مهندسی عمران شریف (تابستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۵-۲۳

Original Article

ارزیابی کارایی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی

امیرمسعود رحیمی * **(استادیار)**
فرشاد حمیدی (کارشناس ارشد)
گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

بهینه‌سازی، ابزاری قدرتمند برای کاهش هزینه‌های غیرضروری در مسائل اجرایی است. از آنجایی که مسائل بهینه‌سازی ترکیبی مانند: مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد (TSP) و انواع مسائل مسیریابی وسیله‌ی نقلیه (VRP) از نوع NP-hard هستند، توصیه‌های تخصصی مبتنی بر حل آن‌ها توسط الگوریتم‌های فرااِبتکاری است. در نوشتار حاضر، مطالعه‌یی تفصیلی بر پیشینه‌ی به‌کارگیری الگوریتم کلونی زنبور صورت گرفته است. نتایج مطالعات پیشین، حاکی از توانایی قابل‌توجه الگوریتم مذکور در بهبود پاسخ‌های مسائل مختلف است. در تکمیل موارد بیان‌شده، نتایج مدل‌سازی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی با به‌کارگیری عملگرهای بهبوددهنده برای ارتقاء کارکرد الگوریتم، در قالب ۲ مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد و مسیریابی وسیله‌ی نقلیه توسط نویسندگان نیز تأییدی بر ایده‌ی مطرح شده است. به‌طوری‌که نتایج اجرای الگوریتم بر مسائل نمونه‌ی معتبر، نشان از بهبود در پاسخ‌های ۲ مسئله‌ی مذکور دارد، که این امر گواهی بر تولید پاسخ‌های با کیفیت با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور برای حل مسائل پیچیده و عملکرد موفق آن در قیاس با سایر الگوریتم‌های جمعیت‌محور در بهبود نتایج است.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، کلونی زنبور مصنوعی، مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه.

amrahimi@znu.ac.ir
hamidi@znu.ac.ir

۱. مقدمه

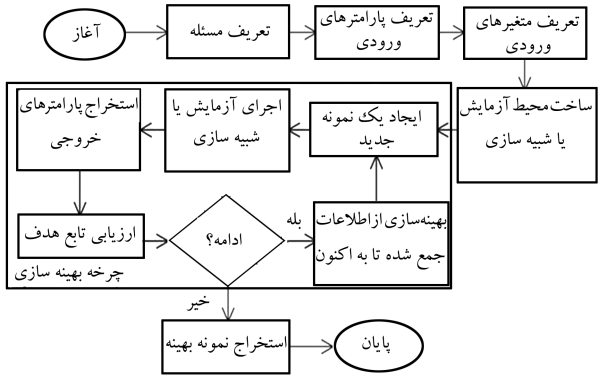
یکی از ابزارهای قدرتمند برای بالابردن کیفیت نتایج هرکاری، مدیریت زمان و کاهش بسیاری از هزینه‌های گزاف و غیرضروری بهینه‌سازی است. در تعریف عمومی، بهینه‌سازی به عمل یا فرایند ساخت بهترین در هر چیزگفته می‌شود. در واقع، هدف در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی، یافتن مقادیر متغیرهایی است که ما را به سوی یک مقدار بهینه از تابع هدف هدایت کند. شکل ۱، فرایند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد که در آن با تعریف متغیرهای ورودی و انجام پروسه‌ی بهینه‌سازی، نمونه‌های خروجی به بهینه‌ترین حالت ممکن قابل استخراج هستند.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی را می‌توان به ۲ دسته‌ی کلی: بهینه‌سازی قطعی، و بهینه‌سازی احتمالی تقسیم کرد. بهینه‌سازی قطعی دلالت بر الگوریتم‌هایی دارد که از یک برنامه‌ریزی محض ریاضی تبعیت می‌کنند و هیچ نوع از المان‌های تصادفی در آن ظاهر نمی‌شوند. این نوع بهینه‌سازی بیشتر در علم ریاضی کاربرد دارد. بهینه‌سازی قطعی خود به ۲ دسته‌ی: بهینه‌سازی با محدودیت، و بهینه‌سازی بدون محدودیت تقسیم می‌شود. در حالت بهینه‌سازی با محدودیت، متغیرهای ورودی، محدودیت و قیودی دارند؛ در صورتی که در بهینه‌سازی بدون محدودیت، همان‌طور که از نام آن نیز پیداست، متغیرهای ورودی هیچ محدودیتی ندارند.[۱]

بهینه‌سازی احتمالی بر الگوریتم‌هایی دلالت دارد که در آن‌ها علائم و نشانه‌های تصادفی‌بودن و احتمال در فرایند جستجو وجود دارد. در بهینه‌سازی احتمالی از متغیرهای تصادفی استفاده می‌شود و این الگوریتم‌ها شامل روش‌هایی با تکرارهای تصادفی برای حل مسئله هستند. الگوریتم‌های ابتکاری به ۳ دسته تقسیم می‌شوند، که عبارت‌اند از: ۱. الگوریتم‌های ابتکاری، ۲. الگوریتم‌های فرا ابتکاری، ۳. الگوریتم‌های فوق ابتکاری.

روش‌های فرا ابتکاری در سطحی بالا و توسعه‌یافته‌تر در قیاس با الگوریتم‌های ابتکاری عمل می‌کنند و گاهی با استفاده از استاتیک‌های فراهم‌شده توسط نمونه‌هایی از فضای جستجو، به طور احتمالی و تصادفی و حتی بر مبنای مدلی از پدیده‌های طبیعی عمل می‌کنند. برخی از الگوریتم‌های فرااِبتکاری، که طی سال‌های اخیر توسعه‌ی فراوانی داشته‌اند، از این قرارند: الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم تبرید حرارتی (SA)، الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS)، الگوریتم شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN)، الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات (PSO)، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه (ACO)، الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)، الگوریتم بهینه‌سازی غذایابی باکتری (BFO)، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (CO) و الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۱/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۹/۳۰، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۱۲.



شکل ۱. شبیه‌سازی کلی از فرایند بهینه‌سازی.

(ABC). بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی به‌دلیل داشتن فضای جستجوی گسسته، مانند مسئله فروشنده‌ی دوره‌گرد (TSP)[1] و مسائل مسیریابی وسیله‌ی نقلیه (VRP) از نوع مسائل NP-hard [2] هستند. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه به گونه‌یی است که در آن خودروی خدمت‌رسان باید با شروع از یک انبار مرکزی به یک مجموعه از مشتری‌ها با نیازهای مشخص و با هزینه‌ی کمینه‌ی ممکن خدمت‌دهی کند. در واقع بر روی چگونگی تخصیص‌دادن یک گروه از وسائط نقلیه برای سرویس‌دهی به یک گروه از مشتری‌ها با تقاضاهای مشخص و با مدنظر قراردادن کمینه‌ی هزینه‌های عملکردی تمرکز دارد. این مسئله به شاخه‌های فراوانی تقسیم می‌شود، که یکی از معروف‌ترین حالات آن، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت ظرفیت (CVRP) است.

یک مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه در حالت کلاسیک، توسط این ۴ فرض اساسی مشخص می‌شود:

۱. آغاز و پایان هر مسیر از دپو است؛

۲. هر مشتری فقط یک بار ملاقات می‌شود؛

۳. تمام تقاضای هر مسیر وسیله‌ی نقلیه نباید از مقدار ظرفیت وسیله‌ی نقلیه بیشتر شود؛

۴. مجموع هزینه‌ی تمامی مسیرهای طی‌شده توسط وسیله‌ی نقلیه باید کمینه شود.

