and Chong Teo, 2011]. یونگ، چوئی و چنگ به بررسی زمانبندی در یک زنجیره‌تأمین دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن چندین پنجرهٔ زمانی تحویل مشترک با هدف کمینه‌نمودن هزینه‌های حمل‌ونقل و موجودی پرداخته‌اند [Yeung, Choi and Cheng, 2011]. لئو و چن به بررسی یکپارچگی مسیریابی، کنترل موجودی و زمانبندی در یک زنجیره‌تأمین پرداخته و پس از مدلسازی ریاضی مسأله، یک الگوریتم جستجوی همسایگی به‌منظور حل مسأله ارائه نموده‌اند [Liu and Chen, 2012]. مهرآوران و لجندران زمانبندی در محیط جریان کاری با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی با دو تابع هدف کمینه نمودن سفارشات نیمه‌ساخته[6] و بیشینه نمودن سطح سرویس را مورد بررسی قرار داده‌اند [Mehravaran and Logendran, 2012]. عثمان و دمیرلی به بررسی زمانبندی تحویل و اندازه انباشته اقتصادی در یک زنجیره‌تأمین سه مرحله‌ای و چند محصولی پرداخته‌اند [Osman and Demirli, 2012]. آورباخ و بیسان به بررسی مسأله زمانبندی برخط در یک زنجیره‌تأمین دو سطحی با چند مشتری پرداخته و یک الگوریتم تخمینی برای آن ارائه نموده‌اند [Averbakh and Baysan, 2013]. رن، دو و اکسو یک زنجیره‌تأمین دو مرحله‌ای را در نظر گرفتند که در آن تعدادی تأمین‌کننده، قطعات مورد نیاز برای یک مونتاژکننده را فراهم می‌آورند [Ren, Du and Xu, 2013]. کابرا، شایک و راتور زمانبندی در زنجیره‌تأمین داروسازی را برای یک محیط چند مرحله‌ای، چند محصولی و چند پریودی بررسی نموده‌اند. آن‌ها زمانبندی را به‌صورت پیوسته در نظر گرفته و یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط[7] برای آن ارائه نمودند [Kabra, Shaik and Rathore, 2013]. مقاله آن‌ها توسعهٔ تحقیق شیک و فلویدز است [Shaik and Floudas, 2007] که محدودیت‌های اضافی نظیر تغییرات وابسته به توالی[8]، زمان‌های تحویل چندگانهٔ میانی[9]، تاریخ انقضا[10] و محصولات معیوب، وجود هزینه‌های مربوط به دیرکرد در تحویل سفارشات را به مدل آن‌ها اضافه نموده‌اند. الریچ به یکپارچگی زمانبندی ماشین‌آلات و مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی پرداخته است [Ullrich, 2013]. توماس و همکاران به بررسی زمانبندی در زنجیره‌تأمین زغال‌سنگ با چند فعالیت مستقل که توسط محدودیت‌های منابع با هم در ارتباطند، پرداخته‌اند [Thomas et al. 2014]. سلوارجاه و ژانگ به بررسی زمانبندی زنجیره‌تأمینی پرداخته‌اند که در آن یک تولید کننده مواد نیمه‌ساخته را از تأمین‌کنندگان در زمان‌های متفاوت دریافت و کالاهای تکمیل شده را به‌صورت دسته‌ای به مشتریان تحویل می‌دهد [Selvarajah and Zhang, 2014]. ساویک به بررسی ارتباط زمانبندی با انتخاب تأمین‌کنندگان در حالت وجود ریسک‌های قطع[11] پرداخته و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و احتمالی برای مسأله ارائه نموده است [Sawik, 2014]. مونز و همکاران به یکپارچگی بهینهٔ برنامه ریزی و زمانبندی، با رویکرد تجزیه لاگرانژی در مدیریت زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند [Muñoz et al. 2015]. هان و ژانگ به بررسی مسأله زمانبندی زنجیره‌تأمین آنلاین با در نظر گرفتن یک ماشین، چندین مشتری و تعدای نامحدودی از وسایل نقلیه با ظرفیت محدود پرداخته‌اند [Han and Zhang, 2015]. هان و همکاران همچنین به کمینه‌سازی زمان کل عملیات و هزینهٔ تحویل در زمانبندی زنجیره‌تأمین آنلاین، در حالت تک‌ماشینه و ماشین های موازی در یک سامانهٔ حمل‌ونقل با وجود یک مشتری پرداخته‌اند [Han et al. 2015]. پینها و همکاران زمانبندی در زنجیره‌تأمین را در خطوط مونتاژ موتورسیکلت با رویکردی پویا بررسی نموده‌اند

[Pinha et al. 2015]. لیو و همکاران، با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان عملیات برای خدمات لجستیکی در محیطی با سفارشی‌سازی انبوه، مدل جدیدی از زمانبندی لجستیک چندهدفه ارائه داده‌اند [Liu et al. 2015]. پی و همکاران، به حل مسأله زمانبندی تولید و حمل در یک زنجیره‌تأمین دو مرحله‌ای پرداخته‌اند که زمان پردازش هر کار، تابعی خطی از زمان شروعش است [Pei et al., 2015]. اهم و فرایتگ، مدلی جهت یکپارچه‌سازی زمانبندی تولید و حمل با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه داده‌اند [Ehm and Freitag, 2016]. لیو و همکاران، زمانبندی در زنجیره‌تأمین را با درنظر گرفتن جداسازی سفارشات مشتریان بررسی نموده‌اند [Liu et al., 2016]. بروک کامرا، مایونا فونتس و ماکویرا مارین به بررسی انتقال جریان‌های فیزیکی و اطلاعاتی در زنجیره‌تأمین یکپارچه پرداخته‌اند [Bruque-Cámara ,Moyano-Fuentes and Maqueira-Marín, 2016]. ذگردی و مرندی مسأله زمانبندی یکپارچه تولید و توزیع در زنجیره‌تأمین سه مرحله‌ای فرآورده‌های لبنی شامل تولیدکننده، ناوگان حمل و مشتریان با استفاده از الگوریتم PSO بررسی نمودند[Zegordi & Marandi, 2016] . بزرگی و صبوحی به بررسی مسأله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل حمل‌ونقل برای توزیع کمک های امدادی با درنظرگرفتن تحویل جزئی و انبار چندگانه پرداخته و یک مدل ریاضی برای آن ارائه نمودند [Bozorgi & Sabouhi, 2017].

از بین تحقیقاتی که مسأله زمانبندی در زنجیره‌تأمین را مورد بررسی قرار داده‌اند، نزدیک‌ترین مسأله، مسألهٔ مورد بررسی توسط ذگردی و بهشتی‌نیا [Zegordi and Beheshti Nia, 2009] است که در آن فرض شده است تأمین‌کنندگان در نواحی جغرافیایی از پیش تعیین شده‌ای قرار دارند و فاصلهٔ بین تأمین‌کنندگانی که در یک ناحیهٔ جغرافیایی قرار دارند، قابل چشم‌پوشی است [Zegordi and Beheshti Nia, 2009]. همچنین وسایل نقلیه‌ای که به یک ناحیهٔ جغرافیایی تعلق دارند، تنها سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان همان ناحیه را می‌توانند حمل کنند. به‌عبارت دیگر محاسبات حمل‌ونقل بین هیچ یک از تأمین‌کنندگان صورت نمی‌پذیرد و مسیر حرکت وسایل نقلیه به‌صورت رفت و برگشت است و در عمل مسأله مسیریابی حرکت آن‌ها مطرح نیست. ولی در تحقیق ما فرض می‌شود که تأمین‌کنندگان در نواحی جغرافیایی مختلف قرار داشته که هر یک سرعت متفاوتی در پردازش سفارش‌ها دارند، فاصلهٔ بین تأمین‌کنندگان قابل چشم پوشی نیست. به‌عبارت دیگر محاسبات حمل‌ونقل بین تأمین‌کنندگان صورت می‌پذیرد و در عمل مسأله مسیریابی مطرح است. مفروضات مسأله و جزییات آن در بخش بعد تبیین می‌گردد.

۳. تعریف مسأله

در این بخش ابتدا به بیان مفروضات مسأله پرداخته، سپس مدل ریاضی ارائه می‌شود.

