نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال هشتم، شماره هفدهم، پاییز و زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۲۹۵-۳۰۹
www.ier.basu.ac.ir

ISSN: 2345-2269

DOI: 10.22084/ier.2021.22227.1978

زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با منابع دوگانه‌ی محدود و اهداف لکزیکوگراف

قاسم مختاری[1*]، مینا ابوالفتحی[2]

۱. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
۲. کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۳۹۸/۳/۸
پذیرش ۱۳۹۸/۷/۱۱
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع دوگانه
الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی
حداکثر طول انجام کارها
مجموع موزون تأخیرها

خلاصه

در این تحقیق، مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع دوگانه در نظر گرفته شده است. مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر، حالت گسترده‌تری از مسائل زمان‌بندی تولید کارگاهی کلاسیک است و هر عملیات می‌تواند توسط چند ماشین پردازش شود. در زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع دوگانه، علاوه بر تخصیص ماشین به هر عملیات و تعیین توالی عملیات بر روی ماشین‌ها، لازم است تخصیص کارگر به عملیات را نیز مشخص کنیم. دو هدف حداقل‌سازی مجموع موزون تأخیرها و حداکثر زمان تکمیل کارها به‌صورت لکزیکوگراف مورد بررسی قرار گرفته است که مجموع موزون تأخیرها، اولویت اول است. با توجه به NP-Hard بودن این مسئله، یک الگوریتم ترکیبی کلونی زنبور عسل مصنوعی با عملگرهای الگوریتم ژنتیک و چندین الگوریتم ابتکاری، ارائه می‌شود. به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد الگوریتم ارائه شده، مطالعات محاسباتی با در نظر گرفتن مسائل نمونه، انجام شده و با نتایج نرم‌افزار GAMS مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، روشی مؤثر برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع دوگانه است.

۱. مقدمه

زمان‌بندی تولید کارگاهی[1] یکی از مسائل مهم در حوزه مدیریت تولید و بهینه‌سازی ترکیبی است. در این مسئله n کار و m ماشین وجود دارد که پردازش هر کار i شامل n_i عملیات است و باید روی ماشین‌ها پردازش شوند. هدف این مسئله پیدا کردن مناسب‌ترین توالی عملیات روی ماشین‌ها برای بهینه کردن یک یا چند معیار عملکرد است. حداکثر زمان تکمیل کارها[2]، زمان مورد نیاز برای تکمیل همه کارها است و یکی از معیارهای عملکرد متداول برای زمان‌بندی تولید کارگاهی است.

مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر[3] تعمیمی از مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی و پیچیده‌تر از آن است. این مسئله، تقریبی نزدیک‌تر برای روبرو شدن با سیستم تولید واقعی است که معمولاً پردازش یک عملیات روی چندین ماشین از مجموعه ماشین‌ها امکان‌پذیر است. مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر شامل دو زیر مسئله‌ی تخصیص هر عملیات به یک ماشین از بین ماشین‌های مستعد و تعیین توالی عملیات تخصیص یافته به ماشین‌ها است [۱].

در مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر، تنها منبع در نظر گرفته شده، ماشین‌ها بودند که برای اجرای کار مستقر می‌شدند و منابع انسانی، کامل و بدون محدودیت در نظر گرفته می‌شدند؛ اگر چه در دنیای واقعی پر هزینه و محدود هستند [۲]. در برخی از سیستم‌های تولید، نیروهای انسانی محدود هستند و بین ایستگاه‌های کاری برای پردازش کارها جابجا می‌شوند. هدف مسئله‌ی زمان‌بندی

* نویسنده مسئول: قاسم مختاری
تلفن: ۰۲۵-۳۲۱۰۳۵۲۰؛ پست الکترونیکی: g.mokhtari@qom.ac.ir

1. Job-Shop Scheduling Problem
2. makespan
3. Flexible Job-Shop Scheduling Problem

تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با دو منبع محدود[1]، تخصیص هر عملیات به یک ماشین از بین ماشین‌های مستعد، تعیین یک کارگر از بین مجموعه کارگران ماهر برای پردازش عملیات بر روی ماشین انتخاب شده، و تعیین توالی عملیات بر روی ماشین‌ها با در نظر گرفتن نیروهای انسانی است [۱].

زمان‌بندی در صنعت اهداف مختلفی دارد و محققین نیز توابع هدف متنوعی همانند حداقل‌سازی زمان اتمام کارها، میانگین و کل تأخیر[2] و غیره را برای مسائل زمان‌بندی تولید در نظر می‌گیرند. در این بین معیار حداکثر زمان انجام کارها بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، دو هدف برای مسئله‌ی زمان‌بندی در نظر گرفته شده است: کمینه‌سازی تأخیر کارها و کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها. تابع هدف‌ها به صورت لکزیکوگراف[3] در نظر گرفته شده‌اند.

در مقاله گنزالیز و ساهنی [۳] NP-hard بودن مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی به اثبات رسیده است. وقتی انعطاف‌پذیری در انتخاب ماشین‌ها به مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی افزوده شود، مسئله‌ی سخت‌تری ایجاد می‌شود که آن نیز NP-hard خواهد بود. با اضافه شدن منبع دوم (نیروی انسانی) به مسئله، باز هم پیچیدگی مسئله افزایش خواهد یافت. در نتیجه روش‌های دقیق حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی، عملکرد مناسبی در حل این مسئله ندارند. تعداد کمی از این روش‌ها نیز که در ادبیات موضوع به چشم می‌خورند، تنها مسائل با اندازه‌های بسیارکوچک را مورد بررسی قرار داده‌اند. در نتیجه در طول پنجاه سال گذشته، محققین الگوریتم‌ها و روش‌های ابتکاری زیادی را جهت حل این گونه مسائل در اندازه‌های متوسط و بزرگ ارائه داده‌اند.

مسئله‌ی زمان‌بندی تک-ماشین با هدف حداقل نمودن تأخیر کل، مسئله‌ای NP-hard است [۴]. وقتی آنرا در چندین مرحله، تعمیم دهیم و مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی، زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر، و زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با دو منبع محدود را تعریف کنیم؛ فضای جواب مسئله در هر تعمیم، بزرگ‌تر می‌شود. بنابراین فضای جواب‌های مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با دو منبع محدود، برای مسائلی با ابعاد متوسط و بزرگ، فوق‌العاده وسیع خواهد بود. الگوریتم‌های فراابتکاری به تنهایی نمی‌توانند عملکرد مناسبی در حل این مسئله داشته باشند. وقتی می‌خواهید در یک انبار بزرگ کاه، یک سوزن را جستجو کنید، الگوریتم‌های فراابتکاری نیز نمی‌توانند معجزه کنند. لذا در این تحقیق، تلاش بسیاری صورت گرفت تا ترکیبی مناسب از الگوریتم‌های فراابتکاری و ابتکاری ارائه شود تا بتواند عملکرد قابل قبولی داشته باشد. این مقاله، هم یک مسئله با مفروضات جدید را مورد توجه قرار داده است و هم این که برای آن مسئله، الگوریتم مناسبی ارائه کرده است. در الگوریتم ارائه شده، چندین الگوریتم ابتکاری جدید یا تعمیم یافته از سایر الگوریتم‌ها وجود دارد.

در ادامه مقاله، در بخش دوم، مرور ادبیات موضوع ارائه می‌گردد. سپس در بخش سوم به بیان مسئله پرداخته می‌شود. در بخش چهارم، یک الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، ترکیب شده با عملگرهای الگوریتم ژنتیک[4] و الگوریتم‌های ابتکاری، برای حل مسئله ارائه شده است. بخش‌های پنجم و ششم به تنظیم پارامترها و نتایج محاسباتی، اختصاص یافته و در نهایت در بخش هفتم، نتیجه‌گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی آورده شده است.