فعالیت مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت ظرفیت می‌تواند به ۲ رده‌ی دیگر تقسیم شود:

۱. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، چندین دپویی با محدودیت ظرفیت (MD-VRP)؛

۲. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با پنجره‌ی زمانی (VRPTW).[۲]

همچنین در مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، تعداد معینی شهر (گره) داریم، که هزینه‌ی رفتن مستقیم مابین این شهرها معین است. حال فروشنده‌یی دوره‌گرد قصد دارد اجناس خود را در تعدادی شهر معین و با مختصات مکانی ثابت به فروش برساند. او باید از محل خود سفر را شروع و از تمام شهرها دقیقاً یک بار عبور کند و به محل اولیه‌اش بازگردد. در این دورها، فروشنده باید شرایط دور همیلتونی، به شرح زیر را در نظر بگیرد:

۱. هر شهر (گره) دقیقاً ۱ بار رؤیت شود؛

۲. پایان و شروع دور باید یک گره‌ی یکسان باشد (دور باید بسته باشد).

بنابراین اگر از روش‌های بهینه‌سازی دقیق در حل این نوع از مسائل استفاده شود، با بزرگ‌شدن اندازه‌ی مسئله، تعداد مراحل حل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. طبیعتاً سیر صعودی منجر به کاهش سرعت محاسبات الگوریتم، کاهش دقت و صحت پاسخ، و افزایش زمان رسیدن به پاسخ نهایی می‌شود. از این رو عملاً رسیدن به جواب مسائل NP-hard با کمک روش‌های دقیق، امری غیرممکن است. نقایص نام‌برده باعث شده است که به‌کارگیری الگوریتم‌های فرابتکاری که ویژگی‌هایی از قبیل: توانایی جستجوی مؤثر فضاهای بسیار بزرگ در زمان کم، عدم نیاز به مشتق تابع هدف، و هزینه‌ی محاسباتی کم، و ریاضیات آسان دارند، بسیار رایج شود. با توجه به فراگیرشدن الگوریتم‌های مذکور، در نوشتار حاضر سعی بر بررسی جامعی از الگوریتم کلونی زنبور در حل VRP و TSP شده است. همچنین نتایج ۲ مورد از مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی نیز بیان شده است.

از جمله کاربردهای روزمره‌ی VRP و TSP می‌توان به کاهش هزینه‌های توزیع محصولات شرکت‌های لبنیاتی، کاهش هزینه‌های توزیع محصولات صنایع غذایی در بین فروشگاه‌ها، کاهش هزینه‌های توزیع و جمع‌آوری کتاب در بین کتابخانه‌های سطح شهر، و کاهش هزینه‌های جمع‌آوری زباله‌های بازیافتی در سطح شهر اشاره کرد، که با داشتن مختصات جغرافیایی گره‌ها و مسیرهای موجود می‌توان نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی را در شرایط واقعی به‌کار برد. لازم به ذکر است نویسندگان نوشتار حاضر پی‌گیری‌های فراوانی جهت دریافت اطلاعات محل توزیع محصولات شرکت‌های شوینده و مواد غذایی به منظور بهینه‌سازی مسیرها پخش کرده‌اند، که متأسفانه شرکت‌های مربوط به دلایل مختلف از دادن اطلاعات و همکاری در این زمینه سر باز زده‌اند.

۲. پیشینه‌ی به‌کارگیری الگوریتم کلونی زنبور

در سال ۲۰۰۱، اولین مطالعه بر روی سیستم زنبور برای ارزیابی ۶ نمونه از TSP در قالب رساله‌ی دکترای لوچیچ انجام شده است، که یکی از اهداف آن به‌کارگیری کاربردهای ممکن از هوش زنبور در حل مشکلات مهندسی ترافیک و حمل‌ونقل بوده و با ارزیابی‌های صورت‌گرفته مشخص شده است که در دنیای حقیقی، تمام زنبورها به‌صورت هم‌زمان شروع به غذایابی نمی‌کنند، ولی در الگوریتم سیستم زنبور پیشنهادی فرض شده است که در آغاز هر تکرار، تمام زنبورها در کندو هستند و تعداد زنبورهای غذایاب [3] در هر مرحله‌ی متوالی در حال افزایش است. همچنین در سیستم زنبور پیشنهادی با افزایش فاصله بین دو شهر، احتمال انتخاب مسیر مربوط توسط زنبور بسیار کم می‌شود. نتایج نشان داده است که سیستم زنبور ارائه‌شده در تمامی نمونه‌هایی که کمتر از ۱۰۰ گره دارند، پاسخ بهینه تولید می‌کند و زمان موردنیاز برای رسیدن به بهترین پاسخ کم خواهد بود.[۳]

همچنین در سال ۲۰۰۵، الگوریتم فرابتکاری بهینه‌سازی کلونی زنبوری پیشنهاد شده است، که تعمیم‌یافته‌یی از سیستم زنبور ارائه‌شده در مطالعه‌ی پیشین، بوده است.[۳] هدف اصلی پژوهش ذکرشده، اکتشاف کاربردهای امکان‌پذیر از هوش زنبورعسل در جمع‌آوری غذا برای حل مسائل ترکیبی با عدم‌قطعیت بوده و متعاقباً سیستم زنبور فازی (FBS) با عواملی که از علل محکم، دقیق، و منطق فازی در روابط خویش استفاده می‌کنند، معرفی شده است. عملکرد الگوریتم سیستم زنبور فازی بر روی مسئله‌ی Ride-Matching با هدف تشکیل مسیرها و برنامه‌ریزی‌ها برای وسائط نقلیه و مسافران، به کمک کمینه‌ساختن تمام مسافت طی‌شده توسط تمام مشارکت‌کننده‌ها، کمینه‌ساختن تمام تأخیرها یا تعدیل بهره‌برداری وسیله‌ی نقلیه مورد آزمون قرار گرفته است. اگرچه هیچ پاسخ تئوری برای قیاس

رویکرد مفروض وجود ندارد، ولی پاسخ‌های اولیه حاکی از رسیدن به هدف مدنظر هستند.[۴]

رویکرد جدید و هوشمندانه‌یی نیز با نام بهینه‌سازی دسته‌ی زنبورها در سال ۲۰۰۵ معرفی شده است، که الهام‌گرفته از رفتار زنبورهای واقعی در طبیعت است. الگوریتم پیشنهادی برای مسئله‌ی تأمین وزنی بیشینه (MAX-W-SAT) بوده است، که می‌توان آن را در درون مجموعه‌یی از شروط وزنی با هر تخصیصی به کار گرفت. عملکرد الگوریتم مذکور با سایر الگوریتم‌های فرابتکاری مقایسه شده است، که نتیجه‌ی آن نشان از برتری الگوریتم پیشنهادی دارد.[۵]

کارابوگا در سال ۲۰۰۷ نیز الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی برای آموزش شبکه‌های عصبی پیش‌تغذیه طراحی شده است. آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی، یک فعالیت بهینه‌سازی با مطلوبیت جستجو و پیداکردن مجموعه‌یی از یک شبکه‌ی عصبی در فرایند آموزشی محسوب می‌شود. الگوریتم‌های سنتی و قدیمی در این زمینه، نقایصی مانند به دام‌افتادن در بهینه‌ی محلی و پیچیدگی‌های محاسباتی دارند. از این رو در پژوهش مذکور، الگوریتم‌های تکاملی برای آموزش شبکه‌های عصبی به‌منظور رفع نقایص نام‌برده استفاده شده است. عملکرد الگوریتم با روش‌های مرسوم منتشرشده و همچنین الگوریتم ژنتیک، که یکی از الگوریتم‌های تکاملی شناخته‌شده است، مورد قیاس قرارگرفته و نتایج محاسبات نشان داده است که الگوریتم ABC طراحی‌شده، توانایی اعمال موفقیت‌آمیز بر مسئله‌ی موردنظر را داشته است.[۶]