۳-۱ مفروضات مسأله

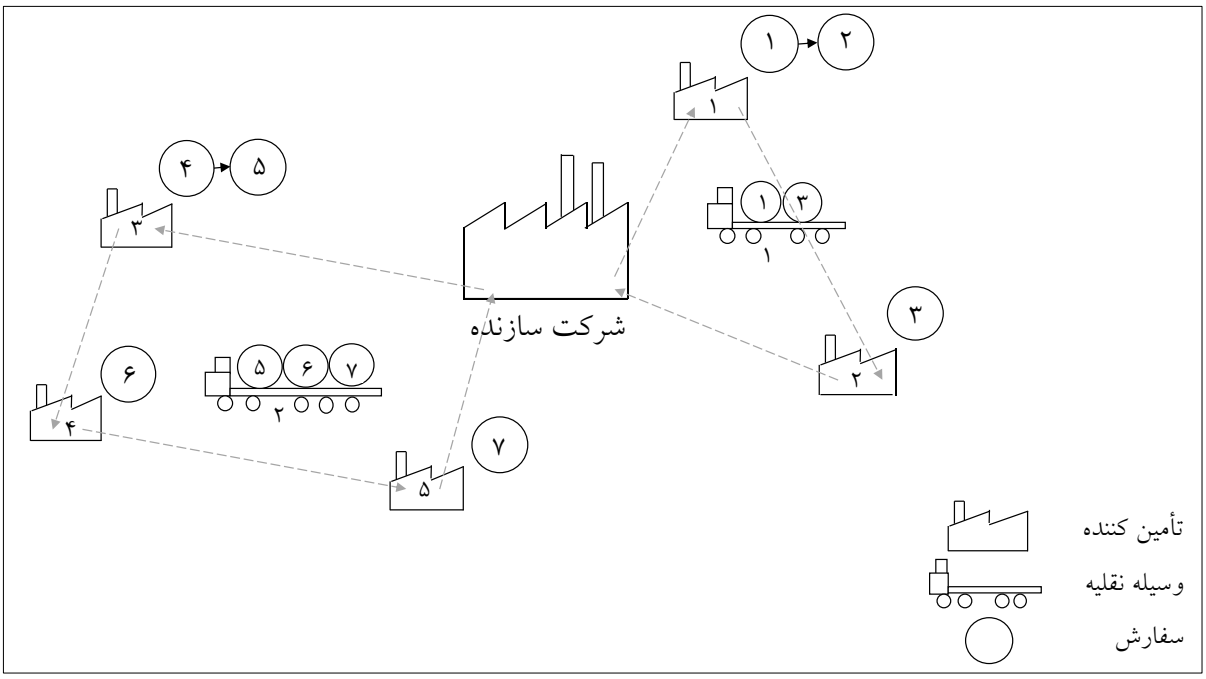
در این مقاله یک مدل جدید در مدیریت زنجیره‌تأمین با در نظر گرفتن استراتژی‌های یکپارچگی زمانبندی تولید و حمل‌ونقل، استفاده از ناوگان حمل‌ونقل مشترک و مدیریت جامع تولید در تأمین‌کنندگان ارائه می‌شود. زنجیره‌تأمین مورد بررسی شامل یک شرکت سازنده و تأمین‌کنندگانش است که توسط یک ناوگان حمل و نقل با هم در ارتباط هستند. مفرضات مسأله به‌صورت زیر درنظر گرفته می‌شود:

- یک شرکت سازنده وجود دارد که باید n سفارش را مورد پردازش قرار دهد. شرکت سازنده دارای m تأمین‌کننده است که قطعات مورد نیاز را تهیه و آن ارسال می‌کنند و تعداد L وسیله‌نقلیه ناوگان حمل‌ونقل زنجیره‌تأمین را تشکیل می‌دهند.
- هر سفارش ممکن است حجم متفاوتی را نسبت به سفارشات دیگر داشته باشد.
- به خاطر تفاوت در ماهیت و تکنولوژی تولید سفارش‌ها، هر تأمین‌کننده می‌بایست سفارش‌های خاصی را پردازش کند و اجازه پردازش دیگر سفارش‌ها را ندارد.
- تأمین‌کنندگان در نقاط مختلف جغرافیایی قرار دارند و فواصل بین آن‌ها قابل چشم‌پوشی نیست.
- تأمین‌کنندگان دارای سرعت‌های تولید متفاوتی هستند و برخی از آن‌ها ممکن است به علت دارا بودن تجهیزات بیشتر و مدرن‌تر، سرعت تولید بیشتری نسبت به سایر تأمین‌کنندگان داشته باشند و اقلام مورد نیاز شرکت سازنده را سریع‌تر تولید کنند.

- به مجموعه سفارش‌هایی که هر وسیله‌نقلیه در هر مرحله حمل می‌کند، یک محموله گفته می‌شود. وسایل نقلیه می‌توانند سفارشاتی را از تأمین‌کنندگان مختلف بارگذاری و در یک محموله به شرکت سازنده تحویل دهند.
- به علت ماهیت سفارشات، برخی سفارشات مجاز نیستند که توسط برخی وسایل نقلیه حمل شوند. به طور مثال ممکن است یک وسیله‌نقلیه از نوع تانکر باشد ولی سفارش به صورت جامد باشد و بالعکس.
- وسایل نقلیه دارای سرعت‌ها و ظرفیت‌های حمل متفاوتی در حمل کالاها هستند.

هدف مسأله تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان، تعیین توالی تولید در تأمین‌کنندگان، تخصیص سفارش‌ها به وسایل نقلیه و تعیین اولویت حمل سفارش ها توسط وسایل نقلیه جهت کمینه نمودن مجموع زمان تحویل سفارش‌ها است. به منظور تبیین بیشتر در شکل ۵ یک جواب برای زنجیره‌تأمینی با ۷ سفارش، ۵ تأمین‌کننده و ۲ وسیله‌نقلیه نشان داده شده است.

همانطورکه در شکل ۵ دیده می‌شود سفارشات ۱و ۲ به تأمین‌کننده ۱، سفارش ۳ به تأمین‌کننده ۲، سفارشات ٤ و ۵ به تأمین‌کننده ۳ و سفارشات ٦ و ۷ به ترتیب به تأمین‌کنندگان ٤ و ۵ تخصیص یافته‌اند. اولویت تولید در تأمین کننده ۱ ابتدا با سفارش ۱ و سپس سفارش ۲ و در تأمین کننده ۲ ابتدا با سفارش ٤ و سپس سفارش ۵ است. وسیله‌نقلیه ۱ به ترتیب سفارشات ۱ و ۳ و وسیله‌نقلیه ۲ به ترتیب سفارشات ۵، ٦ و ۷ را از تأمین‌کنندگان مرتبط بارگذاری و حمل کرده و آن‌ها را به شرکت سازنده انتقال می‌دهند. به منظور حمل سایر سفارشات نظیر ۲ و ٤ نیز میتوان تصمیم‌های مربوط به تخصیص و نحوه حمل متفاوتی را با توجه به سایز این سفارشها و ظرفیت حمل وسایل نقلیه مرتبط گرفت.



شکل ۵. ساختار زنجیره‌تأمین

۳-۲ مدل ریاضی مسأله

قبل از ارائه مدل ریاضی مسأله ابتدا نمادهای مورد استفاده معرفی می‌شوند. پارامترهای مسأله عبارتند از:

No: تعداد سفارش‌ها

Ns: تعداد تأمین‌کنندگان

Nv: تعداد وسایل نقلیه

q,i: شاخص سفارش

p: شاخص اولویت حمل

s,s': شاخص تأمین‌کنندگان

m: شاخص وسایل نقلیه

b: شاخص محموله

$size_i$: وزن (حجم) سفارش iام

Cap_m: ظرفیت حمل وسیله‌نقلیه mام برحسب تعداد سفارش

pt_i: زمان پردازش سفارش iام

Due_i: موعد تحویل سفارش iام

v_i: سرعت پردازش تأمین‌کننده sام

vv_m : سرعت حمل وسیله‌نقلیه m ام

ttT_s: فاصله بین تأمین‌کننده s و شرکت سازنده

$ttS_{s\acute{s}}$: فاصله بین تأمین‌کننده s و $\acute{s}$

A: ماتریسی با ابعاد $No \times Ns$ که اگر $a(i,s)=1$ به معنای مجاز بودن تخصیص سفارش i به تأمین‌کننده s است و بالعکس

AA: ماتریسی با ابعاد $No \times Nv$ که اگر $aa(i,m)=$ 1 باشد به معنای مجاز بودن تخصیص سفارش i به وسیله‌نقلیه m است و بالعکس

M: یک عدد بزرگ مثبت

متغیرهای مدل نیز شامل موارد زیر است:

co_i: زمان تکمیل سفارش i در مرحلهٔ تأمین‌کنندگان

$Delivery_i$: زمان تحویل سفارش i به شرکت سازنده

$Load_i$: زمان بارگذاری سفارش iام روی یکی از وسایل نقلیه به‌منظور حمل

Av_{mbi}: زمان آمادگی وسیله نقلیه mام جهت حمل سفارش iام در bامین مأموریت خود

x_{si}: اگر سفارش iام به تأمین‌کننده sام داده شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

y_{iq}: اگر در مرحلهٔ تأمین‌کنندگان سفارش i قبل از سفارش q قرار گیرد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

V_{mbip}: اگر اولویت حمل pام در bامین حمل به وسیله نقلیه k مربوط به سفارش iام باشد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

پس از تعریف پارامترها و متغیرهای مسأله، مدل برنامه-ریزی عدد صحیح مختلط برای مسأله به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$MinZ = \sum_{i=1}^{No} Delivery_i$$