۲. مرور ادبیات

مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی اولین بار توسط براکر مطرح شد [۵]. پس از آن مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر، اولین بار توسط براکر و اسچلای مطرح شد [۶]. آنها یک الگوریتم چند وجهی برای حل مسئله کارگاهی انعطاف‌پذیر با دو کار را ارائه کردند و هم‌چنین برای حل موارد واقعی با بیشتر از دو کار، دو نوع نگرش سلسله مراتبی و یکپارچه را بیان نمودند. کار کارگاهی منعطف، یکی از فراگیرترین سیستم‌های تولید قطعات متنوع است که تعمیم یافته‌ی دو سیستم کلاسیک تولید کارگاهی و کارگاه ماشین‌های موازی است. این سیستم تولیدی شامل چند ایستگاه کاری است که در هر مرحله، یک یا چند ماشین موازی وجود دارد. مقالات بسیاری برای حل مسئله‌ی کارگاهی انعطاف‌پذیر با تابع اهداف گوناگون منتشر شده است. اغلب این مطالعات، الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری، و ترکیبی ارائه کرده‌اند. به عنوان نمونه، شهسواری پور و قاسمی شبانکار یک الگوریتم ترکیبی جدید از الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبریدی و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر چند هدفه ارائه دادند [۷]. سوبیکو و مانچ ترکیبی از الگوریتم ابتکاری انتقال گلوگاه، رویکردهای جستجوی محلی و جستجوی همسایگی متغیر را برای مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با تابع هدف حداقل کردن مجموع موزون تأخیرها را مطرح کردند [۸]. رویانی و دفرشا مسئله‌ی زمان‌بندی انعطاف‌پذیر را با در نظر گرفتن تابع هدف کمینه‌سازی حداکثر طول انجام کارها مطرح کردند و آن را با الگوریتم ژنتیک دو مرحله‌ای حل نمودند [۹]. فخرزاد و علی‌نژاد اثر یادگیری اپراتور بر زمان پردازش‌ها را نیز در نظر گرفتند و برای حل مدل ارائه شده، یک الگوریتم ژنتیک چند مرحله‌ای ارائه دادند [۱۰].

سیستم‌های محدود به دو منبع، پیچیده‌تر از تک منبعی هستند و با چالش‌های فنی بیشتری که در زمان برنامه‌ریزی منابع باید به آن‌ها توجه شود، روبرو می‌شوند. اولین مطالعه بر روی محدودیت دو منبعی توسط نلسون در سال ۱۹۶۷ انجام شده است [۱۱]. به عنوان نمونه‌هایی از تحقیقات این حوزه، جیبر و نیومن تأثیرات خستگی انسان و بازیابی در عملکرد سیستم دو منبع محدود را بررسی کردند [۱۲]. لی و همکاران یک الگوریتم ترکیبی کلونی مورچگان[5] را برای تخصیص

1. Dual Resource Constrained Flexible Job-Shop Scheduling Problem
2. Total tardiness
3. lexicograph
4. Genetic Algorithm
5. Hybrid Ant Colony and Simulated Annealing

کارآمد ماشین‌ها و کارگران برای بهینه‌سازی معیارهای عملکرد مانند طول انجام کارها طراحی کردند [۱۳]. لوبو و همکاران یک حد پایین[1] برای مسائل زمان‌بندی تولید کارگاهی با دو منبع محدود با هدف کاهش حداکثر تأخیر کارها ارائه دادند [۱۴].

ادبیات موجود در حوزه زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دو منبع، بسیار محدود است. یزدانی و همکاران یک مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با دو منبع محدود را با هدف حداقل کردن طول انجام کارها مطالعه دادند. آن‌ها دو الگوریتم فراابتکاری با نام‌های آنیل شبیه‌سازی شده[2] و بهینه‌سازی ارتعاش میرا[3] و هم‌چنین یک مدل عدد صحیح مختلط را برای حل مسئله‌ی خود ارائه نمودند [۱]. گئو و پان یک مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت چند منبع را با هدف حداقل کردن طول انجام تمام کارها در نظر گرفتند. در این تحقیق منابع اضافی مورد نیاز برای پردازش ماشین‌ها مانند نیروی انسانی، ابزار، تجهیزات نگهداری، و لوازم نیز محدود در نظر گرفته شده است [۲]. لی و گوا یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر را برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دو منبع مطرح کردند. در این مطالعه، چهار همسایگی برای تولید جواب جدید بکار گرفته می‌شود [۱۵]. لیو و همکاران برای مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی منعطف با هر دو محدودیت ماشین و نیروی انسانی، الگوریتم ترکیبی ژنتیک را برای تولید جواب‌های پارتو ارائه نمودند و دو هدف طول انجام کارها و هزینه‌های تولید را برای این مسئله در نظر گرفتند [۱۶]. لانگ و لی الگوریتم ترکیبی تکنولوژی شبیه‌سازی خاکستری[4] و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب[5] برای حل یک مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با دو منبع محدود ارائه دادند و در این تحقیق چند معیار شامل رضایت تحویل، هزینه، مصرف انرژی و آلودگی صوتی به عنوان اهداف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است [۱۷]. ژان‌ژو و ژنه الگوریتمی برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی منعطف با دو منبع محدود بیان کردند که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم سیستم ایمنی[6] است [۱۸].

در بسیاری از مطالعات در حوزه زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر همچون [۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲] تنها هدف موجود، حداقل کردن حداکثر طول انجام کارها است که محققان به آن پرداختند. اما مسئله این است که بسیاری از کاربردهای واقعی، نیاز به در نظر گرفتن چندین دیدگاه متضاد مربوط به اهداف چندگانه است و این یکی از دلایلی است که باعث می‌شود تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در دهه‌های اخیر رشد پیدا کند [۲۳]. در برخی از سیستم‌ها در نظر گرفتن هر دو هدف طول انجام کارها و مجموع موزون تأخیرها برای زمان‌بندی ضروری است. مطالعاتی در حوزه زمان‌بندی عملیات وجود دارد که این دو هدف را در نظر گرفته‌اند. باقری و زندیه یک مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با زمان راه‌اندازی وابسته به توالی با در نظر گرفتن هر دو هدف حداکثر زمان طول انجام کارها و میانگین تأخیرها را مطالعه دادند. آنها برای حل مسئله، یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر را به کار بردند [۲۴]. هانگ و یو مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی با تقسیم انباشته[7] را با چند معیار حداقل کردن حداکثر طول انجام کارها، مجموع تأخیرها و هزینه‌های تقسیم انباشته در نظر گرفتند. آنها یک تابع هدف که شامل مجموع موزون معیارهای ذکر شده است و هم‌چنین الگوریتم کلونی مورچگان[8] را برای حل مسئله در نظر گرفتند [۲۵]. ژنگ و وانگ مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر را با درنظر گرفتن همپوشانی مجاز در حین عملیات مدل‌سازی نمودند. از آنجایی که همپوشانی هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد بنابراین آنها حداکثر طول انجام کارها و هزینه‌های ناشی از همپوشانی را به عنوان تابع هدف در نظر می‌گیرند و با توجه به دو هدفه بودن مسئله رویکرد پارتو را برای حل به کار گرفتند [۲۶].

اگرچه رویکرد پارتو در بیشتر مقالات برای بهینه‌سازی چند معیاره استفاده می‌شود؛ اما بهترین رویکرد نیست چرا که تصمیم‌گیری بر اساس مجموعه‌ای از جواب‌ها در بسیاری از مسائل چاره‌ساز نیست [۲۷]. رویکرد لکزیکوگراف از روش‌های متداول برخورد با اهداف متناقض است که به تصمیم گیرنده اجازه می‌دهد جوابی که بر اساس اهداف اولویت‌بندی شده به‌دست آمده را در اختیار داشته باشد. منداو و دلاکروز یک الگوریتم اساسی برای جستجوی گراف با اهداف لکزیکوگراف ارائه دادند [۲۸]. در مطالعات [۲۹] و [۳۰] رویکرد لکزیکوگراف برای اهداف تعیین شده مسائل زمان‌بندی به‌کار گرفته شده است. دوئیب و همکاران مسئله‌ی برنامه‌ریزی جریان کارگاهی را با هدف حداقل کردن دو معیار تعداد کارهای به تأخیر افتاده و حداکثر طول انجام کارها با رویکرد لکزیکوگراف بررسی نمودند [۲۹]. پلاسیوس و همکاران یک مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی چند هدفه با زمان پردازش قطعی و زمان‌های تحویل منعطف را با رویکرد لکزیکوگراف برای بهینه‌سازی دو هدف طول انجام کارها و رضایت موعد تحویل[9] بررسی نمودند و برای حل مسئله، الگوریتم پراکندگی ذرات را به کار گرفتند [۳۱].

یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری به کار رفته برای حل مسائل زمان‌بندی، الگوریتم کلونی زنبور عسل است. لی و همکاران پس از ارائه مدلی برای حل مسئله زمان‌بندی کارگاهی با هدف حداقل کردن حداکثر طول انجام کارها، الگوریتم کلونی زنبور عسل ترکیبی (HABC)[10] را بر اساس جستجوی تابو برای حل مدل توسعه داده‌اند [۳۲]. گائو و همکاران به مطالعه یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی پرداختند که هدف تحقیق، مدلسازی مؤثر برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید

1. Lower bound
2. Simulated Annealing
3. Vibration Damping Optimization
4. Grey Simulation
5. Non-Dominated Sorting Genetic
6. Immune
7. Lot splitting
8. Ant Colony Optimization
9. Due-date satisfaction
10. Hybrid Artificial Bee Colony

مجدد است. مسئله‌ی مدلسازی مسئله‌ی کارگاهی انعطاف‌پذیر است و به دو مرحله تقسیم می‌شود: برنامه‌ریزی و برنامه‌ریزی مجدد زمانی که کار جدید وارد می‌شود. الگوریتم دو مرحله‌ای کلونی زنبور عسل مصنوعی (TABC)[1] برای برنامه‌ریزی و برنامه‌ریزی مجدد با قرار دادن کار(های) جدید پیشنهاد شده است [۳۳]. لی و همکاران یک الگوریتم جدید کلونی زنبور عسل (DABC)[2] را برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی چند هدفه انعطاف پذیر کارگاهی با فعالیت‌های تعمیر و نگهداری ارائه می‌دهد. معیارهای عملکرد، حداکثر زمان اتمام کل کارها، حجم کار ماشین‌آلات و حجم کار ماشین بحرانی در نظر گرفته شده است [۳۴]. لی و همکاران یک الگوریتم ترکیبی کلونی زنبور عسل مصنوعی مبتنی بر پارتو را برای حل یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی کارگاهی انعطاف‌پذیر چند هدفه پیشنهاد دادند [۱۹]. تامانو و فوآنگ یک الگوریتم ترکیبی کلونی زنبور عسل برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی کارگاهی انعطاف‌پذیر با معیارهای به حداقل رساندن حداکثر زمان تکمیل کارها ارائه دادند. در الگوریتم پیشنهادی، ابتدا چندین قاعده توزیع و الگوریتم جستجوی هارمونی در ایجاد جواب‌های اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۵].

جدول ۱ خلاصه‌ی تحقیقات موجود، و هم‌چنین تفاوت این تحقیق با مطالعات پیشین را نشان می‌دهد. در مقایسه با گستردگی تحقیقات صورت گرفته درباره مسائل زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر، تحقیقات کمتری در حالت دو منبع، انجام شده است. در اغلب تحقیقاتی که برای دو منبع انجام شده‌اند، حداکثر مدت انجام کارها به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. فقط دو مقاله لانگ و لی [۱۷]، و لیو و همکاران [۱۶]، اهداف دیگری را بررسی کرده‌اند. مسئله زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر با دو منبع محدود، تاکنون با دو تابع هدف مجموع وزنی تأخیرها و حداکثر مدت انجام کارها، مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین تحقیقات کمی وجود دارد که رویکرد لکزیکوگراف را برای مواجهه با مسائل چند هدفه زمان‌بندی به کار برده باشند؛ در حالی که رویکرد لکزیکوگراف، رویکردی واقع‌گرایانه به نظر می‌رسد. بنابراین این تحقیق، هم از نظر نوع تابع هدف‌ها و هم از نظر رویکرد مواجهه با توابع هدف چندگانه، با سایر تحقیقات انجام شده متفاوت است. علاوه بر تفاوت مسئله مورد بررسی در این مقاله با سایر تحقیقات منتشر شده، الگوریتم ارائه شده برای حل مسئله نیز دارای نوآوری‌های قابل توجهی است.

۳. بیان مسئله

زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با دو منبع محدود، مسئله‌ای شامل n کار، m ماشین و w کارگر است. هر کار i شامل یک توالی از n_i عملیات $(h_{i,1}, h_{i,2}, \dots, h_{i,n_i})$ است که در آن $h_{i,j}$ عملیات jام از کار i است. پردازش هر عملیات به دو منبع ماشین و کارگر نیاز دارد. فرض بر این است که زمان انجام هر عملیات، به ماشین و کارگر تخصیص‌یافته به آن بستگی دارد. توالی اجرای عملیات‌ها و هم‌چنین تخصیص ماشین و کارگر برای اجرای هر عملیات، به گونه‌ای باید تعیین شوند که دو هدف مجموع موزون تأخیر کارها و حداکثر طول انجام کارها حداقل شوند.

رویکردهای متعددی برای مواجهه با مسائل بهینه‌سازی چند هدفه وجود دارد: رویکرد پیشینی[3]، رویکرد تعاملی[4]، و رویکرد پسینی[5]. مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی، مسئله‌ای است که در سطح عملیاتی مطرح است و به صورت روزانه باید حل شود. چابکی سیستم تولید اقتضا می‌کند که از رویکردی استفاده شود که مستلزم دخالت و نظر انسانی نباشد. بنابراین روش‌های پیشینی، با دنیای واقعی سازگارترند. در این تحقیق، تابع هدف‌ها به صورت لکزیکوگراف در نظر گرفته می‌شوند. ترتیب اولویت توابع هدف به این صورت است که سیستم ابتدا باید این اطمینان را کسب کند که محصول با حداقل دیرکرد ممکن تولید شود؛ بنابراین حداقل‌سازی تأخیر کارها در اولویت است. تابع هدف دوم، حداکثر زمان اتمام کارها در نظر گرفته شده است. اتمام زودتر کارها به معنی بهره‌برداری بهتر از ماشین‌آلات و آمادگی سیستم برای کارهای بعدی است. اگر موعد تحویل کارها، شل[6] باشند، جواب‌های بسیاری با تأخیر صفر وجود خواهد داشت. برای انتخاب جواب مناسب، به یک تابع هدف دوم نیاز است.

سایر مفروضات مسئله به شرح زیر است:

- تمام ماشین‌ها و نیروهای انسانی در زمان صفر در دسترس هستند.
- تمام کارها می‌توانند در زمان صفر انجام شوند و زمان آزادسازی کارها برابر صفر است.
- هر ماشین در یک لحظه زمانی تنها می‌تواند یک عملیات پردازش کند.
- زمان‌های پردازش قطعی است و از قبل مشخص شده است.
- پردازش هر عملیات به هر دو منبع ماشین و نیروی انسانی نیاز دارد.
- کارگر ممکن است از ماشینی به ماشین دیگر جابجا شود.
- کارگر در حین انجام یک عملیات نمی‌تواند جابجا شود.
- هر عملیات که بر روی یک ماشین شروع می‌شود باید پایان یابد تا عملیات بعدی بر روی همان ماشین انجام شود.
- مجموعه ماشین‌هایی که هر کارگر می‌تواند روی آنها کار کند، ممکن است بیشتر از یک عضو داشته باشد، و برای هر ماشین، کارگرانی که توانایی انجام کار روی آن ماشین را دارند، می‌تواند بیشتر از یک نفر باشد.
- زمان تنظیم و بارگذاری، به عنوان بخشی از زمان اجرا در نظر گرفته شده است.
- زمان جابجایی کارها و کارگرها بین ماشین‌ها ناچیز است و یا در

1. Two-Stage Artificial Bee Colony
2. Discrete Artificial Bee Colony
3. Priori
4. interactive
5. posteriori
6. Loose

زمان اجرا، لحاظ شده است.