در سال ۲۰۰۶، رویکرد بدیعی ارائه شده است که در آن از مدل غذایابی زنبورعسل استفاده شده است. هدف مدل پیشنهادی، حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی برای خرید بوده است. مسئله‌ی برنامه‌ریزی خرید معطوف به یافتن تخصیص متوالی از منابع رقابتی بوده است، که یک تابع هدف به‌خصوص را بهینه می‌کرده است. عملکرد الگوریتم مذکور بر روی ۸۲ مسئله‌ی نمونه از برنامه‌ریزی خرید آزمون و با الگوریتم کلونی مورچه و الگوریتم جستجوی ممنوعه قیاس شده است. نتایج حاصل بیان‌گر آن است که عملکرد الگوریتم جستجوی ممنوعه در زمینه‌ی عنوان‌شده بهتر از دو الگوریتم دیگر و نیز زمان محاسبات به مراتب بهتر بوده است. از سوی دیگر، الگوریتم زنبور کمی بهتر از الگوریتم مورچه عمل کرده و زمان محاسبات برای هر دو مشابه بوده است.[۷]

اندازه‌ی جمعیت زنبورها، یکی از پارامترهای کنترلی در الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی محسوب می‌شوند، به‌طوری که در سال ۲۰۰۸، مطالعاتی بر روی تأثیر این پارامتر در عملکرد الگوریتم انجام شده است. براساس مقایسه‌یی که بر روی بهبود برازش در هر گام از الگوریتم صورت گرفته است، آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش اندازه‌ی جمعیت تا مقدار مشخصی در عملکرد الگوریتم مؤثر است. پیشنهاد آن‌ها استفاده از اندازه‌ی جمعیت ۵۰ تا ۱۰۰ است، که در بازه‌ی مذکور می‌توان به سرعت هم‌گرایی قابل‌قبول و مناسبی برای پاسخ‌ها دست یافت. یکی از دلایل این موضوع آن است که با بررسی تعداد گام‌های الگوریتم مشخص شده است که در یک الگوریتم با اندازه‌ی جمعیت زیاد، نیاز بیشتری به ارزیابی تابع به ازاء هر گام است.[۸]

همچنین یک الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور مصنوعی ارتقاءیافته با نام کلونی زنبور مصنوعی تعاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی عددی در سال ۲۰۰۹ پیشنهاد شده است، که در آن زنبورهای دیده‌بان برای حرکت مستقیم به سوی مختصات مشخص‌شده از سوی زنبور کارگر، طراحی و مقادیر برازش آن در الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی اصلی با کاهش پیچیدگی محاسبات ارزیابی شده است. بنابراین، ظرفیت جستجوی الگوریتم ABC فقط در یک منطقه محدود شده است. همچنین الگوریتم ارتقاءیافته‌ی پیشنهادی، ایده‌ی گرانش سراسری (قانون گرانش نیوتن) و تأثیر آن مابین رفتار زنبورهای کارگر و زنبورهای دیده‌بان را معرفی کرده است. پنج تابع نمونه نیز برای ارزیابی و آزمون الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی و الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی تعاملی با الگوریتم‌های ABC اصلی و PSO از نظر دقت و کیفیت پاسخ‌ها مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل، آشکارکننده‌ی برتری الگوریتم پیشنهادی از لحاظ دقت پاسخ‌ها نسبت به سایر روش‌ها بوده است.[۹]

در سال ۲۰۱۰، برای ساده‌ماندن الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، راه‌حلی تقریباً ساده و آسان برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت ظرفیت اقتباس و فرض شده است که n مشتری توسط m مسیر وسیله‌ی نقلیه ملاقات می‌شوند. راه‌حل ارائه‌شده، حالتی به شکل یک بردار به طول $n+m$ بوده است، که در آن n عددی صحیح بین ۱ تا n و نیز نماینده‌ی مشتری‌ها بوده است. همچنین در پژوهش مذکور، تأثیر پارامتر محدودیت در عملکرد الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی بررسی شده است. ارزیابی‌ها بر روی تمامی نمونه‌های استاندارد نشان داده است که بیشترین نسبت مقدار برای پارامتر محدودیت، متناسب با تعداد مشتری بوده است. نتایج حاصل حاکی از متوسط بهبود ۴٫۱۶٪ در مقادیر میانگین نمونه‌ها و متوسط بهبود ۳٫۵۳٪ در مقادیر بهترین پاسخ‌ها بوده است.[۱۰]

همچنین در سال ۲۰۱۱، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی ترکیبی برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد با تغییراتی در تولید جمعیت اولیه و پارامترهای الگوریتم ارائه و نتیجه شده است که الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، توانایی حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی را نیز دارد.[۱۱]

در سال ۲۰۱۱، نیز یک الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت ظرفیت، تنظیم و در مرحله‌ی تولید پاسخ‌های اولیه در الگوریتم مذکور از روش اپراتور انتخاب مسیر استفاده شده است. در ادامه، برای تولید پاسخ‌های جدید برای زنبورهای کارگر و زنبورهای دیده‌بان از دو عملگر همسایگی استفاده شده است. عملگر همسایگی اول، جهش تبادلی نام داشته و عملگر همسایگی دوم نیز بر مبنای تغییر تصادفی بوده است، که آن را درج جهش نامیده‌اند. نهایتاً الگوریتم ارائه‌شده بر روی ۱۲ نمونه از مسائلی با مقیاس کوچک ارزیابی و نتیجه شده است که الگوریتم مفروض، روشی مناسب برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت ظرفیت است.[۱۲]

در سال ۲۰۱۲ یک الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی گسسته‌ی جدید نیز در سال ۲۰۱۲ برای حل مسئله فروشنده‌ی دوره‌گرد متقارن با استفاده از ایده‌ی عملگر جابه‌جایی ارائه شده است. عملگر مذکور توانایی کمک به زنبورها به‌منظور ساخت مسیرهای منتخب بهتر با کمک انتخاب حریصانه را داشته است. در ارزیابی اولیه‌ی الگوریتم ارائه‌شده، از نمونه‌های BURMA 14 و DANTZIG 42 به‌عنوان نمونه‌های بارز استفاده شده است. همچنین مشخص شده است که تعداد عملگر جابه‌جایی در یک توالی جابه‌جایی در عملکرد الگوریتم ABC گسسته بسیار مهم است، به گونه‌یی که کمترشدن تعداد عملگر جابه‌جایی منجر به بدترشدن پاسخ‌ها و طویل‌شدن بهترین مسیرها می‌شود. عملگر جابه‌جایی باید در مسائلی با اندازه‌ی کوچکِ کمی بیشتر و در مسائلی با اندازه‌ی بزرگ و تقریباً برابر با نیمی از اندازه‌ی مسئله در نظرگرفته شود. در ادامه، برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی به مقایسه‌ی آن با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تراکم ذرات قیاس پرداخته شده و نتایج نشان داده است که هم‌گرایی هر ۳ الگوریتم در ۲ نمونه‌ی ذکرشده به سمت پاسخ بهینه مناسب و نرخ هم‌گرایی در الگوریتم پیشنهادی بالا بوده است.[۱۳]

همچنین در سال ۲۰۱۲، در یک الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، سعی بر بهبود ظرفیت جستجوی سراسری با راهبرد انتخاب رقابتی شده است. در الگوریتم مذکور، زنبورهای کارگر با استفاده از جستجوی همسایگی پاسخ‌های جدید تولید کرده و سپس براساس راهبرد انتخاب رقابتی، احتمال انتخاب منبع غذایی معین و در آخر پاسخ‌های