S.t.:

$$\sum_{s=1}^{Ns} x_{si} = 1 \qquad i=1,2,\ldots,No \qquad (۱)$$

$$\sum_{m=1}^{Nv}\sum_{b=1}^{No}\sum_{p=1}^{No} V_{mbip} = 1 \qquad i=1,2,\ldots,No \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{No} V_{mbip} \le 1 \qquad b=1,2,\ldots,No;\ p=1,2,\ldots,No;\ m=1,2,\ldots,Nv \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{No}\sum_{p=1}^{No} size_i \times V_{mbip} \le Cap_m \qquad b=1,2,\ldots,No;\ m=1,2,\ldots,Nv \qquad (۴)$$

$$co_i \ge Pt_i/v_s - M(1-x_{is}) \qquad i=1,2,\ldots,No;\ s=1,2,\ldots,Ns \qquad (۵)$$

$$co_i + M(2+y_{iq}-x_{si}-x_{sq}) \ge co_q + Pt_i/v_s$$
$$co_q + M(3-y_{iq}-x_{si}-x_{sq}) \ge co_i + Pt_q/v_s \qquad s=1,2,\ldots,Ns;\ i,q=1,2,\ldots,No;\ i<q \qquad (۶)$$

$$y_{iq} = 0 \qquad i,q=1,2,\ldots,No;\ i<q \qquad (۷)$$

$$\sum_{i=1}^{No} V_{mbi(p+1)} \le \sum_{i=1}^{No} V_{mbip} \qquad b=1,2,\ldots,No;\ p=1,\ldots,No\text{-}1;\ m=1,2,\ldots,Nv \qquad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{No} V_{m(b+1)i1} \le \sum_{i=1}^{No} V_{mbi1} \qquad b=1,\dots,No\text{-}1,\ m=1,2,\dots,Nv \quad (۹)$$

$$Load_i \ge Av_{mbi} - M\left(1 - \sum_{p=1}^{No} V_{mbip}\right) \qquad b=1,2,\dots,No,\ i=1,2,\dots,No,\ m=1,2,\dots,Nv \quad (۱۰)$$

$$Load_i \ge co_i \qquad i=1,2,\dots,No \quad (۱۱)$$

$$av_{m1i} \ge \frac{ttT_s}{vv_m} - M(2 - V_{m1i1} - x_{is}) \qquad s=1,2,\dots,Ns,\ i=1,2,\dots,No,\ m=1,2,\dots,Nv \quad (۱۲)$$

$$av_{mbi} \ge Delivery_q + \frac{ttT_s}{vv_m} - M(3 - V_{mbi1} - V_{m(b-1)q1} - x_{is}) \qquad s=1,2,\dots,Ns,\ i,q=1,2,\dots,No,\ b=1,2,\dots,No,\ m=1,2,\dots,Nv \quad (۱۳)$$

$$av_{mbi} \ge Load_q + \frac{ttS_{s's}}{vv_m} - M(4 - V_{mbqp} - V_{mbi(p+1)} - x_{qs'} - x_{is}) \qquad b=1,2,\dots,No,\ m=1,2,\dots,Nv,\ p=1,\dots,No\text{-}1,\ i,q=1,2,\dots,No,\ s,s'=1,2,\dots,Ns \quad (۱۴)$$

$$Delivery_i \ge Load_q + ttT_s/vv_m - M\left(3 - \sum_{p=1}^{No} V_{mbip} - \sum_{p=1}^{No} V_{mbqp} - x_{qs}\right) \qquad i,q=1,2,\dots,No,\ s=1,2,\dots,Ns,\ b=1,2,\dots,No,\ m=1,2,\dots,Nv \quad (۱۵)$$

$$x_{is} = 0 \qquad i=1,2,\dots,No,\ s=1,2,\dots,Ns,\ a(i,s)=0 \quad (۱۶)$$

$$\sum_{b=1}^{No}\sum_{p=1}^{No} V_{mbip} = 0 \qquad m=1,2,\dots,Nv,\ i=1,2,\dots,No,\ aa(i,m)=0 \quad (۱۷)$$

مجموعه محدودیت (۱) بیانگر این مطلب است که هر سفارش تنها باید به یک تأمین‌کننده تخصیص داده شود. مجموعه محدودیت (۲) بیان می‌کند که هر سفارش تنها باید به یک وسیله نقلیه و به یک محموله از آن تخصیص یابد. مجموعه محدودیت (۳) بیانگر این مطلب است که یک سفارش نمی‌تواند به بیش از یک موقعیت در محموله‌ها و وسایل نقلیه تخصیص یابد. مجموعه محدودیت (٤) تضمین می‌کند در هر محموله مجموع فضای اشغالی توسط سفارش‌های تخصیص یافته به یک وسیله‌نقلیه نباید از ظرفیت آن وسیله‌نقلیه بیشتر شود. مجموعه محدودیت (۵) زمان تکمیل هر سفارش در مرحله تأمین‌کنندگان را در نظر می‌گیرد. مجموعه محدودیت (٦) بیان می‌کند که هر تأمین‌کننده نمی‌تواند در هر لحظه بیش از یک سفارش را مورد پردازش قرار دهد. مجموعه محدودیت (۷) مقداری از متغیرهای زائد را حذف می‌کند. مجموعه محدودیت (۸) تضمین می‌کند که اگر به اولویت pام محموله bام از وسیله نقلیه mام سفارشی تخصیص نیابد، نمی‌توان به اولویت $p+1$ام آن محموله سفارشی تخصیص داد. مجموعه محدودیت (۹) تضمین می‌کند که اگر به محموله bام از وسیله‌نقلیه mام سفارشی تخصیص نیابد، نمی‌توان به محموله $b+1$ام آن سفارشی تخصیص داد. مجموعه محدودیت (۱۰) و (۱۱) بیانگر این مطلب است که زمان بارگذاری هر سفارش برابر بیشینه زمان تکمیل پردازش سفارش و زمان آماده بودن وسیله‌نقلیهٔ مرتبط برای حمل آن است. مجموعه محدودیت (۱۲) زمان آماده بودن یک وسیله‌نقلیه برای حمل سفارشی که به اولویت اول اولین محموله آن اختصاص یافته است، را تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت (۱۳) زمان آماده بودن یک وسیله‌نقلیه برای حمل سفارشی که به اولویت اول یک محموله اختصاص یافته است، را با توجه به زمان تحویل سفارش‌های محموله قبلی، مقصد محموله قبلی و زمان حمل تا تأمین‌کننده مرتبط تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت (۱٤) زمان آماده بودن یک وسیله‌نقلیه برای حمل سفارشی که به یک محموله اختصاص یافته است را با توجه به زمان بارگذاری سفارش اولویت حمل قبلی و زمان حمل بین تأمین‌کنندگان مرتبط تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت (۱۵) زمان تحویل یک سفارش را با توجه به زمان بارگذاری کلیه سفارش‌های متعلق به محموله خود و مقصد آن تعیین می‌کند. مجموعه محدودیت (۱٦) از اختصاص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان غیرمجاز جلوگیری می‌کند. مجموعه محدودیت (۱۷) از اختصاص سفارش‌ها به وسایل نقلیه غیرمجاز جلوگیری می‌کند.

به منظور تبیین بهتر، یک مسأله با ٤ سفارش، ٢ تأمین‌کننده و ٢ وسیله نقلیه را در نظر گرفته می‌شود، که اطلاعات مربوط به هر یک از سفارشات، وسایل نقلیه و کلیه فواصل در شکل ٦ ارائه شده است. با این فرض که سرعت تولید در تأمین‌کننده اول برابر ١ و در تأمین‌کننده دوم برابر ٠,٢٥ است.

شکل ٧ یک جواب شدنی مسأله را نشان می‌دهد که در آن سفارش‌های تخصیص‌یافته به تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه و همچنین توالی آن‌ها مشخص شده است. با توجه به شکل می‌بایست به‌ترتیب سفارش‌های ٣، ١ و ٢ توسط تأمین‌کننده ١ پردازش شوند و تأمین‌کننده ٢ نیز سفارش ٤ را پردازش کند. همچنین بایستی به ترتیب سفارش‌های ٣ و ٤ توسط وسیله نقلیه ١ و نیز به ترتیب سفارش‌های ١ و ٢ توسط وسیله نقلیه ٢ را حمل شوند.

با توجه به اطلاعات مسأله و جواب نشان داده شده در شکل ٧، نحوهٔ زمانبندی به صورت شکل ٨ خواهد بود.

همانگونه که مشخص است زمان بارگذاری هر سفارش برابر بیشینه زمان تکمیل آن سفارش و رسیدن وسیله نقلیه به تأمین‌کننده مربوطه است.

حالت خاصی از مسأله مورد بررسی در این تحقیق که در آن زمان حمل‌ونقل بین تأمین‌کنندگان برابر صفر در نظر گرفته شود و عناصر کل ماتریس AA برابر ١ در نظر گرفته شوند، تبدیل به مسأله در نظر گرفته شده توسط ذگردی و بهشتی‌نیا [Zegordi and Beheshti Nia, 2009] می‌شود. از آنجا که مسأله آن‌ها از نوع NP-Hard است درنتیجه مسأله مورد بررسی در این تحقیق نیز نوع NP-Hard خواهد بود و باید از روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری برای حل آن استفاده نمود. در بخش بعد یک الگوریتم کلونی زنبور عسل برای حل مسأله ارائه می‌شود.