- خرابی ماشین‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.

جدول ۲ عملیات و زمان‌های پردازش یک مسئله با ۴ کار، ۳ ماشین، و ۲ کارگر را نشان می‌دهد. در حالتی که یک سلول با "-" مشخص شده، نشان می‌دهد که آن عملیات با کارگر و ماشین مربوطه نمی‌تواند انجام شود. به‌طور مثال عملیات اول از کار دوم با ماشین ۱ و کارگر ۱ در ۱۲ واحد زمانی پردازش می‌شود اما این کار با همان ماشین و کارگر ۲ نمی‌تواند انجام شود.

جدول۱. خلاصه مرور ادبیات

نویسندگان	تابع هدف (ها)	نوع مسئله زمان‌بندی		منابع محدود		رویکرد چند هدفه		
		کارگاهی	انعطاف‌پذیر	یک	چند	پارتو	میانگین	لکزیکوگراف
باقری و زندیه (۲۰۱۱)	makespan; mean tardiness		✓	✓			✓	
گئو و پان (۲۰۱۶)	makespan		✓		✓			
هانگ و یو (۲۰۱۷)	makespan; tardiness; lot splitting cost	✓					✓	
جیبر و نیومن (۲۰۱۰)	productive time; worker's physical loading				✓		✓	
لی و همکاران (۲۰۱۷)	makespan		✓					
لانگ و لی (۲۰۱۱)	delivery satisfaction; productive cost; energy consumption; noise pollution		✓		✓		✓	
شهسواری‌پور و شبانکار (۲۰۱۳)	makespan; total work load; work load of machine		✓				✓	
رویانی و دفرشا (۲۰۱۹)	makespan		✓	✓				
گائو و همکاران (۲۰۱۵)	makespan	✓						
لی و همکاران (۲۰۱۰)	makespan	✓			✓			
پلاسیوس و همکاران (۲۰۱۵)	makespan; due-date satisfaction	✓		✓				✓
لی و گوا (۲۰۱۴)	makespan		✓		✓			
لیو و همکاران (۲۰۱۱)	makespan; production cost		✓		✓	✓		
لوبو و همکاران (۲۰۱۳)	maximum job lateness	✓			✓			
دوئیب و همکاران (۲۰۱۳)	number of tardy jobs; makespan							✓
یزدانی و همکاران (۲۰۱۵)	makespan		✓		✓			
ژنگ و وانگ (۲۰۱۹)	makespan; cost of overlapping		✓	✓		✓		
نلسون (۱۹۶۷)		✓			✓			
سوبیکو و مانچ (۲۰۱۴)	total weighted tardiness		✓	✓				
ژان ژو و ژنه (۲۰۱۱)	makespan		✓		✓			
لی و همکاران (۲۰۱۱)	makespan; total workload; critical machine workload		✓	✓		✓		
این پژوهش	total weighted tardiness; makespan		✓		✓			✓

جدول ۲. زمان پردازش کارها

job		M_1		M_2		M_3		job		M_1		M_2		M_3	
		W_1	W_2	W_1	W_2	W_1	W_2			W_1	W_2	W_1	W_2	W_1	W_2
j_1	$h_{1,2}$	5	-	-	6	8	-		$h_{3,1}$	-	10	-	12	-	14
	$h_{2,1}$	12	-	10	-	-	9	j_3	$h_{3,2}$	16	-	5	-	12	-
j_2	$h_{2,2}$	-	6	-	-	-	10		$h_{3,3}$	7	-	11	-	8	13
	$h_{2,3}$	5	-	8	-		12	j_4	$h_{4,1}$	-	10	-	14	-	-

یزدانی و همکاران (۲۰۱۵) مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با منابع دوگانه را مدل‌سازی کردند. تابع هدف آنها حداقل‌سازی C_{max} است. در این تحقیق، مدل آنها را با مسئله دو هدفه انطباق داده‌ایم. برای این منظور نمادهای زیر را در نظر بگیرید:

$c_{i,j}$ زمان اتمام عملیات $h_{i,j}$

C_i زمان اتمام کار i

d_i موعد تحویل کار i

t_i تأخیر کار i

w_i اهمیت وزنی کار i

دو تابع هدف مسئله را می‌توان چنین بیان کرد:

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^{n} w_i t_i \quad (۱)$$

$$\min Z_2 = C_{max} \quad (۲)$$

محدودیت زیر نیز باید به مدل یزدانی و همکاران (۲۰۱۵) افزوده شود:

$$t_i \geq c_{i,n_i} - d_i \quad (۳)$$

۴. الگوریتم حل

در این بخش، ابتدا الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی به صورت مختصر توضیح داده می‌شود. سپس الگوریتم ترکیبی مبتنی بر کلونی زنبورهای مصنوعی، عملگرهای الگوریتم ژنتیک و الگوریتم‌های ابتکاری ارائه می‌شود.

۴-۱. الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC) توسط کارابوگا در سال ۲۰۰۵ ارائه شد [۳۶]. این الگوریتم رفتار کاوشی کلونی زنبورها را برای مسائل بهینه‌سازی بدون محدودیت شبیه‌سازی می‌کند. برای حل مسائل بهینه‌سازی با محدودیت، یک روش برای اداره محدودیت‌ها، با این الگوریتم ترکیب می‌شود. در یک کلونی زنبور عسل واقعی، وظایفی وجود دارد که توسط افراد تخصصی، انجام می‌شود. این زنبورهای متخصص تلاش می‌کنند تا میزان شهد ذخیره شده در کندو را با انجام تقسیم کار و خودسازماندهی مؤثر، حداکثر کنند. مدل پایه کلونی زنبور عسل، شامل سه نوع زنبور است: زنبورهای کارگر، زنبورهای ناظر، و زنبورهای پیش‌آهنگ.

مراحل اصلی الگوریتم ABC که این رفتار را شبیه‌سازی می‌کند، چنین است:

۱. زنبورهای کارگر، در نقش زنبورهای پیش‌آهنگ، منابع غذایی اولیه را شناسایی می‌کنند. هر جواب مسئله‌ی بهینه‌سازی، به عنوان یک منبع غذایی تلقی می‌شود.

۲. هر زنبور کارگر یک منبع غذایی جدید در همسایگی منبع غذایی خود، شناسایی می‌کند و از بین آن منبع غذایی و منبع فعلی، منبع بهتر را انتخاب می‌کند.

۳. هر زنبور ناظر، یک منبع غذایی را با درنظر گرفتن کیفیت آن انتخاب و یک منبع غذایی جدید در همسایگی منبع غذایی انتخاب‌شده، شناسایی می‌کند و از بین آن منبع غذایی و منبع فعلی خود، منبع بهتر را انتخاب می‌کند.

۴. منابعی که باید متروک شوند، شناسایی شده و زنبورهای کارگر آنها به عنوان زنبور پیش‌آهنگ، به جستجوی منابع غذایی جدید می‌پردازند.

۵. بخاطر سپردن بهترین منبع غذایی پیدا شده تاکنون.

۶. تکرار مرحله‌های ۲ تا ۵، تا معیار توقف برآورده شود.

در ابتدای الگوریتم، یک جمعیت اولیه به اندازه تعداد منابع غذایی، تصادفی تولید می‌شود. اگر جواب iام را با بردار x_i نمایش دهیم و مسئله دارای n متغیر باشد، مقدار متغیر jام در جواب i را x_{ij} می‌نامیم.