جدید توسط زنبورهای دیده‌بان ایجاد شده است. ایده‌ی اصلی راهبرد مذکور، انتخاب تصادفی k شخص با مقدار برازش بزرگ‌تر در میان جمعیت بوده است، لذا پارامتر k، اندازه‌ی رقابت نامیده شده است. در ادامه، نیز مقایسه‌ی چندگانه‌یی بین دو شخص در نسل tام انجام شده و شخصی که مزیتی نسبت به دیگری داشته است، امتیاز موردنظر را کسب کرده و این فرایند برای هر شخص دیگر ادامه پیدا کرده است. در انتها، کسی که بیشترین امتیاز را کسب کرده است، وزن بیشتری برای انتخاب داشته است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم (۱۹۸۷)، نشان از توانایی خوب الگوریتم در حل مسائل مسیریابی وسیله‌ی نقلیه در مقیاس بزرگ داشته است.[۱۴]

در سال ۲۰۱۳، نیز یک الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی بهبودیافته برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی دوره‌یی پیشنهاد شده است، که حالت توسعه یافته‌یی از مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی کلاسیک با دوره‌ی زمانی T روزه برای تحویل کالا بوده است. به‌منظور بهبود در عملکرد الگوریتم ABC از ماتریس اطلاعات چندبُعدی اکتشافی برای ارائه‌ی موقعیت مفید و سودمند مابین مشتریان در هر دوره‌ی تحویل کالا و همچنین یک بهینه‌سازی محلی براساس راهبرد تجسس استفاده شده است. از آنجایی که در شیوه‌ی مذکور، هر مشتری اطلاعات اکتشافی به‌خصوصی در هر زمان توزیع و یک زمان توزیع به‌خصوص بوده است، هدف الگوریتم پیشنهادی، یافتن بهترین ترکیب برای توزیع مابین زمان‌های تحویل مختلف بوده است. راهکار پژوهشگران مذکور برای فرار از بهینه‌ی محلی دو مرحله داشته است: مرحله‌ی اول، بهینه‌ی محلی درون مسیر و مرحله‌ی دوم، بهینه‌ی محلی مابین مسیرها بوده است. در انتها، الگوریتم ارائه‌شده بر روی برخی از مسائل مورد ارزیابی قرارگرفته و مشخص شده است که الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی بهبودیافته، ابزار قدرتمندی در حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی پریودیک بوده و راهبرد بهبود، منجر به ارتقاء چشم‌گیری در عملکرد الگوریتم شده است.[۱۵]

همچنین در سال ۲۰۱۴، الگوریتم ABC هیبریدی برای حل شاخه‌یی نوین از VRP با نام مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی دوست‌دار محیط‌زیست (EVRP) ارائه شده است، که در آن تأثیر زیست‌محیطی با محاسبه‌ی مقدار انتشار دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری و در انتها با قیاس نتایج الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم ABC اصلی مشخص شده است که به طور متوسط ۵٪ بهبود در نتایج خروجی ایجاد شده است.[۱۶]

مطالعاتی نیز در سال ۱۳۹۱ شمسی، رحیمی و رمضانی خوانساری، در راستای توسعه‌ی الگوریتم غذایابی کندوی زنبورعسل برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد انجام دادند و با استفاده از اصلاحاتی در الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، نتایج قابل‌قبولی به‌دست آوردند. در الگوریتم پیشنهادی، ابتدا یک زنبور به‌صورت تصادفی از یک گل (نقطه) شروع به حرکت کرده و با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی، به ایجاد کمان‌هایی میان گل‌ها (شهرها) پرداخته است. همچنین برای حرکت زنبورهای کارگر و زنبورهای اکتشاف، محدودیت در نظرگرفته شده است، تا کارایی آن‌ها افزایش یابد. علاوه بر تغییرات ذکرشده، در تولید مسیرها به‌وسیله‌ی زنبورهای اکتشاف با کمک‌گرفتن از الگوریتم 2-opt در شعاع همسایگی نزدیک، بهبود ایجاد شده است. در الگوریتم ارائه‌شده به‌جای استفاده از الگوریتم 2-opt کلاسیک، در انتهای هر دور کامل به بهترین مسیر انتخاب‌شده، الگوریتم 2-opt اصلاح‌شده‌یی به نام 2-opt در شعاع همسایگی نزدیک اعمال شده است.[۱۷] الگوریتم مذکور از همان روش 2-opt استفاده کرده تا مسیر را کوتاه‌تر کند، اما با محدودکردن و بهینه‌ساختن فضای انتخاب کمان‌های کاندید برای تعویض با یکدیگر، زمان جستجو که از معایب روش 2_opt کلاسیک است، کاهش یافته است. اساس روش 2-opt اصلاح‌شده بر پایه‌ی یک مشاهده‌ی تجربی است، که اگر تعویضی بین دو کمان ایجاد شود، که منجر به دورکوتاه‌تری شود، باید دست‌کم طول یک کمان از دو کمان کاندید تعویضی بعد از اعمال 2-opt کاهش پیدا کند. به‌عبارت دیگر، اگر قرار است یک کمان به‌عنوان کمانی برای کاهش طول دور انتخاب شود، باید فقط با کمان‌هایی تعویض شود که طول آن‌ها از کمان مذکور کوتاه‌تر باشد. پس در شعاعی به طول کمان انتخابی، باید به دنبال نقاطی بود که هرگاه کمان مذکور حذف و به آن نقطه وصل شد، حتماً طولش کوتاه‌تر شود.[۱۸]

۳. مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با تحویل و دریافت هم‌زمان کالا

مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با تحویل و دریافت هم‌زمان کالا، یک حالت بسط‌یافته از حالت کلاسیک مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه است، که می‌توان آن را این‌گونه مدل‌سازی کرد: با قراردادن $G = (V, A)$ به عنوان گرافی که در آن $V = \{v_0, v_1, \ldots v_n\}$ مجموعه‌ی بردارو $A = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ مجموعه‌ی کمان است. در ارتباط با A، یک ماتریس مسافت d_{ij} و یک ماتریس زمان سفر t_{ij} وجود دارد. بردار v_0 نشان‌دهنده‌ی دپویی با m وسیله‌نقلیه‌ی همگن است، که به n مشتری سرویس‌دهی می‌کند. هر مشتری، یک مقدار نامنفی جمع‌آوری p_i، یک مقدار نامنفی تحویل q_i، و یک زمان سرویس s_i دارد. همین‌طور هر وسیله‌ی نقلیه، هزینه‌ی ثابت f، هزینه‌ی متغیر در هر واحد مسافت g، ظرفیت Q، و محدودیت زمان سرویس‌دهی D را دارد. متغیرهای تصمیم نیز بدین شرح هستند: x_{ijk} یک متغیر باینری که نشان‌دهنده‌ی آن است که کمان (i, j) توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی k طی شده است، $x_{ijk} = 0$، اگر وسیله‌ی نقلیه‌ی k کمان (i, j) را طی کند، $x_{ijk} = 1$، اگر وسیله‌ی نقلیه k مسیر (i, j) را طی نکند. y_{ijk} بار وسیله‌ی نقلیه‌ی k، در زمانی است که کمان (i, j) را طی می‌کند و δ_{ik} شروع زمان سرویس‌دهی مشتری i توسط وسیله‌ی نقلیه‌ی k است.