الف) اطلاعات فواصل

	شرکت سازنده	تأمین کننده ١	تأمین کننده ٢
شرکت سازنده	_	١٠	٢٠
تأمین کننده ١	١٠	_	٣٠
تأمین کننده ٢	٢٠	٣٠	_

ب) اطلاعات وسایل نقلیه

	سرعت	ظرفیت
وسیله نقلیه ١	١	١٥
وسیله نقلیه ٢	٢	٢٠

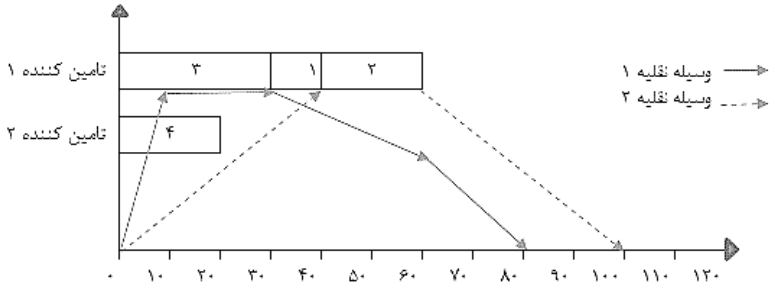
ج) اطلاعات سفارشات

سفارش	زمان	وزن
١	١٠	٥
٢	٢٠	١٠
٣	٣٠	٥
٤	٤٠	٥

شکل ٦. اطلاعات مربوط به مسأله

تأمین کننده١	٢→١→٣
تأمین کننده ٢	٤
وسیله نقلیه ١	٤→٣
وسیله نقلیه ٢	١→٢

شکل ٧. سفارش‌های تخصیص یافته و ترتیب آن‌ها



	سفارش ۱	سفارش ۲	سفارش ۳	سفارش ٤
زمان تکمیل	٤٠	٦٠	٣٠	٣٠
زمان بارگذاری	٤٠	٦٠	٣٠	٦٠
زمان تحویل	١٠٠	١٠٠	٨٠	٨٠

شکل ۸. نمودار گانت و نتایج زمانبندی

٤. الگوریتم کلونی زنبور عسل

الگوریتم کلونی زنبورعسل با شبیه‌سازی از رفتار جستجوی غذا توسط گروه‌های زنبورعسل به حل مسائل می‌پردازد. نسخهٔ الگوریتم به کار گرفته شده در این مقاله شامل ۳ نوع زنبور کارگر[۱۲]، تماشاچی[۱۳] و پیشرو[۱٤] است. ابتدا جستجوی تصادفی در محیط توسط زنبورهای کارگر انجام شده، سپس اطلاعات هریک از زنبورهای کارگر با استفاده از عملگر انتخاب به زنبورهای تماشاچی منتقل می‌شود. اگر جواب تولیدی توسط یک زنبور کارگر در چند تکرار متوالی بهبود نیابد حذف شده و یک زنبور پیشرو به‌صورت تصادفی تولید و به محیط جستجو فرستاده می‌شود. این الگوریتم در سال ۲۰۰۵ توسط کارابوگا ارائه گردید[Karaboga 2005]. به منظور تبیین بیشتر، گام‌های الگوریتم پیشنهادی در زیر بیان گردیده است:

گام ۱. به اندازه n_w (زنبورهای کارگر) جواب اولیهٔ تصادفی تولید کنید.

گام ۲. برای هر جواب (مرتبط با زنبورهای کارگر) یک همسایگی ایجاد کنید و یک انتخاب حریصانه بین جواب قبلی ذخیره شده در حافظه زنبور و جواب همسایگی انجام دهید (هر کدام بهتر بود، آن را انتخاب کنید).

گام ۳. بر مبنای عملگر انتخاب، اطلاعات هر یک از زنبورهای کارگر را به زنبورهای تماشاچی n_v منتقل کنید. زنبورهای تماشاچی یک انتخاب حریصانه بین جواب قبلی ذخیره شده در حافظه خود و جواب‌های جدید انجام می‌دهند.

گام ٤. برای هر یک از جواب های مربوط به زنبورهای تماشاچی یک همسایگی ایجاد کنید و یک انتخاب حریصانه انجام دهید.

گام ۵. اگر جواب موجود در حافظه هر یک از زنبورهای کارگر در R تکرار متوالی بهبود نیافته است، آن‌را حذف و با یک زنبور پیشرو جایگزین کنید (جواب موجود در حافظه آن‌ها را حذف و یک جواب تصافی تولید و جایگزین آن کنید).

گام ٦. اگر بهترین جوابی که تاکنون یافت شده است در T تکرار متوالی بهبود نیافته است، الگوریتم را خاتمه دهید؛ در غیر این صورت به گام ۲ برگردید.

در این مقاله از ساختاری خاص جهت رمزنگاری و ذخیره هر جواب در حافظه زنبورها استفاده شده است. در این ساختار هر جواب از دو رشته اعداد حقیقی تصادفی تشکیل شده است. رشتهٔ اول مربوط به تأمین‌کنندگان و رشتهٔ دوم مربوط به وسایل نقلیه هستند (شکل ۹). اعداد رشته اول به صورت تصادفی از بازه $(1,N_s+1)$ و اعداد رشته دو به صورت تصادفی از بازه

$(1,N_V+1)$ انتخاب می‌شوند. شماره ستون نشان‌دهنده شماره سفارش است. قسمت صحیح هر عدد در سطر اول (دوم) نشان‌دهنده شماره تأمین‌کننده (وسیله‌نقلیه)ای است که سفارش متناظر، به آن تخصیص یافته است. اعداد اعشار نیز اولویت تولید (حمل) هر سفارش را تعیین می‌کند. به این صورت که هر سفارشی که عدد اعشاری آن کمتر است اولویت بالاتری برای تولید (حمل) خواهد داشت. شکل ۹ یک ساختار برای جواب یک مسأله با ۵ سفارش، ۳ تأمین‌کننده و ۲ وسیله‌نقلیه را نشان می‌دهد. سفارشات ۲ و ۵ به تأمین‌کننده ۱، سفارشات ۳ و ٤ به تأمین‌کننده ۲ و سفارش ۱ به تأمین‌کننده ۳ تخصیص یافته‌اند. اولویت پردازش سفارشات در تأمین‌کننده ۱ به ترتیب با سفارش ۵ و سپس ۲ است. این اولویت در تأمین‌کننده ۲ نیز به ترتیب با سفارش ٤ و سپس ۳ است. رشتهٔ دوم نیز نشان می‌دهد که سفارشات ۱ و ۲ باید توسط وسیله‌نقلیه ۱ و سفارشات ۳، ٤ و ۵ باید توسط وسیله‌نقلیه ۲ حمل شوند.

این ساختار تخصیص سفارشات به تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. به‌منظور محاسبه میزان تابع هدف این جواب از الگوریتم زیر استفاده می‌شود:

گام ۱. زمانبندی سفارشات در مرحله تأمین‌کنندگان را بر اساس تخصیص و اولویت پردازش مشخص شده، زمان پردازش هر سفارش و سرعت تولید تأمین‌کننده مرتبط انجام دهید.

گام ۲. سفارشات را به محموله‌های مختلف وسایل نقلیه به‌صورت زیر اختصاص دهید:

گام ۲-۱. اولویت سفارش‌های اختصاص داده شده به وسیله‌نقلیه مورد نظر را براساس ساختار جواب در نظر بگیرید.

گام ۲-۲. سفارش با اولویت اول را به اولین محموله (B_1) اختصاص دهید.

گام ۲-۳. به همین ترتیب سفارشی که بالاترین اولویت حمل را داشته و هنوز به محموله‌ها تخصیص نیافته است را در نظر بگیرید و آن را به دسته دارای کوچکترین اندیس اختصاص دهید، به‌طوری‌که مجموع ظرفیت اشغالی سفارشات تخصیص داده شده به هر دسته از ظرفیت وسیله‌نقلیه بیشتر نشود. درصورتی‌که اندازه سفارش‌های تخصیص داده شده به هر دسته از ظرفیت ماشین بیشتر می‌شود، دسته جاری را بسته و یک دسته دیگر با اندیس جدید ایجاد کنید.

گام ۳. پس از اتمام دسته‌بندی سفارشات، به زمانبندی حمل سفارشات بپردازید و مقدار تابع هدف متناظر با جواب را محاسبه کنید. زمانبندی تحویل سفارشات هر محموله با توجه به مواردی چون اولویت حمل، زمان تکمیل هر سفارش در مرحله تولید، مکانی که سفارش باید از آنجا حمل شود (تأمین‌کننده مربوطه)، فواصل و سرعت وسیله‌نقلیه مربوطه قابل محاسبه است.

عملگر انتخاب در الگوریتم پیشنهادی از نوع چرخ رولت است. به علاوه جهت ایجاد همسایگی از عملگر جابجایی استفاده شده است. به این صورت که دو مکان به صورت تصادفی از هر دو رشته انتخاب شده و اعداد متناظر با این دو مکان را در هر دو قسمت تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه با یکدیگر تعویض می‌شود. شکل ۱۰ نحوه تولید همسایگی را نشان می‌دهد که در آن دو مکان تصادفی از جواب اولیه انتخاب شده و مقادیر مکان‌های هر دو رشتهٔ مربوط به تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه تعویض می‌گردد. همانگونه که مشخص است در جواب اولیه سفارش ۲ به تأمین کننده ۱ و سفارش ٤ به تأمین کننده ۲ تخصیص یافته‌اند. اما در جواب همسایگی سفارش ۲ به تأمین‌کننده ۲ و سفارش ٤ به تأمین‌کننده ۱ تخصیص یافته‌اند. به علاوه با توجه به بخش اعشار توالی پردازش روی ماشین‌های مربوطه نیز تغییر می‌نماید. همین اتفاق در تخصیص سفارشات به وسایل نقلیه نیز رخ داده است.