مرحله دوم، هر زنبور کارگر، یک جواب جدید v_i در همسایگی x_i تولید می‌کند. برای این منظور می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$v_{ij} = x_{ij} + \emptyset_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (۴)$$

$\emptyset_{ij}$ یک عدد تصادفی یکنواخت در بازه $[-1,1]$ است که تولید موقعیت منابع غذایی همسایه در اطراف x_{ij} را کنترل می‌کند. k شماره منبع غذایی است که به صورت تصادفی از کلونی انتخاب شده است. بعد از تولید v_i این جواب جدید با x_i مقایسه می‌شود و زنبور کارگر، منبع بهتر را انتخاب می‌کند.

در مرحله سوم الگوریتم، هر زنبور ناظر، یک منبع غذایی را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند. احتمال انتخاب منابع غذایی، یکسان نیست. احتمال انتخاب منبع غذایی i از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{m=1}^{SN} fit_m} \quad (۵)$$

fit_i میزان شایستگی جواب x_i. هر زنبور ناظر با انتخاب یک منبع غذایی، مانند زنبور کارگر، منبع جدیدی در همسایگی آن تولید می‌کند و از بین منبع فعلی و جدید، منبع بهتر را انتخاب می‌کند.

با اتمام عملیات زنبورهای ناظر، منابع غذایی مورد بررسی قرار می‌گیرند که باید ترک شوند یا خیر. اگر تعداد تکرارهایی که یک منبع نتوانسته بهبود یابد، بزرگتر از حد تعیین شده باشد، آن منبع به عنوان منبع تمام‌شده در نظر گرفته می‌شود. زنبور کارگر منبع تمام شده، به زنبور پیش‌آهنگ تبدیل شده و یک جستجوی تصادفی در فضای مسئله انجام می‌دهد و منبع غذایی جدیدی شناسایی می‌کند.

۴-۲. نحوه نمایش جواب‌ها

گئو و همکاران یک روش برای نمایش جواب مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی بر اساس اعداد حقیقی پیوسته ارائه کردند[۳۷]. در این مطالعه، روش گئو و همکاران را مبنا قرار داده و با توجه به دو منبعی بودن مسئله، آن را تعمیم داده‌ایم. بنابراین برای نمایش جواب از دو بردار استفاده می‌شود که بردار اول برای توالی عملیات و بردار دوم برای نمایش کارگر و ماشین تخصیص داده شده به هر عملیات است. طول هر دو بردار برابر تعداد کل عملیات‌های مسئله است. در بردار اول، سلول‌ها با اعدادی در فاصله $[0,1]$ پر شده است که این اعداد، موقعیت عملیات متناظر با آن سلول را در توالی نشان می‌دهد. اگر اعداد پیوسته موجود در بردار را غیر نزولی مرتب کنیم، موقعیت هر عدد در ترتیب ایجاد شده، موقعیت مربوط به آن عملیات را در توالی نشان می‌دهد. بردار اول با V_1 نمایش داده می‌شود و عناصر آن از سلول اول تا آخر، به ترتیب از $o_{1,1}$ تا o_{n,n_i} نام‌گذاری شده است. سلول l ام در این بردار را با $V_1[l]$ نمایش می‌دهیم. بردار دوم نیز با اعداد پیوسته‌ای در فاصله $[0,1)$ پر شده است. مقدار موجود در سلول مربوط به عملیات $o_{i,j}$ را

با $V_2[l]$ نمایش می‌دهیم که در l امین سلول از بردار قرار دارد.

بر اساس داده‌های ورودی مسئله، به ازای هر عملیات، می‌توان ماتریسی ایجاد کرد که تمام حالت‌هایی که هر عملیات با کارگر و ماشین‌های موجود می‌تواند پردازش شود را نشان می‌دهد. ستون اول، شماره ماشین، ستون دوم، شماره کارگر، و ستون سوم، زمان انجام عملیات است و هر سطر، نشان‌دهنده یک حالت است که برای پردازش عملیات وجود دارد. اگر تعداد سطرهای ماتریس ماشین- کارگر مربوط به عملیات $o_{i,j}$ برابر A_l باشد، شماره سطر مربوط به ماشین و کارگر تخصیص یافته به عملیات l ام بر اساس بردار تخصیص ماشین-کارگر، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f[l] = [A_l.V_2[l] + 1] \quad (۶)$$

شکل۱ نحوه نمایش جواب برای مثال جدول ۲ را نشان می‌دهد. سطر اول، توالی عملیات و سطر دوم، تخصیص ماشین و کارگر را مشخص می‌کند. در مجموع ۸ عملیات وجود دارد بنابراین هر دو بردار ۸ عنصر دارند. شکل ۲ نحوه تبدیل بردار کدینگ پیوسته به توالی عملیات را نمایش می‌دهد. طبق این شکل، ابتدا اعداد تولید شده را به ترتیب، به عملیات موجود تخصیص می‌دهیم و آنها را به ترتیب غیر نزولی، مانند قسمت دوم از شکل ۲ مرتب می‌کنیم تا توالی عملیات مشخص شود. جدول ۳ که از جدول ۲ استخراج می‌شود، ترکیب‌های مختلف ماشین-کارگر را برای عملیات اول از کار اول (اولین سلول از بردار جواب‌ها) $(l = 1)$ مشخص می‌کند. در جدول ۲، عملیات اول به ۳ صورت قابل اجرا است که هر ۳ حالت در جدول ماشین-کارگر (جدول ۳) خلاصه می‌شود و با توجه به مقدار تولید شده در بردار ماشین-کارگر برای این عملیات، از فرمول ۶ داریم $f[1] = [0.16 * 3 + 1] = 1$. با توجه به مقدار$f[1] = 1$ عملیات اول با سطر اول از ماتریس ماشین- کارگر انجام می‌شود.

۰/۲۳	۰/۷۴	۱	۰/۱۲	۰/۶۹	۰/۳۲	۰/۴	۰/۲۷
۰/۸۳	۰/۵۲	۰/۹	۰/۴۸	۰/۱۴	۰/۷۴	۰/۵۵	۰/۱۶

شکل (۱): نحوه نمایش جواب شدنی به صورت پیوسته.

عدد تصادفی	۰/۲۳	۰/۷۴	۱	۰/۱۲	۰/۶۹	۰/۳۲	۰/۴	۰/۲۷
شماره کار	۴	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۱

اعداد تصادفی مرتب شده	۱	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۴	۰/۳۲	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۱۲
شماره کار	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۴	۳

شکل (۲): نحوه تبدیل اعداد پیوسته به توالی

جدول (۳): ماتریس ماشین-کارگر برای عملیات اول

ردیف	شماره ماشین	شماره کارگر	زمان پردازش
۱	۱	۱	۵
۲	۲	۲	۶
۳	۳	۱	۸

۳-۴. نحوه محاسبه تابع هدف و مقایسه جواب‌ها

با مشخص بودن توالی عملیات و تخصیص ماشین-کارگر، عملیات‌ها یکی یکی زمان‌بندی می‌شوند. پس از زمان‌بندی، می‌توان دو تابع هدف مسئله را اندازه‌گیری کرد.

برای مقایسه دو جواب با رویکرد لکزیکوگراف، ابتدا تابع هدف مجموع موزون تأخیرهای آنها مقایسه می‌شود. جواب با مقدار کمتر تابع هدف مجموع موزون تأخیرها انتخاب می‌شود. در صورتی که دو جواب، مقدار یکسان در تابع هدف اول داشته باشند، مقدار تابع هدف دوم را در نظر می‌گیریم (برای جواب‌هایی که مقدار Z_1 برابر دارند، تابع هدف دوم Z_2 حداقل‌سازی حداکثر طول انجام همه‌ی کارها است).

۴-۴. نحوه ایجاد جواب‌های اولیه

اغلب جواب‌های اولیه، به صورت تصادفی تولید می‌شوند. اما با توجه به بزرگ بودن فضای جواب‌های مسئله، چند جواب ابتکاری نیز در جمعیت اولیه قرار می‌گیرند. با توجه به پیوسته بودن کدینگ، تولید جواب‌های تصادفی آسان است. کافی است دو بردار از اعداد تصادفی در بازه $[0,1]$ تولید کنیم.