حال تابع هدف و محدودیت‌های مسئله‌ی مذکور به این شرح خواهد بود (رابطه‌های ۱ الی ۱۲):

$$\text{Min } Z = f \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} x_{0jk} + g \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{m} d_{ij}\, x_{ijk} \qquad (1)$$

$$Subject\ to \quad \sum_{i=0}^{n} \sum_{k=1}^{m} x_{ijk} = 1 \quad for\ \ 1 \le j \le n \qquad (2)$$

$$\sum_{j=0}^{n} x_{jik} = \sum_{j=1}^{n+1} x_{ijk} \quad for\ \ 1 \le i \le n, 1 \le k \le m \qquad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{0jk} \le 1 \quad for\ \ 1 \le k \le m \qquad (4)$$

$$\delta_{ik} + s_i + t_{ij} - \delta_{jk} \le (1 - x_{ijk})M \quad for\ \ 0 \le i \le n,$$
$$1 \le j \le n+1, 1 \le k \le m \qquad (5)$$

$$\delta_{n+1,k} - \delta_{0k} \le D \quad for\ \ 1 \le k \le m \qquad (6)$$

$$y_{ijk} \le x_{ijk} Q \quad for\ \ 0 \le i \le n, 1 \le j \le n+1, 1 \le k \le m \qquad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{0jk} = \sum_{j=1}^{n} q_j \sum_{i=0}^{n} x_{ijk} \quad for\ \ 1 \le k \le m \qquad (8)$$

$$\sum_{i=0}^{n} y_{ijk} + (p_j - q_j)\sum_{i=0}^{n} x_{ijk} = \sum_{i=1}^{n+1} y_{ijk} \quad for\ 1 \le j \le n,\ 1 \le k \le m \tag{۹}$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad for\ 0 \le i \le n, 1 \le j \le n+1, 1 \le k \le m \tag{۱۰}$$

$$y_{ijk} \ge 0 \quad for\ 0 \le i \le n, 1 \le j \le n+1, 1 \le k \le m \tag{۱۱}$$

$$\delta_{ik} \ge 0 \quad for\ 0 \le i \le n, 1 \le j \le n+1, 1 \le k \le m \tag{۱۲}$$

تابع هدف ۱، نشان می‌دهد که این مدل باید هزینه‌ی مسیریابی که شامل هزینه‌ی ثابت و متغیر حمل و نقل است، را کمینه سازد. رابطه‌های ۲ الی ۴، تخصیص هر مشتری فقط یک مسیر را محدود می‌کند. همچنین نشان می‌دهند که هر مشتری دقیقاً توسط وسیله‌ی نقلیه ملاقات می‌شود. محدودیت ۵، رابطه‌ی بین زمان متغیرها و پارامترهای این مدل را شرح می‌دهند. محدودیت‌های ۶ الی ۹، به‌ترتیب تسهیلات برنامه‌ریزی مطابق با زمان و ملاحظات ظرفیتی را تضمین می‌کنند و محدودیت‌های انتهایی، تحمیل‌کننده‌ی وضعیت‌های ۰ و ۱ بر متغیرهای جریان هستند.[۱۹]

در گزینه‌هایی که یک کمپانی نیاز به بیش از یک انبار دارد، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با دپوی واحد، کارایی مناسبی ندارد. از این رو مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با چندین دپو مطرح می‌شود که در آن بیش از یک دپو برای ذخیره‌سازی محصولات و کالاها مدنظر است. از سایر شاخه‌های VRP می‌توان به مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با دریافت و تحویل هم‌زمان کالا (VRP-SPD)[۴]، مسئله‌ی مسیریابی پریودیک (PVRP)[۵]، مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه‌ی دوست‌دار محیط زیست (GVRP)[۶] اشاره کرد.

۴. الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی یک روش فراابتکاری نوپا در حل مسائل بهینه‌سازی است، که در سال ۲۰۰۵ معرفی شده است، که در آن از رفتارهای هوشمند زنبورعسل در پیداکردن منابع شهد در اطراف کندو الهام گرفته شده است. در واقع، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی یک الگوریتم تکرارشونده است، که با ایجاد یک راه‌حل تصادفی به‌عنوان منبع غذا و تخصیص هر زنبور کارگر[۷] به یک منبع غذایی شروع می‌شود و سپس در طول هر تکرار، هر زنبور کارگر یک منبع غذای نزدیک به منبع غذای تخصیص‌شده (منبع قبلی) را پیدا می‌کند.[۱۰]

هدف کلونی زنبور، تلاش برای یافتن منابع غذایی غنی (پاسخ‌های بهینه) و بیشینه‌ساختن اطلاعاتی در ارتباط با مقدار شهد منبع غذایی مذکور (افزایش برازش پاسخ‌ها) برای اعضاء کندو است. در ساختار کلی، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، ۳ دسته زنبور با فعالیت‌هایی برای تولید پاسخ‌های بهینه دارند. اولین گروه، زنبورهای کارگر هستند که پس از تولید پاسخ‌های اولیه، شروع به فعالیت می‌کنند و وظیفه‌ی آن‌ها یافتن یک منبع غذایی با اصلاح موقعیت آن در حافظه‌ی خویش و ارزیابی مقدار شهد هر منبع غذایی جدید و به حافظه سپردن موردی است که شرایط بهتری از لحاظ میزان شهد نسبت به سایر منابع دارد (انتخاب حریصانه).

در ابتدای شروع فرایند، یک زنبور غذایاب هیچ دانشی در ارتباط با منبع غذایی در فضای جستجو نخواهد داشت، که در این حالت دو گزینه‌ی محتمل برای یک زنبور وجود دارد:

۱. به موجب برخی از محرک‌های درونی یا برخی از سرنخ‌های احتمالی بیرونی، زنبور به طور ناخودآگاه شروع به جستجو برای یک منبع غذایی می‌کند و تبدیل به یک زنبور اکتشاف می‌شود.

۲. براساس پاسخ دریافتی از رقص زنبوری ارائه‌شده توسط سایر زنبورها، شروع به جستجوی یک منبع غذایی می‌کند و تبدیل به یک کارمند تازه می‌شود.[۲۰]

پس از یافتن منبع غذا، زنبور از توانایی ذخیره‌ی موقعیت خویش استفاده و سپس بدون وقفه شروع به بهره‌برداری می‌کند. زنبورهای کارگر، در این مرحله اطلاعات کسب‌شده در ارتباط با کیفیت منابع غذایی که استخراج کرده‌اند را با زنبورهای دیده‌بان[۸] به اشتراک می‌گذارند. زنبورهای دیده‌بان با اطلاعاتی که از فعالیت زنبورهای کارگر اکتساب کرده‌اند، به محاسبه‌ی میزان احتمال منبع غذایی پرداخته و یک پاسخ اصلاح‌شده در منبع غذایی مذکور تولید می‌کنند (انتخاب احتمالاتی) و مجدداً روش انتخاب حریصانه‌ی اعمال‌شده و پاسخ بهتر به حافظه سپرده می‌شود. در دنیای طبیعی، اگر یک منبع غذایی ارزش استخراج نداشته باشد، توسط زنبورهای واقعی رها می‌شود. در الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی نیز اگر پاسخی توانایی بهبود در خلال تعدادی چرخه‌ی از پیش تعیین‌شده با نام محدودیت [۹] را نداشته باشد، تصمیم به ترک چرخه گرفته می‌شود. در این مرحله، زنبورهای کارگر تبدیل به زنبورهای اکتشاف[۱۰] می‌شوند و یک منبع غذایی جدید را جایگزین منبع رهاشده می‌کنند. این مسئله به منظور فرار از به دام‌افتادن در بهینه‌ی محلی انجام می‌شود.

از آنجایی که الگوریتم‌های کلونی زنبور مصنوعی و کلونی زنبور عسل، دارای مبنای مشترک و برگرفته از طبیعت زنبورها هستند، شباهت‌های فراوانی دارند، که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از:

- هر دو رویکرد، ارائه‌دهنده‌ی کلونی‌هایی از مشارکت اشخاص هستند.
- ساختار بنیادی هر دو الگوریتم، اقتباس‌گرفته از گروه‌های دسته‌جمعی موجودات در طبیعت است.