	سفارش۱	سفارش۲	سفارش۳	سفارش٤	سفارش۵
تأمین‌کنندگان	۳/۰٤	۱/٦۹	۲/۹۸	۲/۲۳	۱/٤۸
وسایل نقلیه	۱/۱۵	۱/٦۳	۲/۹۹	۲/٦۸	۲/۵

شکل ۹. ساختار رمزنگاری شدهٔ هر جواب

		سفارش۱	سفارش۲	سفارش۳	سفارش٤	سفارش٥
جواب اولیه	تأمین‌کنندگان	۳/۰٤	۱/٦۹	۲/۹۸	۲/۲۳	۱/٤۸
	وسایل نقلیه	۱/۱٥	۱/٦۳	۲/۹۹	۲/٦۸	۲/٥
		سفارش۱	سفارش۲	سفارش۳	سفارش٤	سفارش٥
جواب همسایگی	تأمین‌کنندگان	۳/۰٤	۲/۲۳	۲/۹۸	۱/٦۹	۱/٤۸
	وسایل نقلیه	۱/۱٥	۲,٦۸	۲/۹۹	۱/٦۳	۲/٥

شکل ۱۰. نحوهٔ ایجاد همسایگی

۵. اعتبار سنجی روش حل پیشنهادی

همانگونه که اشاره شد، این مسأله تاکنون در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است. نزدیکترین مسأله در ادبیات موضوع به مسأله مورد بررسی در این تحقیق، مسأله مورد بررسی توسط ذگردی و بهشتی‌نیا[Zegordi and Beheshti Nia, 2009] است. آن‌ها به‌منظور حل مسأله از یک الگوریتم ژنتیک به نام الگوریتم ژتیک پویا[۱۵] استفاده نموده اند که دارای کرومزوم‌هایی با ساختار متغیر است. در این قسمت به‌منظور ارزیابی کیفیت الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک پویای ارائه شده توسط ذگردی و بهشتی‌نیا[۲۰۰۹] برای مسأله مورد بررسی در این تحقیق توسعه داده می‌شود و عملکرد این دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌شود. همچنین نتایج این الگوریتم با جواب بهینه برای چند مسأله با ابعاد کوچک مقایسه می‌شود. ابتدا به تشریح مختصر الگوریتم ژتیک پویا پرداخته می‌شود.

۵-۱ الگوریتم ژنتیک پویا

گام‌های الگوریتم ژنتیک پویا به شرح زیر است:

گام ۱. جمعیت اولیه از کرومزوم‌های تصادفی ایجاد کنید.

گام ۲. عمل تلفیق را توسط عملگر تلفیق یکنواخت پارامتری شده[۱٦] انجام دهید.

گام ۳. عمل جهش را توسط عملگرهای معکوس[۱۷] و تعویض[۱۸] انجام دهید.

گام ٤. اگر بهترین مقدار تابع شایستگی کرومزوم‌ها T نسل متوالی بهبودی نیابد، الگوریتم را خاتمه دهید. درصورتی‌که معیار توقف محقق نشد به گام ۵ بروید.

گام ۵. با استفاده از ترکیب عملگرهای انتخاب نخبه‌گرایی و چرخ رولت، کرومزوم‌ها را برای انتخاب جمعیت بعدی انتخاب کنید. در این حالت ۷۰ درصد از کرومزمهای نسل بعد را با استفاده از عملگر نخبه گرایی و بقیه را با استفاده از عملگر چرخ رولت انتخاب نمایید.

پارامترهای الگوریتم مشابه مقاله ذگردی و بهشتی‌نیا[۲۰۰۹] در نظر گرفته شده‌اند (مقادیر ۱۰۰ برای جمعیت اولیه، ۰,٦ برای نرخ تقاطع، ۰٫۸ برای نرخ جهش، ۱۰ برای T). اگر از ۱۰۰ کرومزم اولیه که فقط یک بار و در نسل اول تولید می‌شود چشم پوشی کنیم، در هر نسل ٦۰ کرومزوم (جواب) جدید با استفاده از عملگر تقاطع و ۸۰ کرومزوم (جواب) جدید با استفاده از عملگر تلفیق ایجاد می‌شوند (در مجموع ۱٤۰ جواب در هر نسل). در الگوریتم زنبور عسل نیز اگر در تکرار اول از n_w جواب تصادفی اولیه چشم پوشی شود، در هر تکرار یک بار به اندازه تعداد زنبور کارگر (n_w) و بار دیگر به اندازه تعداد زنبور تماشاچی (n_v) جواب جدید با استفاده از مکانیزم ایجاد همسایگی به وجود می‌آید. از این‌رو به منظور انجام عادلانه مقایسات مقدار پارامتر n_w برابر ۰٫۸ و مقدار پارامتر n_v برابر ٦۰ در نظر گرفته شده است. مقدار پارامتر T نیز مشابه الگوریتم ژنتیک برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است. پارامتر R نیز به صورت تجربی برابر ۵ در نظر گرفته شده است.

ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک پویا دو بعدی است. بعد عمودی نشان دهنده تأمین کنندگان و وسایل نقلیه، و بعد افقی نشان دهنده سفارشات تخصیص یافته و ترتیب آن‌ها به هر یک از تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه است. برای هر یک از تأمین کنندگان و وسایل نقلیه یک رشته آرایه وجود دارد که

طـول و ترتیـب عناصـر آن نشـان‌دهنـده تعـداد و ترتیـب سفارش‌های تخصیص یافته به آن تأمین‌کننـده یـا وسـیله‌نقلیـه است. اگر تعداد سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان یا وسیله نقلیه کم یا زیاد شود، طول رشتهٔ متناظر نیز کـم یـا زیـاد خواهد شد. به‌عبارت دیگـر بـرخلاف سـاختارهای کروموزوم متداول در الگوریتم ژنتیک که یک بعدی بوده و طول رشـته در آن‌هـا ثابـت اسـت، در الگـوریتم ژنتیـک پیشـنهادی سـاختار کروموزوم دو بعدی بوده و طول رشته ها نیز در آن متغیر است. به‌منظور توضیح بیشتر، فرض کنید ۵ سفارش، ۳ تأمین‌کننـده و ۲ وسیله‌نقلیه داریم. وسیله‌نقلیه ۱ قادر به حمـل دو محمولـه و وسیله نقلیه ۲ قادر به حمـل سـه محمولـه اسـت. فـرض کنیـد تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه و همچنین اولویت پردازش و حمل آن‌ها به‌صورت شکل ۱۱ باشد. آنگـاه ساختار کروموزومی که بیان کنندهٔ تخصـیص شـکل ۱۱ باشـد، به‌صورت نشان داده شده در شکل ۱۲ خواهد بود.

تأمین‌کننده ۱	۱
تأمین‌کننده ۲	۲→۳→۵
تأمین‌کننده ۳	٤
وسیله‌نقلیه ۱	٤→۱→۳→۵
وسیله‌نقلیه ۲	۲

شکل ۱۱. سفارش‌های تخصیص یافته و ترتیب آن‌ها

تأمین‌کننده ۱	۱			
تأمین‌کننده ۲	۲	۳	۵	
تأمین‌کننده ۳	٤			
وسیله‌نقلیه ۱	۵	۳	۱	٤
وسیله‌نقلیه ۲	۲			

شکل ۱۲. ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک پویا

۵-۲ تولید داده‌های تصادفی

اعتبار مقایسـات در صـورتی‌کـه نتـایج بـه دسـت آمـده از دو الگوریتم از حل مسائل متعدد با طیفی متنوع مورد مقایسه قـرار گیرد بیشتر خواهد شد. به طور مثال ممکن است یک الگـوریتم در مسایل با تعداد سفارش کم نتایج خوبی نسبت به الگـوریتم دیگر بدهد، حال آنکه در مسایل با تعداد سـفارش زیـاد نتـایج بدتری بدهد. مسأله مـورد بررسـی دارای پارامترهـای مختلفـی است. برای بررسی بهتر عملکـرد حـالات بهتـر اسـت مسـائل متنوعی با ایجاد مقادیر مختلفی برای پارامترهای آن ایجاد شود. به‌همین منظور سطوحی مانند بالا، پایین و متوسط برای مسأله و به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده است. پارامترها به هفـت دسته تقسیم شده‌اند کـه در سـتون اول جـدول ۱ آمـده اسـت. همچنین سه سطح برای هر پارامتر در نظر گرفتـه شـده کـه در جدول ۱ نشان داده شده است. به‌عنوان مثال، برای پارامتر تعداد سفارش‌ها سه سطح کم، متوسط و زیاد با ارقـام ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. برای پارامتر تعداد تأمین‌کنندگان برای سه سطح بـه ترتیـب توزیـع‌هـای یکنواخـت [۱,۵]، [۵,۱۰] و [۱۰,۱۵] در نظر گرفته شده است. همچنین برای پارامتر تعـداد وسایل نقلیه برای سه سطح کم، متوسط و زیاد به‌ترتیب توزیع-های یکنواخت [۱,۵]، [۵,۱۰] و [۱۰,۱۵] در نظر گرفتـه شـده است. زمان پردازش سفارش‌ها و مسافت‌هـا دارای توزیـع‌هـای یکنواخت [۱,۲۰] و [۲۰,۳۰] به‌ترتیب برای دو سطح کم و بالا می‌باشند و در آخر برای حجم سفارش‌ها و ظرفیت ماشین یک سطح متوسط با توزیع‌های یکنواخت [۱,۵] و [۵,۲۰] در نظـر گرفته شده است. در نتیجه ۱×۱×۲×۲×۳×۳×۳ که برابر بـا ۱۰۸ مسأله تصادفی است، تولید می‌شود. کلیه برنامه‌های کـامپیوتری این مقاله توسـط زبـان برنامـه‌نویسـی Matlab نوشـته شـده و توسط یک پردازنده AMDA4 3400 اجرا گردیده است.