هفت جواب اولیه از جمعیت جواب‌ها توسط الگوریتم‌های ابتکاری ایجاد می‌شود. این الگوریتم‌های ابتکاری در سه دسته قرار می‌گیرند:

الگوریتم‌های ابتکاری توالی عملیات:

این گروه از الگوریتم‌ها تنها برای تولید توالی عملیات استفاده می‌شوند و در سه دسته زیر خلاصه می‌شوند.

زودترین موعد تحویل (EDD)[1]: اولویت انجام با کارهایی است که موعد تحویل نزدیک‌تری دارند. کارها را با توجه به زمان تحویل، به‌صورت غیرنزولی مرتب کرده و عملیات مربوط به هر کار به ترتیب اولویت، در بردار توالی، قرار داده می‌شود.

1. Earliest Due-Date

نسبت شناوری به زمان پردازش (SPRT)[1] : برای هر کار، حداقل زمان انجام کار $PRT_i = \sum_{j=1}^{h_i} \gamma_{i,j}$ ($\gamma_{i,j}$ کمترین زمان پردازش عملیات j از کار i) و سپس شاخص $s_i = d_i - PRT_i$ محاسبه می‌شود. اولویت با کاری است که در شاخص $I_i = {s_i}/{PRT_i}$ مقدار کمتری دارد. سپس کارها به ترتیب غیرنزولی این شاخص، در توالی قرار می‌گیرند.

کمترین زمان پردازش (SPT)[2] : اولویت با کاری است که زمان پردازش کمتری دارد. برای محاسبه زمان پردازش کارها، ابتدا میانگین زمان‌های انجام هر عملیات (در ترکیب‌های مختلف ماشین-کارگر آن عملیات) محاسبه و به عنوان زمان انجام آن عملیات تلقی می‌شود. سپس مجموع زمان انجام عملیات هر کار، به عنوان زمان انجام آن کار در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به وجود دو هدف تأخیر کارها و زمان اتمام کارها، الگوریتم‌های ابتکاری به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتوانند جواب‌های نسبتاً خوبی برای هر دو هدف تولید کنند.

الگوریتم‌های ابتکاری تخصیص ماشین-کارگر:

این دسته از الگوریتم‌ها، توالی عملیات را می‌گیرند و تخصیص کارگر و ماشین را تولید می‌کنند. در این مقاله، دو الگوریتم ابتکاری برای تخصیص کارگر-ماشین ارائه شده است:

زودترین زمان پایان (EF): این الگوریتم، توالی عملیات را می‌گیرد و به ترتیب توالی که وجود دارد، کارگر و ماشینی را تخصیص می‌دهد که عملیات را زودتر به پایان برساند. در واقع این الگوریتم، تنها تخصیص کارگر و ماشین را، با توجه به نزدیک‌ترین زمان پایان ممکن، تخصیص می‌دهد.

کمترین زمان پردازش سراسری[3] (Pezzella): پزلا و همکاران [۳۸] قاعده‌ی کمترین زمان پردازش سراسری، برای مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با یک منبع (ماشین) را مطرح کردند. در اینجا این قاعده، برای مسئله‌ی دو منبعی، تعمیم داده می‌شود؛ به‌طوری‌که پس از یافتن کمترین زمان پردازش در کل جدول زمانی عملیات- ماشین- کارگر، پس از حذف عملیات، زمان پردازش به کارگر و ماشین منتخب، اضافه می‌شود.

الگوریتم ابتکاری توالی- ماشین- کارگر:

در این الگوریتم، هر دو بردار توالی و تخصیص، همزمان با هم تولید می‌شوند. برای ایجاد بردار توالی، برای همه عملیات‌هایی که پیش‌نیازهای آنها انجام شده است، ترکیبی از ماشین و کارگر را انتخاب می‌کند که آن عملیات در زودترین زمان ممکن به پایان برسد. یعنی اولویت با عملیاتی است که اگر آن را زمان‌بندی کنیم، از هر عملیات برنامه‌ریزی نشده‌ی دیگری، زودتر تمام خواهد شد. جدول ۴ نحوه تولید هفت جواب ابتکاری اولیه را نشان می‌دهد.

1. Slack Per Remaining Processing Ttime
2. Shortest Processing Time
3. Global minimum processing time

۴-۵. الگوریتم کلونی زنبور پیشنهادی

در این بخش به تشریح الگوریتم پیشنهادی، و تفاوت آن با الگوریتم زنبور پایه پرداخته می‌شود. پس از مقداردهی پارامترهای الگوریتم، جواب‌های اولیه که در واقع منابع اولیه غذا هستند، تولید می‌شوند. آنگاه فعالیت زنبورهای کارگر آغاز می‌شود. در این گام به هر منبع، یک زنبور کارگر تخصیص داده می‌شود. در الگوریتم پایه، برای حرکت زنبورهای کارگر، یک منبع به صورت تصادفی انتخاب می‌شود؛ اما در این تحقیق، انتخاب منبع جدید با روش مسابقه[4] (مربوط به الگوریتم ژنتیک) نیز بررسی شده است. در روش مسابقه، زنبورهای کارگر به سمت جواب‌های نسبتاً خوب حرکت می‌کنند. در انتخاب براساس مسابقه، به صورت تصادفی k عضو از جمعیت حاضر، جدا می‌شوند و آنکه در بین آنها بهترین تابع هدف را دارد، انتخاب می‌شود.

جدول (۴): نحوه تولید جواب اولیه با الگوریتم‌های ابتکاری

شماره جواب	توالی عملیات			تخصیص ماشین-کارگر		الگوریتم ابتکاری
	EDD	SPRT	SPT	EF	Pezella	پیشنهادی
۱	✓			✓		
۲		✓		✓		
۳			✓	✓		
۴	✓				✓	
۵		✓			✓	
۶			✓		✓	
۷						✓

در الگوریتم پایه کلونی زنبور عسل، حرکت زنبور با فرمول (۴) اجرا می‌شود؛ اما در این تحقیق، عملگر امتزاج و ترکیبی از عملگرهای امتزاج و جهش نیز بررسی شده‌اند. در حالت ترکیبی، با احتمال ۵۰٪ امتزاج و با احتمال ۵۰٪ جهش انجام می‌شود. پس از تولید جواب جدید و ارزیابی تابع هدف، اگر جواب موجود بهبود یافت، زنبور کارگر حرکت می‌کند و به جواب تولید شده توسط عملگرها می‌رود؛ در غیر اینصورت یک واحد به معیار بهبود نیافتن منبع[5] اضافه می‌شود و زنبور در منبع فعلی باقی می‌ماند.

پس از پایان فعالیت زنبورهای کارگر، گام مربوط به زنبورهای ناظر آغاز می‌شود. در این گام هر زنبور ناظر، به یک منبع تخصیص یافته، و با عملگر مسابقه، یک جواب را انتخاب می‌کند. مشابه زنبورهای کارگر، برای تولید جواب جدید، از عملگرهای امتزاج و جهش استفاده شده است.

پس از اتمام گام زنبورهای ناظر، جوابها ارزیابی شده و دو الگوریتم ابتکاری برای بهبود جواب اجرا می‌شود. در الگوریتم ابتکاری اول، از بین چند جواب نخبه، یک جواب به تصادف انتخاب و تغییر داده

4. Tournament
5. Trial

می‌شود. در جوابی که انتخاب شده، بردار توالی بدون تغییر باقی می‌ماند اما بردار تخصیص ماشین و کارگر تغییر داده می‌شود. در واقع بردار توالی عملیات را می‌گیرد و براساس قاعده زودترین زمان پایان (EF)، بردار تخصیص را مجدداً تولید می‌کند. در الگوریتم ابتکاری دوم، مجدداً یک جواب نخبه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و پس از ثابت نگه داشتن بردار توالی، بردار کارگر-ماشین را مجدداً براساس قاعده پزلا تولید می‌کند.