در هر دو مورد، سیستم حاکم بر الگوریتم براساس رفتار غذایابی زنبورها در طبیعت توسعه یافته است.

- رفتار معمول اشخاص در الگوریتم‌ها بر مبنای نقش‌های ساده‌شده‌ی برگرفته از طبیعت و همچنین همکاری میان افراد کلونی در خلال معاوضه‌ی اطلاعات جمع‌آوری‌شده شکل می‌گیرد.
- در هر دو الگوریتم، زنبورها در یک دنیای گسسته زندگی می‌کنند و تبادل اطلاعات از طریق رقص زنبوری انجام می‌شود.

اما برخی از تفاوت‌های اصلی موجود میان این دو الگوریتم بدین شرح است:

- مقدار و نوع به اشتراک‌گذاری اطلاعات در خلال یک تبادل اطلاعات متفاوت است.
- در الگوریتم ABC از ۳ دسته زنبور استفاده می‌شود، که وظایف گوناگونی دارند.
- الگوریتم کلونی زنبورعسل در مبنای هوش ازدحامی مرتبط بر رفتار تصادفی المان‌های آن است.

جدول ۱، شبه کد اصلی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. شبه کد الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی.[۲۱]

Initialization	۱
Evaluation	۲
cycle = ۱	۳
repeat	۴
Employed Bees Phase	۵
Calculate Probabilities for Onlookers	۶
Onlooker Bees Phase	۷
Scout Bees Phase	۸
Memorize the best solution achieved so far	۹
cycle = cycle + ۱	۱۰
until cycle = Maximum Cycle Number	۱۱

۵. به‌کارگیری الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی

۱.۵. اجرای ABC بر روی مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد

در سال ۱۳۹۳ (رحیمی-رمضانی‌خوانساری)، با استفاده از اصلاحاتی در حرکت زنبورهای دیده‌بان و همچنین مقیدساختن زنبورهای کارگر و اکتشاف، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی ارتقاءیافته‌یی برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد ارائه کردند. به دلیل اهمیت بالای مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، جهت حل مسائل آن و ارائه‌ی نتایج، سایتی راه‌اندازی شده است که مورد تأیید پژوهشگران است، از این رو داده‌های اولیه برای تعریف مسئله از این آدرس استخراج شده است:

http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB۹۵/tsp/(۲۰۱۲/۱۰/۰۱).

نتایج به‌دست آمده در حل چند مسئله‌ی معروف، نشان از توانایی الگوریتم مذکور در حل مسئله‌ی TSP با متوسط خطای ۰٫۳۷۱٪ نسبت به پاسخ سایر روش‌ها داشته است. این امر به معنای تأثیر به‌سزای اصلاح الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی با کمک زنبورهای دیده‌بان پیشنهادی و زنبور اکتشاف مقیدشده در بهبود جواب‌های به‌دست آمده است. الگوریتم ارائه‌شده در نرم‌افزار MATLAB کُدنویسی و نتایج حاصل از آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی کاربردی بودن الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با نرم‌افزارهای بهینه‌سازی، هر مسئله با استفاده از نرم‌افزار CPLEX نیز حل و سپس پاسخ‌های به‌دست آمده با نتایج حاصل از الگوریتم زنبورعسل پیشنهادی در جدول ۱ مقایسه شده است.[۲۲]

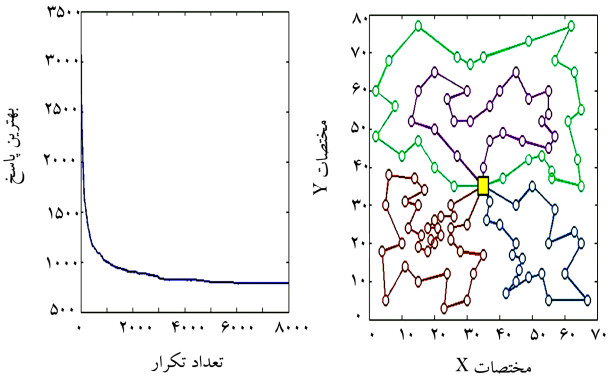
۲.۵. اجرای ABC بر روی مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با دریافت و تحویل هم‌زمان کالا (پژوهش حاضر)

با اعمال برخی تغییرات در راهبردهای الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، از آن به منظور ایجاد سازگاری برای حل VRP-SPD استفاده شده است. در الگوریتم اصلی، تولید پاسخ اولیه به‌صورت تصادفی و در فضای پیوسته رخ می‌دهد، اما در الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه، که از نوع بهینه‌سازی گسسته است، پاسخ‌های اولیه با یک فرایند جایگشتی تصادفی تولید می‌شوند. همچنین رویکرد مورد استفاده برای اعمال محدودیت‌های مسئله‌ی مسیریابی بر تابع هدف، براساس تابع جریمه است. در مرحله‌ی وارد عمل‌شدن زنبورهای کارگر و زنبورهای دیده‌بان، به جای استفاده از معادلات عددی پیوسته، از عملگرهای همسایگی جهت بهبود پاسخ استفاده می‌شود. عملگرهای همسایگی به کارگرفته‌شده با کاهش زمان محاسبات و افزایش سرعت هم‌گرایی پاسخ‌ها منجر به ارتقاء کیفیت الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی می‌شوند. برخی از عملگرهای همسایگی عبارت‌اند از:

- عملگر جابه‌جایی، که از یک اپراتور همسایگی تصادفی تشکیل شده است، تا مشتری‌های تکی را در یک محدوده‌ی تصادفی انتخاب و با مشتری‌های یک محدوده‌ی تصادفی دیگر جابه‌جا کند.
- عملگر معکوس‌سازی، یک دنباله‌ی متوالی از مشتری‌ها با فاصله‌یی تصادفی انتخاب و ترتیب ملاقات مشتری‌های مفروض را جابه‌جا می‌کند. به عبارتی دیگر، موقعیت مشتری‌های i و j به‌صورت اتفاقی انتخاب و سپس ترتیب مشتری‌های مابین آن‌ها بالعکس می‌شود.
- عملگر الحاق (درج)، یک دنباله‌ی پی‌درپی و متوالی از مشتری‌ها را در نظر می‌گیرد و به‌صورت کاملاً تصادفی یکی از مشتری‌ها را انتخاب می‌کند. در ادامه، موقعیت مشتری منتخب تغییر می‌یابد و در موقعیت جدیدی قرار می‌گیرد. تفاوت این عملگر با عملگر جابه‌جایی آن است که در الحاق، فقط یک مشتری انتخاب می‌شود و جایگاه آن در دنباله، انتقال می‌یابد.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی ارتقاءیافته‌ی ارائه‌شده، مسائل نمونه‌ی استاندارد سلهی و نگی (۱۹۹۹)، که شامل ۱۴ مسئله‌ی نمونه در ۲ دسته‌ی X و Y هستند، مورد استفاده قرارگرفته‌اند، که خود از ۷ مسئله‌ی اصلی کریستوفیدز، مینگوتزی و توث (۱۹۷۹)، که برای مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با محدودیت ظرفیت هستند، اقتباس شده‌اند، و شامل ۱۰ مسئله در ۲ دسته‌ی X و Y هستند.