۵-۳ بررسی نتایج محاسباتی

به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم کلونی زنبور عسل پیشـنهادی، تمامی ۱۰۸ مسأله تصادفی ایجاد شده توسط الگـوریتم کلـونی زنبور عسل و الگوریتم ژنتیک پویا حل شده‌اند و نتایج به ازای حالات مختلف در جدول ۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. در این جدول نتایج حاصل از اجرای الگوریتم کلـونی زنبورعسـل پیشنهادی با جواب‌های الگوریتم ژنتیک پویا مقایسـه و کیفیـت الگوریتم پیشنهادی بررسی شده است. این مقایسه هم در حالت کلی و هم به ازای مقادیر خاص برای هر یک از پارامترها انجام شده است. به‌عبارت دیگر این ۱۰۸ مسأله به ازای حـالات هـر پارامتر افراز شده و نتایج به ازای هر حالت بررسی شده‌اند.

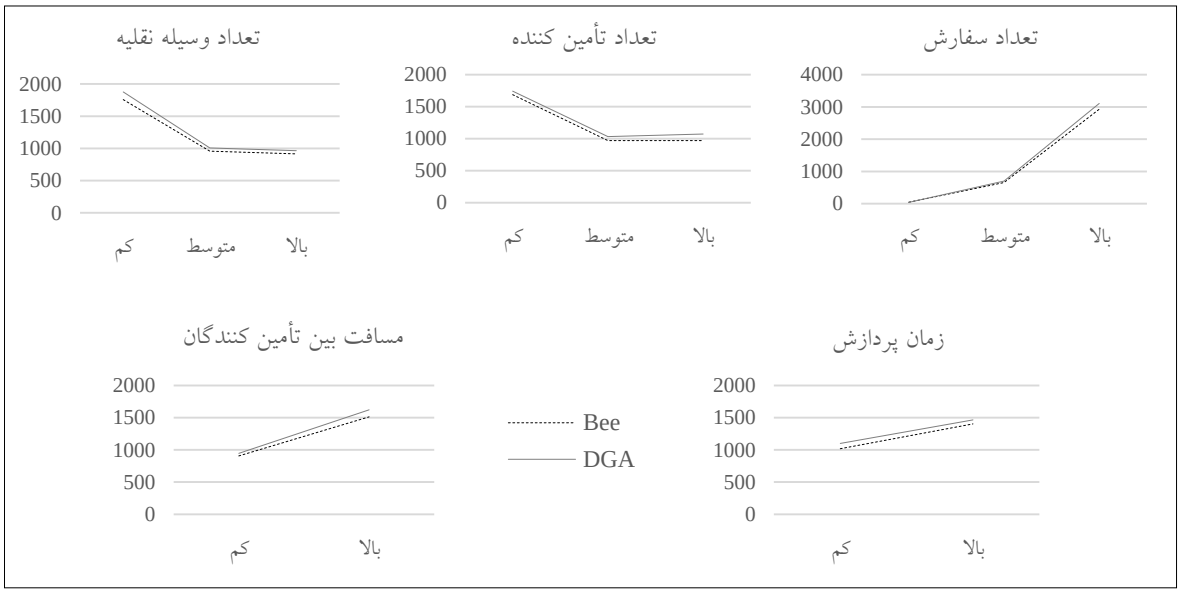
در این جدول، تعداد دفعات برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم مورد مقایسه[19](NBR) ، تعداد دفعاتی که دو الگوریتم جواب یکسان داده‌اند (NER)[20] و همچنین تعداد دفعاتی که الگوریتم پیشنهادی جواب بدتری نسبت به الگوریتم مورد مقایسه داده است (NWR)[21] ، نیز محاسبه شده است. همانطور که در جدول ۲ مشخص است، نتایج نشان می‌دهد که در تمام حالات به جز حالتی که تعداد سفارشات برابر ۱۰ است الگوریتم کلونی زنبور عسل بر الگوریتم ژنتیک برتری دارد. با بررسی نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سفارش‌ها، تابع هدف به‌دست آمده از هر دو روش و همچنین زمان‌های حل افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد تأمین-کنندگان، میانگین جواب‌ها و زمان‌ها برای دو الگوریتم کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد وسایل نقلیه، میانگین جواب‌های دو الگوریتم کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان پردازش سفارش‌ها در تأمین‌کنندگان، میانگین جواب‌های هر دو روش افزایش می‌یابد. با افزایش مسافت‌ها هم، میانگین جواب‌های دو الگوریتم افزایش می‌یابد. نتایج مقایسه این دو الگوریتم برای حل مسأله، نشان از برتری الگوریتم کلونی زنبور عسل پیشنهادی نسبت به الگوریتم ژنتیک پویا در حالت کلی دارد.

جدول ۱. پارامترهای مختلف برای ایجاد جواب تصادفی

	سطح پایین	سطح متوسط	سطح بالا
تعداد سفارشات	۱۰	۵۰	۱۰۰
تعداد تأمین‌کنندگان	U[۱,۵]	U[۵,۱۰]	U[۱۰,۱۵]
تعداد وسایل نقلیه	U[۱,۵]	U[۵,۱۰]	U[۱۰,۱۵]
زمان پردازش سفارشات	U[۱,۲۰]		U[۲۰,۳۰]
مسافت‌ها	U[۱,۲۰]		U[۲۰,۳۰]
حجم سفارشات		U[۱,۵]	
ظرفیت ماشین		U[۵,۲۰]	

جدول ۲. نتایج اجرا و مقایسات الگوریتم‌ها

			میانگین جواب‌های الگوریتم		میانگین زمان‌های الگوریتم				
			Bee	DGA	Bee	DGA	PBR	PWR	PER
تعداد سفارش‌ها	کم	۱۰	٤٤/۲۰۱٤۲	٤۰/٦۷۸٤	۲۵/۳۲٤۸	۲۸/۷۰۵۸۹	۳۳	۳	۰
	متوسط	۵۰	٦۵٤/۹۵۹۵	٦۹۹/٤۳۲۷	۱۱۳/٤٦۱۳	۱۲۷/۳۳۹۸	۳۵	۱	۰
	بالا	۱۰۰	۲۹۲۹/۵٤	۳۱۰۸/۵۹٤	۲۷۸/۹۵۰۱	۳۳۳/۳۲۲۲	۳٦	۰	۰
تعداد تأمین‌کنندگان	کم	U[۱,۵]	۱٦۸۷/۷۱۱	۱۷٤۳/۹٦	۱۵٦/۹۰۹	۱۹۰/۱۸۳۳	۳۵	۱	۰
	متوسط	U[۵,۱۰]	۹۷۱/۱۹۷۹	۱۰۳۱/۹۰٦	۱۳۲/٤٦۲٤	۱۵۰/۵۸۱۹	۳٤	۲	۰
	بالا	U[۱۰,۱۵]	۹٦۹/۷۹۱۹	۱۰۷۲/۸۳۹	۱۲۸/۳٦٤۸	۱٤۸/٦۰۲۷	۳۵	۱	۰
تعداد وسیله‌نقلیه	کم	U[۱,۵]	۱۷۵۸/۱٤	۱۸۷۷/٤٤	۱۵۲/۵۱۷۲	۱۷٤/٦۰۸	۳۵	۱	۰
	متوسط	U[۵,۱۰]	۹۵٦/۱۱۷۳	۱۰۰۷/٦۸۱	۱۳۰/۵۳۲۱	۱۵۲/۵٤۹۵	۳٤	۲	۰
	بالا	U[۱۰,۱۵]	۹۱٤/٤٤۳۲	۹٦۳/۵۸٤۱	۱۳٤/٦۸٦۹	۱٦۲/۲۱۰٤	۳۵	۱	۰
زمان پردازش	کم	U[۱,۲۰]	۱۰۱۷/۵۵۳	۱۱۰۰/۵۷۱	۱٤۱/۹۰۸۷	۱٦۵/۰٤۵٤	۵۲	۲	۰
	بالا	U[۲۰,۳۰]	۱٤۰۱/۵۸۱	۱٤٦۵/۲۲۳	۱۳٦/۵۸۲۱	۱٦۱/۱۹۹۹	۵۲	۲	۰
مسافت بین تأمین‌کنندگان	کم	U[۱,۲۰]	۹۰٦/۷۸٦۸	۹٤۵/۳۱۲۷	۱۳۹/۱۱۵٦	۱٦۸/۰۱۳۳	۵۱	۳	۰
	بالا	U[۲۰,۳۰]	۱۵۱۲/۳٤۷	۱٦۲۰/٤۹۱	۱۳۹/۳۷۵۲	۱۵۸/۲۳۱۹	۵۳	۱	۰
تمام مسائل			۱۲۰۹/۵٦۷	۱۲۸۲/۹۰۲	۱۳۹/۲٤۵٤	۱٦۳/۱۲۲٦	۱۰٤	٤	۰



شکل ۱۳. نمودار مقایسات الگوریتم‌ها

جدول ۳ نتایج حاصل از مقایسه الگوریتم کلونی زنبور عسل با جواب بهینه برای چند مسأله تصادفی با ابعاد کوچک را نشان می‌دهد. جواب بهینه با استفاده از اجرای مدل توسط نرم افزار Lingo 8 به‌دست آمده است. در این جدول هر مسأله با سه عدد نشان داده شده است. عدد اول تعداد سفارشات، عدد دوم تعداد تأمین‌کنندگان و عدد سوم تعداد وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. سایر پارامترهای مسأله بر مبنای توزیع‌های مشخص در مقایسه قبلی ایجاد شده‌اند. در این جدول از شاخصی به نام درصد اختلاف نسبی استفاده شده است که از رابطه (۱۸) محاسبه می شود. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در بیشتر مواقع نتایجی برابر با جواب بهینه داده است و در مواردی که اختلاف وجود دارد، این اختلاف کم است. همچنین زمان حل الگوریتم پیشنهادی خیلی کمتر از زمان حل بهینه است.