گام بعد به این‌صورت است که در پایان هر تکرار، فرایند زیر اجرا می‌شود:

یک جواب به طور تصادفی از بین تعدادی جواب نخبه انتخاب می‌شود. از این جواب، کاری که دارای بیشترین تأخیر مثبت است انتخاب می‌شود. اگر کاری با تأخیر مثبت وجود داشته باشد:

عنصر متناظر با آخرین عملیات این کار در بردار توالی‌ها کاهش داده می‌شود. یعنی مثلا اگر کد توالی این عملیات ۰.۷۴ باشد، یک عدد تصادفی بین صفر تا ۰.۷۴ تولید و جایگزین آن می‌شود. احتمالاً این تغییر موجب می شود آن کار زودتر تمام شود.

کاری که دارای کمترین تأخیر است انتخاب می‌شود. اگر این تأخیر منفی باشد:

عنصر متناظر با اولین عملیات این کار در بردار توالی‌ها افزایش داده می‌شود. یعنی مثلاً اگر کد توالی این عملیات ۰.۷۴ باشد، یک عدد تصادفی بین ۰.۷۴ تا ۱ تولید و جایگزین آن می‌شود. احتمالاً این تغییر موجب می‌شود آن کار دیرتر تمام شود.

گام الگوریتم‌های ابتکاری برای بهبود جواب‌ها اجرا می‌شوند.

در گام آخر هر تکرار، عملکرد زنبورهای پیش‌آهنگ شروع می‌شود. این گام همانند الگوریتم زنبور پایه، جواب‌هایی که از حد معین بهبود نیافتن، عبور کنند، حذف می‌کند و زنبورهای پیش‌آهنگ به تصادف، جواب جدید تولید می‌کنند. در الگوریتم پیشنهادی، تعدادی از جواب‌های برتر (نخبه) هیچ‌گاه حذف نمی‌شوند؛ به عبارت دیگر، زنبورهای پیش‌آهنگ از بین تمامی منابع به جز چند جواب برتر اول، شروع به حذف منبع و تولید جواب جدید می‌کنند.

الگوریتم تا زمانی ادامه می‌یابد که در ۱۰۰ تکرار متوالی، بهترین جواب الگوریتم بهبود پیدا نکند. بنابراین تعداد تکرارها ثابت نیست و بستگی به بهبود بهترین جواب دارد (البته تعداد تکرارها کمتر از ۲۰۰ نخواهد بود).

۶-۴. عملگر امتزاج

در الگوریتم ژنتیک از عملگر امتزاج برای تولید فرزند استفاده می‌شود. عملگر امتزاج در این مقاله به گونه‌ای است که در ۵۰ درصد مواقع به صورت تک نقطه‌ای (شکل ۳) و در ۵۰ درصد مواقع به صورت یکنواخت (شکل ۴) اجرا می‌شود. عملگر تک نقطه‌ای هر دو جواب والد را از نقطه یکسان قطع نموده و با جابجایی ۴ قسمت ایجاد شده، دو جواب فرزند تولید می‌کند. در عملگر یکنواخت برای هر سلول به صورت جداگانه تصمیم گرفته می‌شود که از والد ۱ یا والد ۲ استفاده شود.

والد ۱	۰.۲	۰.۳۲	۰.۶	۰.۲۷	۰.۵	۰.۴	۰.۴۴	۰.۱۱
والد ۲	۱	۰.۱۶	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۶۳	۰.۴۳	۰.۱۸	۰.۹۶
فرزند ۱	۰.۲	۰.۳۲	۰.۶	۰.۲۷	۰.۶۳	۰.۴۳	۰.۱۸	۰.۹۶
فرزند ۲	۱	۰.۱۶	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۵	۰.۴	۰.۴۴	۰.۱۱

شکل (۳): نحوه تولید فرزند از طریق امتزاج تک نقطه‌ای.

والد ۱	۰.۲	۰.۳۲	۰.۶	۰.۲۷	۰.۵	۰.۴	۰.۴۴	۰.۱۱
والد ۲	۱	۰.۱۶	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۶۳	۰.۴۳	۰.۱۸	۰.۹۶
عدد تصادفی	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱
فرزند ۱	۰.۲	۰.۳۲	۰.۲۵	۰.۲۷	۰.۶۳	۰.۴۳	۰.۴۴	۰.۱۱

شکل (۴): نحوه تولید فرزند از طریق امتزاج یکنواخت.

۷-۴. عملگر جهش

عملگر جهش به‌صورت تغییر در برخی از ژن‌ها اتفاق می‌افتد. تعدادی از ژن‌ها انتخاب و برای هر ژن، عددی به تصادف از بازه‌ی تعیین شده در بردار جواب انتخاب می‌شود که توالی و یا تخصیص ماشین و کارگر را تغییر می‌دهد. در الگوریتم پیشنهادی، عملگر جهش به دو شکل انجام می‌شود. در ۵۰ درصد مواقع، بردار توالی و در۵۰ درصد مواقع

نیز تخصیص کارگر و ماشین جهش پیدا می‌کند.

در عملگر جهش، تعداد ژن‌هایی که تغییر داده می‌شود، وسعت همسایگی جستجو شده را نشان می‌دهد. اگر تعداد این ژن‌ها کم باشد، ریسک گیر افتادن الگوریتم در جوابهای بهینه محلی را به همراه دارد. اگر تعداد ژن‌هایی که تغییر داده می‌شود زیاد باشد، به جستجوی تصادفی نزدیک خواهیم شد. با تغییر تعداد این ژن‌ها، می‌توان همسایگی‌های متغیری را جستجو کرد. الگوریتم فرابتکاری جستجوی همسایگی متغیر[1]، بر اساس این ایده عمل می‌کند.

در این مقاله، تعداد ژن‌هایی که تغییر داده می‌شود، بر اساس تعداد تکرارهایی که هر جواب بهبود پیدا نکرده است، تنظیم می‌شود. اگر بهبودی حاصل نشود، همسایگی برای جستجوی جواب‌های جدید، بزرگ‌تر می‌شود اما این همسایگی بزرگ ممکن است آشفتگی ایجاد کند. نحوه عملکرد جهش چنین است:

در ابتدا S را ۱ قرار می‌دهیم. پس از ۱۰ نسل اگر جواب بهبود پیدا نکرد، یک واحد به S اضافه می‌شود؛ در غیر این‌صورت مقدار S تا ۱۰ نسل بعد بدون تغییر می‌ماند. این کار تا ۵۰ نسل ادامه دارد و اگر پس از ۵۰ نسل باز هم بهبودی حاصل نشد، مجدداً $S = 1$ قرار داده می‌شود. در این‌صورت حداکثر مقدار S برابر ۶ می‌شود. تعداد ژن‌هایی که در جهش تغییر می‌کنند، تصادفی از بازه‌ی $[1, S]$ انتخاب می‌شوند. شکل ۵ حالتی را نشان می‌دهد که جواب پس از ۳۰ نسل بهبودی نداشته؛ بنابراین $S = 4$ است و به‌صورت تصادفی عدد ۲ از بازه $[1,4]$ انتخاب شده است. بنابراین ۲ ژن از جواب تغییر می‌کند. جواب زیر بردار توالی است بنابراین دو عدد به تصادف از بازه $[0,1]$ انتخاب و در سلول انتخاب شده قرار داده می‌شود.

۰.۱۱	۰.۴۴	۰.۴		۰.۵	۰.۲۷	۰.۶	۰.۳۲	۰.۲

۰.۱۱	۰.۴۴	۰.۴		۰.۱۸	۰.۲۷	۰.۶	۰.۲۱	۰.۲

شکل (۵): تغییر دو ژن در جواب به صورت تصادفی.