مسائل نمونه‌ی مطرح‌شده شامل ۵۰ تا ۱۹۹ مشتری هستند و تمامی آن‌ها، یک دپوی واحد و ناوگان وسائط نقلیه‌ی همگن دارند. همچنین الگوریتم پیشنهادی در محیط برنامه‌ی MATLAB کُدنویسی شده است. در شکل ۲، تصویر مسیرهای تشکیل‌شده برای مسئله‌ی نمونه‌ی CMT۳X به‌عنوان مثالی از پاسخ‌های حاصل و نیز نمودار برازش پاسخ‌های آن مشاهده می‌شود. الگوریتم کلونی زنبور ارائه‌شده در نمونه‌ی CMT۱X با ۵۰ مشتری و ۳ وسیله‌ی نقلیه به ظرفیت ۱۶۰ واحد با هزینه‌ی کل ۴۶۴٫۸۳ به‌میزان ۰٫۴۱٪ و در نمونه‌ی CMT۳X با ۱۰۰ مشتری و ۵ وسیله‌ی نقلیه به ظرفیت ۲۰۰ واحد با هزینه‌ی کل ۷۱۱٫۵۲ به مقدار ۱٫۳۵٪ نسبت به بهترین پاسخ شناخته‌شده‌ی همه‌ی روش‌ها بهبود ایجاد کرده است. همچنین در ۸ نمونه‌ی دیگر، میزان خطا کمتر از ۴٪ بوده است. در جدول ۳، پاسخ‌های



شکل ۲. گراف مسیرها و نمودار برازش نمونه‌ی CMT۳X.

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج الگوریتم ABC پیشنهادی رحیمی - رمضانی‌خوانساری برای حل TSP.

نام مسئله	بهترین پاسخ همه روش‌ها (B)	جواب نرم‌افزار CPLEX (C)	بهترین پاسخ الگوریتم پیشنهادی (ABC)	درصد خطا $\frac{ABC-B}{B}$	درصد خطا $\frac{ABC-C}{C}$
bayg۲۹	۹۰۷۴٫۱۴۸	۹۰۷۴٫۱۴۸	۹۰۷۴٫۱	۰٫۰۰	۰٫۲۹۸
att۴۸	۳۳۵۲۳٫۷۰۹	۳۳۵۲۳٫۷۰۸۵	۳۳۵۲۳٫۷۰۸۵	۰٫۰۰	۰٫۰۰۰
Eil۵۱	۴۲۶	۴۲۸٫۸۷۱۸	۴۲۸٫۸۷۱۸	۰٫۶۷۴	۰٫۰۰۰
Berlin۵۲	۷۵۴۴	۷۵۴۴٫۳۷	۷۵۴۴٫۳۶۵۹	۰٫۰۰	۰٫۰۰۰
St۷۰	۶۷۵	۶۷۷٫۱۰۹۶	۶۷۷٫۱۰۹۶	۰٫۳۱۳	۰٫۰۰۰
Pr۷۶	۱۰۸۱۵۹	۱۰۸۱۵۹٫۴۳۸۳	۱۰۸۲۸۰٫۴۵۶۶	۰٫۱۱۲	۰٫۱۱۲
Eil۷۶	۵۴۵٫۳۸۸	۵۴۴٫۳۶۹	۵۵۵٫۷۶۸۸	۱٫۹۰۳	۲٫۰۹۴
gr۹۶	۵۱۲٫۳۰۹	۵۱۰٫۸۸۶	۵۱۲٫۶۹۱۲	۰٫۰۷۵	۰٫۳۵۳
Kroa۱۰۰	۲۱۲۸۲	۲۱۲۸۵٫۴۴۳۲	۲۱۳۱۱	۰٫۱۳۶	۰٫۱۲۰
kroaC۱۰۰	۲۰۷۵۰٫۷۶۳	۲۰۷۵۰٫۷۶۲۵	۲۰۸۸۰٫۲۰۱۲	۰٫۶۲۴	۰٫۶۲۴
lin۱۰۵	۱۴۳۸۲٫۹۹۶	۱۴۳۸۲٫۹۹۵۹	۱۴۵۲۹٫۵۶۳۲	۱٫۰۱۹	۱٫۰۱۹
gr۱۲۰	۱۶۶۶۶٫۵۰۹	۱۶۱۰٫۳۰۷	۱۶۴۹٫۳۲۷۸	-۱٫۰۳۱	**۲٫۴۲۳**
ch۱۳۰	۶۱۱۰٫۸۶۱	۶۴۷۲٫۲۸۶	۶۱۹۹٫۴۰۶۲	۱٫۴۴۹	-۴٫۲۱۶
ch۱۵۰	۶۵۲۸	۶۹۱۵٫۹۲۳۳	۶۶۵۹	۲٫۰۰۷	-۳٫۷۱۵
gr۲۰۲	۵۴۹٫۹۹۸	۵۰۲٫۱۰۰۸	۵۱۰٫۱۳۴۷	-۸٫۸۸۴	-۰٫۱۹۲
Tsp۲۲۵	۳۹۱۶	۴۷۷۵٫۳۸۸۶	۴۰۴۴٫۷۲۰۱	۳٫۲۸۷	-۱۵٫۳۰۱
A۲۸۰	۲۵۷۹	۲۸۲۶٫۳۰۷	۲۶۹۷٫۴۷۷۱	۴٫۵۹۴	-۴٫۵۵۸

* اعداد منفی درصد خطای کمتر از صفر و به‌معنی برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به‌جواب مورد مقایسه با آن است.

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج الگوریتم پیشنهادی برای حل VRP-SPD با بهترین پاسخ شناخته‌شده (پژوهش حاضر).

نام مسئله	بهترین پاسخ همه‌ی روش‌ها (B)	بهترین پاسخ الگوریتم پیشنهادی (ABC)	درصد اختلاف $(\frac{ABC-B}{B})$
CMT۱X	۴۶۶٫۷۷	**۴۶۴٫۸۳**	-۰٫۴۱
CMT۱Y	۴۶۶٫۷۷	۴۷۹٫۱۸	۲٫۶۵
CMT۳X	**۷۲۱٫۲۷**	**۷۱۱٫۵۲**	**-۱٫۳۵**
CMT۳Y	۷۲۱٫۲۷	۷۴۵٫۱۶	۳٫۳۱
CMT۵X	۱۰۲۹٫۲۵	۱۰۵۸٫۸۸	۲٫۸۷
CMT۵Y	۱۰۲۹٫۲۵	۱۰۵۸٫۰۳	۲٫۸۰
CMT۱۱X	۸۳۳٫۹۲	۸۶۷٫۴۵	۴٫۰۲
CMT۱۱Y	۸۳۰٫۳۹	۸۴۳٫۹۲	۱٫۶۳
CMT۱۲X	۶۴۴٫۷۰	۶۴۵٫۹۵	۰٫۱۹
CMT۱۲Y	۶۵۹٫۵۲	۶۶۱٫۵۶	۰٫۳۱

* اعداد منفی درصد خطای کمتر از صفر و به‌معنی برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به جواب مورد مقایسه با آن است.