درصد اختلاف نسبی= (|جواب بهینه – جواب الگوریتم زنبور عسل|/ جواب بهینه)×۱۰۰ (۱۸)

جدول ۳. مقایسهٔ نتایج الگوریتم کلونی زنبور عسل با جواب بهینه

درصد اختلاف نسبی	الگوریتم کلونی زنبور عسل		جواب بهینه		مشخصات مسأله
	زمان حل(ثانیه)	جواب	زمان حل(ثانیه)	جواب	
۰	۱۳/۵۹	۲۲/۹۹	۲۷/۹۸	۲۲/۹۹	۵×۲×۲
۰	۱۲/۳۹	۲۱/۷۶	۲۵/۸	۲۱/۷۶	۵×۲×۳
۰	۱۱/۱۱	۱۸/۸٤	۲۵/٦۸	۱۸/۸٤	۵×۳×۲
۵/۹۸۷	۱٦/٤۲	۲٦/٤	۳٤/٤۱	۲٤/۳٤	٦×۲×۲
۰	۱٤/۷۲	۲۵/۱۷	۳۱/۸	۲۵/۱۷	٦×۲×۳
۰	۱۳/۵۸	۲۲/۲۵	۳۱/۷۸	۲۲/۲۵	٦×۳×۲
۴/۳۲۸	۲۰/۱۲	۲۹/۸۱	٤۰/۲	۲۸/۰۷	۷×۲×۲
۶/۵۹۸	۱۸/۱۳	۲۸/۵۸	۳۷/۸۹	۲٦/۰۸	۷×۲×۳
۰	۱٦/۷۹	۲۵/٦٦	۳۷/۷۵	۲۵/٦٦	۷×۳×۲
۰	۱۵/٤۳	۲٤/٤۳	۳٤/۷	۲٤/٤۳	۷×۳×۳

٤-۵ تحلیل حساسیت

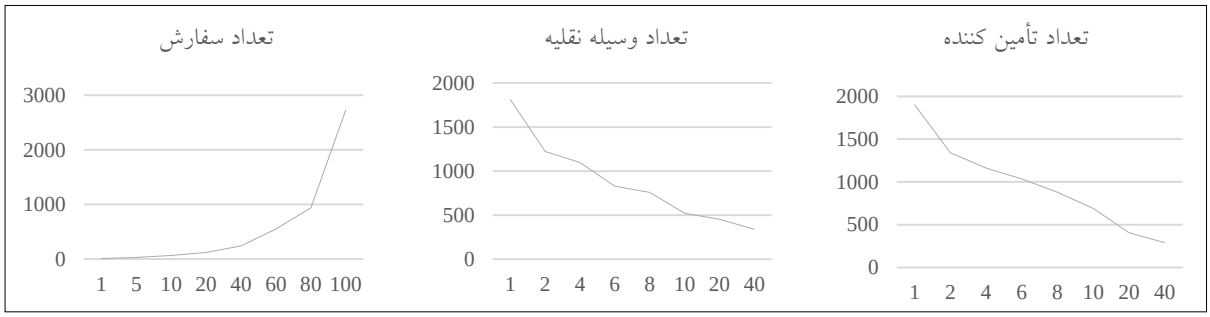
در این بخش به منظور تحلیل بیشتر، به تحلیل حساسیت روی سه پارامتر اصلی پرداخته می‌شود. بدین منظور به بررسی تغییرات مقدار تابع هدف با تغییر مقادیر سه پارامتر اصلی تعداد سفارشات، تعداد تأمین‌کنندگان و تعداد وسایل نقلیه به صورت صعودی، ضمن ثابت نگه داشتن مقدار سایر پارامترها، پرداخته می‌شود. جدول ٤ مقادیر در نظر گرفته شده برای هر پارامتر و نتایج به دست آمده در هر حالت را نشان می‌دهد.

شکل ١٤ نمودارهای تغییر تابع هدف مربوط به تغییرات تعداد سفارش، تعداد وسیله نقلیه و تعداد تأمین‌کننده را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سفارشات میزان تابع هدف نیز افزایش می‌یابد.

جدول ٤. تحلیل حساسیت برای سه پارامتر اصلی

مسأله	سفارش	وسیله نقلیه	تأمین‌کننده	تابع هدف	زمان
۱	۱	۷	۷	۱۰/۵٤٤۷۲	۲۲/۰٦۳۹۸
۲	۵			۳۱/۳٦۲۷٤	۲۷/۷۰۳۲۹
۳	۱۰			٦٤/٤۸۱۹٤	٤۱/۳۸۹٤۳
٤	۲۰			۱۲۱/۵۱۹۷	۵۹/٤٦۱۵۸
۵	٤۰			۲٤۱/۱۸۹۱	۸۵/۱۷۳۳۱
٦	٦۰			۵۵۲/۲٦۰۳	۱۱۸/۵۰۹٤
۷	۸۰			۹۳۹/۷٦۷۲	۱۳۵/۹۵۳۳
۸	۱۰۰			۲۷۳۱/۳۵۹	۲۷۱/٦۹۵۳
مسأله	سفارش	وسیله نقلیه	تأمین‌کننده	تابع هدف	زمان
۱	۵۰	۱	۷	۱۸۱۱/۵٤٦	۱٦۱/۸٤۲۹
۲		۲		۱۲۲۳/٦۳۸	۱٦۰/۵۰۵۲
۳		٤		۱۰۹۸/٦۳	۱٤٤/۹۱۸۲
٤		٦		۸۲۹/۰۷۳۲	۱٤۳/۱۰۹۹
۵		۸		۷۵۸/۹۸۷٦	۱۳۵/۹٦۲۳
٦		۱۰		۵۲۲/۳٦۲٦	۱۳۰/۹۳۸۱

۷		۲۰		٤٥٣/٨٦٠٩	۹۱/۱۸۱٦٤
۸		٤٠		۳٤٠/۲۳۹۸	۲٦/٦٤٥٠۹
مسأله	**سفارش**	**وسیله نقلیه**	**تأمین‌کننده**	**تابع هدف**	**زمان**
۱	۵۰	۷	۱	۱۹۰۲/۲۳٤	۱٤٤/۹۳۱۷
۲			۲	۱۳٤۰/۳٤	۱٤۸/۱۹٤
۳			٤	۱۱٦۱/٦۹۸	۱۳۸/۸۸۰۱
٤			٦	۱۰۳٤/٦۱٦	۱۳۷/٤۸۷۱
۵			۸	۸۷۸/٦٤۸۷	۱۳۱/۷۸۱
٦			۱۰	٦۹۰/۱٦٦	۱۳۲/۰۷۱٤
۷			۲۰	٤۰۸/٤٥٦٤	۱۰۸/۳۸٤۸
۸			٤۰	۲۸۸/۹۷۱۸	۷۷/۱۱۱٦٤



شکل ١٤. نمودارهای تغییرتابع هدف

از آنجایی‌که سفارشات بیشتری، به تعداد ثابتی از تأمین-کنندگان و وسایل نقلیه تخصیص می‌یابد، در نتیجه به‌طور متوسط بارِ کاری تأمین‌کنندگان و وسایل نقلیه افزایش خواهد یافت و زمان تحویل سفارشات طولانی‌تر می‌شود. جهت جلوگیری از افزایش زمان تحویل سفارشات، از نگاه مدیریتی می‌توان با استفاده از سیاست خرید قطعات آماده از بازار، تعداد سفارشات مورد نیاز جهت برنامه‌ریزی را کاهش داده و در نتیجه میانگین زمان‌های تحویل را به مقدار مورد نظر رسانید. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش وسایل نقلیه و تأمین-کنندگان تابع هدف کاهش می‌یابد. زیرا سفارشات مشخصی به وسایل نقلیه و تأمین‌کنندگان مختلفی تخصیص داده شده و به‌طور متوسط بارِ کاری هر یک از آن‌ها کمتر و زمان‌های تحویل کوتاهتر می‌شود. اما زمان حل، همچنان به دلیل افزایش فضای جواب، افزایش می‌یابد. از منظر مدیریتی می توان نتیجه گرفت که جهت جلوگیری از زیاد شدن زمان تحویل سفارشات، می توان تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده یا تأمین-کنندگان طرف قرارداد را افزایش داد. این امر باعث می شود متوسط بارکاری روی هر یک از آن‌ها کاهش یابد و میانگین زمان‌های تحویل سفارشات به مقدار مورد نظر برسد.

٦. خلاصه، نتیجه‌گیری و زمینهٔ تحقیقات آتی

در این مقاله مدلی جدید در مدیریت زنجیره‌تأمین با تلفیق استراتژی‌های مدیریت جامع تولید در تأمین کنندگان، استفاده از ناوگان حمل ونقل مشترک برای انتقال قطعات تولید شده در تأمین کنندگان به شرکت سازنده و یکپارچگی تصمیمات تولید و حمل‌ونقل، مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسأله با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان-های پردازش و حمل سفارش‌ها، ارائه شد. سپس از یک الگوریتم فرابتکاری کلونی زنبورعسل جهت حل مسأله استفاده شد. برای ارزیابی الگوریتم کلونی زنبور عسل نتایج به‌دست آمده از آن با نتایج توسعه الگوریتم ژنتیک پویا که برای نزدیک‌ترین مسأله موجود در ادبیات موضوع به مسأله مورد بررسی ارائه شده بود، مقایسه شد. نتایج حکایت از برتری الگوریتم کلونی زنبور عسل نسبت به الگوریتم مورد مقایسه

دارد. همچین مقایسه نتایج الگوریتم کلونی زنبور عسل با جواب بهینه برای چند مسأله با ابعاد کوچک نشان از عملکرد مناسب این الگوریتم دارد.

در نظر گرفتن استراتژی‌های دیگر در مدیریت زنجیره‌تأمین مورد بررسی مانند استراتژی استفاده از خرید بخشی از سفارشات به‌جای تولید همه آن‌ها در تأمین‌کنندگان (سیاست برون‌سپاری) با درنظرگرفتن هزینه‌های متفاوت جهت تولید و خرید، می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات آتی باشد. افزودن سطح یکپارچگی زنجیره‌تأمین و وارد کردن بخش توزیع و همچنین ارائه روش‌های فراابتکاری دیگر برای حل مسأله می‌تواند به عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.

۷. پی‌نوشتها

1. Supply Chain Management
2. Supplier
3. Vehicle Routing Problem
4. Bee Colony Algorithm
5. on line
6. Work in process
7. Mixed Integer Programming
8. Sequence dependent changeover
9. Multiple intermediate due dates
10. Shelf-life date
11. Disruption
12. Worker Bee
13. Onlooker Bee
14. Scout Bee
15. Dynamic Genetic Algorithm
16. Parametrized uniform
17. Reverse
18. Swap
19. Number of better results
20. Number of equivalent results
21. Number of worse results

۸. مراجع

-Acur, N. and Bititci, U. (2003) "Managing strategy through business processes", Production Planning & Control, Vol. 14**,** No. 4, pp. 309-326.

-Averbakh, I. (2010) "On-line integrated production–distribution scheduling problems with capacitated deliveries", European Journal of Operational Research, Vol. 200**,** No. 2, pp. 377-384.

-Averbakh, I. and Baysan, M. (2013) "Approximation algorithm for the on-line multi-customer two-level supply chain scheduling problem", Operations Research Letters, Vol. 41**,** No. 6, pp. 710-714.

-Bhatnagar, R., Mehta, P. and Chong Teo, C. (2011) "Coordination of planning and scheduling decisions in global supply chains with dual supply modes", International Journal of Production Economics, Vol. 131**,** No. 2, pp. 473-482.

-Bruque-Cámara, S., Moyano-Fuentes, J. and Maqueira-Marín, J. M. (2016) "Supply chain integration through community cloud: Effects on operational performance", Journal of Purchasing and Supply Management, Vol. 22**,** No. 2, pp. 141-153.

-Chandra, P. and Fisher, M. L. (1994) "Coordination of production and distribution planning", European Journal of Operational Research, Vol. 72**,** No. 3, pp. 503-517.

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

-Ehm, J. & Freitag, M. (2016) "The Benefit of Integrating Production and Transport Scheduling", Procedia CIRP, Vol. 41**,** pp. 585-590.

-Han, B., Zhang, W., Lu, X. and Lin, Y. (2015) "On-line supply chain scheduling for single-machine and parallel-machine configurations with a single customer: Minimizing the makespan and delivery cost", European Journal of Operational Research, Vol. 244**,** No. 3, pp. 704-714.

-Han, B. and Zhang, W. J. (2015) "On-line Supply Chain Scheduling Problem with Capacity Limited Vehicles", IFAC-PapersOnLine, Vol. 48**,** No. 3, pp. 1539-1544.

-Kabra, S., Shaik, M. A. and Rathore, A. S. (2013) "Multi-period scheduling of a multi-stage multi-product bio-pharmaceutical process", Computers & Chemical Engineering, Vol. 57**,** pp.95-103.

-Karaboga , D. (2005) "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization". Technical Report, Erciyes University, Kayseri, Turkey.

-Lee, H. L. (2002) "Aligning supply chain strategies with product uncertainties", California Management Review, Vol. 44**,** No. 3, pp. 105-119.

-Liu, S-.C. and Chen, A.-Z. (2012) "Variable neighborhood search for the inventory routing and scheduling problem in a supply chain", Expert Systems with Applications, Vol. 39**,** No. 4, pp. 4149-4159.

-Liu, W., Liang, Z., Ye, Z. and Liu, L. (2016) "The optimal decision of customer order decoupling point for order insertion scheduling in logistics service supply chain", International Journal of Production Economics, Vol. 175**,** pp. 50-60.

-Liu, W., Wang, Q., Mao, Q., Wang, S. and Zhu, D. (2015) "A scheduling model of logistics service supply chain based on the mass customization service and uncertainty of FLSP's operation time", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 83**,** pp. 189-215.

-Mehravaran, Y. and Logendran, R. (2012) "Non-permutation flowshop scheduling in a supply chain with sequence-dependent setup times", International Journal of Production Economics, Vol. 135**,** No. 2, pp. 953-963.

-Muñoz, E., Capón-García, E., Laínez-Aguirre, J. M., Espuña, A. and Puigjaner, L. (2015) "Supply chain planning and scheduling integration using Lagrangian decomposition in a knowledge management environment", Computers & Chemical Engineering, Vol. 72**,** pp. 52-67.

-Osman, H. and Demirli, K. (2012) "Economic lot and delivery scheduling problem for multi-stage supply chains", International Journal of Production Economics, Vol. 136**,** No. 2, pp. 275-286.

-Pei, J., Pardalos, P. M., Liu, X., Fan, W. and Yang, S. (2015) "Serial batching scheduling of deteriorating jobs in a two-stage supply chain to minimize the makespan", European Journal of Operational Research, Vol. 244**,** No. 1, pp. 13-25.

-Pinha, D. C., Ahluwalia, R. S., Carvalho, A. N. and Senna, P. (2015) "Supply Chain Scheduling: A motorcycle assembly case study", IFAC-PapersOnLine, Vol. 48**,** No. 3, pp. 1527-1532.

-Ren, J., Du, D. and Xu, D. (2013) "The complexity of two supply chain scheduling problems", Information Processing Letters, Vol. 113**,** No. 17, pp. 609-612.

-Rostamian Delavar, M., Hajiaghaei-Keshteli, M. and Molla-Alizadeh-Zavardehi, S. (2010) "Genetic algorithms for coordinated scheduling of production and air transportation", Expert Systems with Applications, Vol. 37**,** No. 12, pp. 8255-8266.

-Sawik, T. (2014) "Joint supplier selection and scheduling of customer orders under disruption risks: Single vs. dual sourcing", Omega, Vol. 43**,** pp. 83-95.

-Scholz-Reiter, B., Frazzon, E. M. & Makuschewitz, T. (2010) "Integrating manufacturing and logistic systems along global supply chains", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 2**,** No. 3, pp. 216-223.

-Selvarajah, E. and Zhang, R. (2014) "Supply chain scheduling at the manufacturer to minimize inventory holding and delivery costs", International Journal of Production Economics, Vol. 147, Part A**,** pp. 117-124.

-Shaik, M. A. and Floudas, C. A. (2007) "Improved unit-specific event-based continuous-time model for short-term scheduling of continuous processes: Rigorous treatment of storage requirements", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 46**,** No. 6, pp. 1764-1779.

-Thomas, A., Venkateswaran, J ,.Singh, G. and Krishnamoorthy, M. (2014) "A resource constrained scheduling problem with multiple independent producers and a single linking constraint: A coal supply chain example", European Journal of Operational Research, Vol. 236**,** No. 3, pp. 946-956.

-Ullrich, C. A. (2013) "Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows", European Journal of Operational Research, Vol. 227**,** No. 1, pp. 152-165.

-Yeung, W.-K., Choi, T.-M. & Cheng, T. C. E. (2011) "Supply chain scheduling and coordination with dual delivery modes and inventory storage cost", International Journal of Production Economics, Vol. 132**,** No. 2, pp. 223-229.

-Yimer, A. D. and Demirli, K. (2010) "A genetic approach to two-phase optimization of dynamic supply chain scheduling", Computers & Industrial Engineering, Vol. 58**,** No. 3, pp. 411-422.

-Zegordi, S. H. & Beheshti Nia, M. A. (2009) "Integrating production and transportation scheduling in a two-stage supply chain considering order assignment", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 44**,** No. 9, pp. 928-939.

-Zegordi, S. H. and Marandi, F. (2016) "Integrated production and distribution scheduling in dairy products with improved particle swarm optimization", Quarterly Journal of Transportation Engineering, (*in Persian*).

محمد علی بهشتی نیا، داود فیض، فاطیما سدادی

محمدعلی بهشتی‌نیا درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸٤ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مسیریابی، زنجیره تأمین و الگوریتم‌های فرا ابتکاری بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیاری در گروه صنایع دانشگاه سمنان است.

داود فیض درجه کارشناسی در رشته مدیریت دولتی را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت صنعتی را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مدیریت استراتژیک از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت استراتژیک و بازاریابی بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیاری در گروه مدیریت دانشگاه سمنان است.

فاطیما سدادی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه گیلان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت بازرگانی را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه سمنان اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان زمان‌بندی حمل‌ونقل، MCDM و QFD است.