الگوریتم پیشنهادی با بهترین پاسخ‌های شناخته‌شده از همه‌ی الگوریتم‌ها مقایسه شده‌اند. میانگین میزان خطای ۱۰ نمونه‌ی به‌کاررفته برابر با ۱٫۶۰ است، که این مقدار حاکی از عملکرد بسیار مناسب و قابل‌قبول الگوریتم پیشنهادی است. یکی دیگر از شاخص‌های مورد ارزیابی، زمان محاسباتی هر چرخه‌ی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی است. این مقدار برابر با زمان کل محاسبات (از هنگام اجرای الگوریتم تا دست‌یابی به پاسخ بهینه) تقسیم بر تعداد تکرار الگوریتم در نظر گرفته شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که میانگین زمان محاسباتی هر چرخه برای ۱۰ نمونه‌ی مذکور برابر با ۰٫۰۵۱۶ ثانیه است. همچنین در نمونه‌های کوچک (با تعداد مشتری کمتر)، این زمان برابر با ۰٫۰۴۱۲ و بیشترین زمان محاسباتی برای نمونه‌های بزرگ‌تر برابر با ۰٫۰۷۹۷ ثانیه است.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، ابتدا در قالب یک کار مروری به بررسی پیشینه‌ی به‌کارگیری الگوریتم کلونی زنبور در حل مسائل بهینه‌سازی مختلف و همچنین تغییرات اعمال‌شده بر آن جهت ارتقاء به طور جامع پرداخته شده است. با ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از الگوریتم‌های مختلف مشخص شده است که در بیشتر منابع مرورشده، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، کارایی بالا و کیفیتی مناسب در تولید پاسخ‌ها داشته است. برای اثبات این موضوع با مدل‌سازی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی ارتقاءیافته و به‌کارگیری آن برای حل مسئله‌ی TSP مشخص شده است که دو مسئله‌ی نمونه‌ی gr 120 و gr 202، بهبود داشته و پاسخ‌ها نسبت به پاسخ‌های سایر روش‌ها، دارای خطای متوسط ۰٫۳۷۱٪ بوده‌اند. اختلاف کمتر از ۰٫۵٪ پاسخ‌های حاصل‌شده از بهترین جواب‌های شناخته‌شده و همچنین بهبود دو مسئله‌ی نمونه، حاکی از توانایی بالای الگوریتم پیشنهادی است.

همچنین مجدداً به طور جداگانه یک الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه طراحی شده است، که در آن پاسخ‌های اولیه توسط یک جایگشت تصادفی ایجاد و به کمک اپراتورهای همسایگی معکوس‌سازی، جابه‌جایی، و الحاق، پاسخ‌های مناسبی در حل مسئله‌ی مسیریابی وسیله‌ی نقلیه با دریافت و تحویل هم‌زمان کالا تولید شده است.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی، توانایی تولید پاسخ‌های بسیار مناسب و قابل اعتنا برای VRPSPD را دارد، به‌گونه‌یی که با تولید پاسخ‌های جدید برای دو نمونه‌ی استاندارد به میزان ۰٫۴۱٪ و ۱٫۳۵٪ بهبود ایجاد کرده است. همچنین میانگین درصد خطای ۱۰ نمونه‌ی به‌کار رفته از بهترین پاسخ شناخته‌شده برابر با مقدار ۱٫۶۰٪ بوده است.

در انتها به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی یکی از الگوریتم‌های جمعیت‌محور تنومند و کارآمد در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است، که با انجام برخی اصلاحات، برتری‌های چشم‌گیری نسبت سایر الگوریتم‌های فرااِبتکاری خواهد داشت. همچنین این الگوریتم به علت داشتن پارامترهای تنظیم به مراتب کمتر نسبت به سایر الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت، سرعت هم‌گرایی مناسبی در رسیدن به پاسخ‌های بهینه دارد، به طوری که در حل VRP وTSP، سرعت هم‌گرایی یک عامل قابل توجه است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان نوشتار حاضر ضروری می‌دانند از هم‌فکری آقای مهندس احسان رمضانی‌خوانساری (دانشجوی دکتری مهندسی عمران درگرایش راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر) در مراحل انجام پژوهش حاضر، قدردانی و کمال سپاسگزاری خود را ابراز کنند.

پانوشت‌ها

1. traveling salesman problem
2. non-deterministic polynominal hard
3. Foraging Bee
4. vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery
5. periodic vehicle routing problem
6. environmental vehicle routing problem
7. Employed Bee
8. Onlooker Bee
9. Limit
10. Scout Bee

منابع (References)

1. Cavazzuti, M., *Optimization Methods: From Theory to Design*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Chapter 1, pp. 1-3 (2013).
2. Daneshzand, F. "The vehicle-routing problem", *Logistics Operations and Management: Concepts and Models*, **8**, pp. 127-153 (2011).
3. Lucic, P. and Teodorovic', D. "Bee system: Modeling combinatorial optimization transportation engineering problems by swarm intelligence", Preprints of the TRISTAN IV Triennial Symposium on Transportation Analysis, Sao Miguel, Azores Islands, pp. 441-445 (2001).
4. Teodorovic, D. and Dell'Orco, M. "Bee colony optimization-A cooperative learning approach to complex transportation problems", *Advanced OR and AI Methods in Transportation*, pp. 51-60 (2005).
5. Drias, H., Sadeg, S. and Yahi, S. "Cooperative Bees swarm for solving the maximum weighted satisfiability problem", *IWAAN International Work Conference on Artificial and Natural Neural Networks*, Barcelona, Spain, pp. 318-325 (2005).
6. Karaboga, D., Akay, B. and Ozturk, C. "Artificial Bee colony (ABC) optimization algorithm for training feed-forward neural networks", Modeling Decisions for Artificial Intelligence (MDAI), Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 318-329 (2007).

7. Chong, C.S., Low, M.Y.H., Sivakumar, A.I. and Gay, K.L. "A Bee colony optimization algorithm to job shop scheduling", *Proceedings of the 38th Conference on Winter Simulation*, Winter Simulation Conference, pp. 1954-1961 (2006).

8. Karaboga, D. and Basturk, B. "On the performance of artificial Bee colony (ABC) algorithm", *Applied Soft Computing*, **8**(1), pp. 687-697 (2008).

9. TSai, P.W., Pan, J.S., Liao, B.Y. and Chu, S.C. "Enhanced artificial Bee colony optimization", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **5**(12), pp. 5081-5092 (2009).

10. Szeto, W.Y., Yongzhong, W and Sin, C.H. "An artificial Bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem", *European Journal of Operational Research*, **215**(1), pp. 126-135 (2011).

11. Karaboga, D. and Gorkemli, B. "A combinatorial artificial Bee colony algorithm for traveling salesman problem", International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), pp. 50-53 (2011).

12. Brajevic, I. "Artificial Bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem", *Proceedings of the European Computing Conference*, pp. 960-978 (2011).

13. Li, L., Cheng, Y., Tan, L. and Niu, B. "A discrete artificial Bee colony algorithm for TSP problem", *Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Computing (ICIC): Bio-inspired computing and applications, Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg, pp. 566-573 (2012).

14. Shi, Y.J., Meng, F.W. and Shen, G.I. "A modified artificial Bee colony algorithm for vehicle routing problems with time windows", *Information Technology Journal*, **11**(10), pp. 1490-1495 (2012).

15. Yao, B., Hu, P., Zhang, M. and Wang, S. "Artificial Bee colony algorithm with scanning strategy for the periodic vehicle routing problem", *Simulation*, **89**(6), pp. 762-770 (2013).

16. Zhang, S., Lee, C.K.M., Choy, K.L., Ho, W. and Ip, W.H. "Design and development of a hybrid artificial Bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **31**, pp. 85-99 (2014).

17. Rahimi, A.M. and Ramezani Khansari, E. "Optimization vehicle routing problem by using artificial Bee colony algorithm", MSc. Thesis, Dep. of Civil Engineering, Imam Khomeini International University (2012).

18. Wong, L.P. and Chong, C.S. "An effcient Bee colony optimization algorithm for traveling salesman problem using frequency-based pruning", *7th International Conference on Industrial Informatics (IEEE)*, **9**, pp. 775-782 (2009).

19. Ai, T.J. and Kachitvichyanukul, V. "A prticle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery", *Computer & Operation Research*, **36**(5), pp. 1693-1702 (2009).

20. Lucic, P. "Modeling transportation problems using concepts of swarm intelligence and soft computing", Ph.D. Dissertation, Dep. of Civil Engineering, State Univ. Virginia (2002).

21. Karaboga, D. and Akay, B. "A modified artificial Bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems", *Applied Soft Computing*, **11**(3), pp. 3021-3031 (2011).

22. Rahimi, A.M. and Ramezani Khansari, E. "Bee hive's foraging algorithm for vehicle routing problem", *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, **6**, pp.47-58 (2015).