۵. تنظیم پارامترها

از عوامل مهم و اثرگذار بر عملکرد روش‌های فرابتکاری، می‌توان به تنظیمات پارامترهای این روش‌ها اشاره کرد. در این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی، سطح مطلوب پارامترها و عملگرها را به دست می‌آوریم. با استفاده از مرور ادبیات و آزمایش‌های مقدماتی، پارامترهایی انتخاب شدند که اسامی فاکتورها و سطوح آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

در فاکتور نوع انتخاب منبع جدید برای حرکت زنبور کارگر ۳ سطح وجود دارد:

- تصادفی: منبع انتخابی برای حرکت زنبورهای کارگر به صورت تصادفی از بین منابع موجود انتخاب می‌شود.
- دو سطح بعدی فاکتور، بیان می‌کند که انتخاب منبع از بین منابع نسبتاً خوب انجام شود که این عمل با عملگر مسابقه در دو سایز متفاوت اجرا می‌شود.

برای فاکتور نوع حرکت در زنبورهای کارگر نیز سه سطح مختلف بررسی می‌شود:

- فرمول حرکت زنبور: در این نوع حرکت برای زنبورهای کارگر همان حرکت زنبور پایه اجرا می‌شود.
- امتزاج: در این نوع حرکت، جواب فعلی با جواب انتخاب شده از طریق مسابقه، امتزاج پیدا می‌کند و منبع جدید تنها از طریق امتزاج تولید می‌شود.
- امتزاج- جهش (۵۰-۵۰): در این سطح علاوه بر امتزاج، منبع جدید از طریق جهش نیز تولید می‌شود. که این روش در ۵۰ درصد مواقع جواب فعلی و منتخب را امتزاج می‌دهد و در ۵۰ درصد مواقع جواب فعلی را جهش می‌دهد.

جدول (۵). فاکتورها و سطوح آنها

نماد	عامل	تعداد سطح	مقادیر
A	تعداد منابع غذا (SN)	۳	۲۰، ۴۰ و ۳۰
B	نوع انتخاب منبع جدید برای حرکت زنبور کارگر	۳	تورنامنت سایز۲، تورنامنت سایز۴، و تصادفی
C	تعداد زنبورهای پیش‌آهنگ (nScout)	۳	۱، ۳، و ۲
D	تعداد جواب های منتخب (nElite)	۴	۳، ۷، و ۵
E	نوع حرکت زنبورهای کارگر	۳	فرمول حرکت زنبور، امتزاج، و امتزاج۵۰- جهش۵۰
F	سایز تورنامنت زنبور ناظر	۳	۲، ۳، و ۴
G	نوع حرکت زنبورهای ناظر	۴	حرکت زنبور امتزاج ۸۰- جهش۲۰ امتزاج ۵۰- جهش۵۰

در فاکتور نوع حرکت در زنبورهای ناظر، امتزاج و جهش با نسبت ۸۰-۲۰ نیز اجرا می‌شود که در ۲۰ درصد جواب‌ها عملگر امتزاج و مابقی، عملگر جهش اجرا می‌شود.

در جدول ۵ هفت فاکتور سه سطحی وجود دارد. برای طراحی سناریوهای آزمایش، از روش تاگوچی استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار Minitab ۲۷ سناریو به دست آمد و برای ۱۰ مسئله نمونه با ابعاد مختلف، سناریوها اجرا شدند. در نهایت با محاسبه و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مقادیر میانگین سطوح مختلف هر فاکتور در اجراها، بهترین سطح آن فاکتور انتخاب شد. بهترین سطح هر فاکتور، در جدول

1. variable neighborhood search

۵ با کشیدن خط زیر آن، مشخص شده است. لازم به توضیح است که چندین بار سطوح فاکتورها تغییر داده شد و ازمایش‌ها تکرار شد تا حتی‌الامکان سطح بهینه فاکتورها، سطح میانی باشد؛ به گونه‌ای که بتوان گفت افزایش یا کاهش سطح یک فاکتور نمی‌تواند موجب بهبود عملکرد الگوریتم شود.

۶. ارزیابی عددی

طراحی و بهینه‌سازی یک الگوریتم فراابتکاری برای مسائل پیچیده‌ای همچون مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر، مستلزم آزمایش‌های عددی فراوان برای شناسایی ترکیب مناسب الگوریتم و اطمینان از عملکرد آن است. ابتدا مدل ریاضی مسئله را در نرم‌افزار GAMS کد کرده و برای حل دقیق مدل از این نرم‌افزار استفاده شد. برای برنامه‌نویسی الگوریتم فراابتکاری از نرم‌افزار MATLAB بهره گرفته‌ایم. برای اجرای الگوریتم‌ها از کامپیوتری با مشخصات ۲.۴ گیگا هرتز (corei7) و حافظه ۶ گیگابایت استفاده شده است.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم به مسائل نمونه نیاز است. ۱۸ مسئله نمونه تصادفی تولید شد که زمان پردازش عملیات و موعد تحویل هر کار به طور تصادفی و به ترتیب در بازه‌های [99 1] و [250 200] انتخاب شد. ۰جدول ۶ مشخصات مسائل نمونه تولید شده را نشان می‌دهد.

جدول (۶): اطلاعات مسائل نمونه

مسئله	تعداد کار	تعداد عملیات هر کار	تعداد ماشین‌ها	تعداد کارگرها
۱	۳	[۲ ۳]	۲	۲
۲	۳	[۲ ۴]	۲	۲
۳	۳	[۲ ۴]	۳	۲
۴	۴	[۲ ۳]	۲	۲
۵	۴	[۲ ۴]	۳	۲
۶	۴	[۲ ۳]	۳	۳
۷	۴	[۲ ۴]	۳	۲
۸	۴	[۲ ۴]	۳	۳
۹	۵	[۳ ۴]	۳	۲
۱۰	۶	[۳ ۴]	۳	۲
۱۱	۶	[۴ ۶]	۴	۲
۱۲	۷	[۴ ۶]	۴	۳
۱۳	۸	[۴ ۶]	۴	۳
۱۴	۹	[۴ ۶]	۵	۳
۱۵	۱۰	[۴ ۶]	۵	۳
۱۶	۱۰	[۵ ۷]	۶	۳
۱۷	۱۰	[۶ ۸]	۶	۴
۱۸	۱۲	[۷ ۹]	۶	۴

برای دستیابی به ترکیبی از الگوریتم‌ها که عملکرد مناسبی داشته باشد، ترکیب‌های بسیاری مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور رعایت اختصار، نتایج آزمایش‌ها در ۴ حالت را ارائه و با نتایج حاصل از GAMS مقایسه می‌کنیم. جدول ۷ ترکیب الگوریتم‌هایی که عملکرد آنها با یکدیگر و با GAMS مقایسه شده است را نشان می‌دهد.

جدول (۷): ترکیب الگوریتم‌های بررسی شده

کد الگوریتم	توضیحات
Basic	الگوریتم کلونی زنبور با عملگرهای امتزاج و جهش الگوریتم ژنتیک
InitialHeuristic	الگوریتم Basic، همراه با جواب‌های اولیه ابتکاری
Worker-Machine	الگوریتم InitialHeuristic، همراه با تغییر ابتکاری تخصیص ماشین-کارگر: تغییر تخصیص ماشین-کارگر با دو الگوریتم EF و پزلای تعمیم‌یافته
Complete	الگوریتم کامل (با اضافه شدن الگوریتم ابتکاری تغییر در بردار توالی بر اساس تأخیر کارها)

جدول ۸ نتایج اجرای ۴ الگوریتم فوق برای ۸ مسئله ابتدایی جدول ۶ که سایز کوچک تلقی می‌شوند را نشان می‌دهد. با توجه به ماهیت تصادفی الگوریتم، هر الگوریتم برای هر مسئله ۳ بار اجرا شده است. جواب بهینه هر مسئله با نرم‌افزار GAMS نیز محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۸ آمده است. زمان‌های اجرا بر حسب ثانیه است و ستون‌های F_1 و F_2 مقادیر دو تابع هدف مسئله را نشان می‌دهند. بهینه بودن جوابهای به دست آمده از الگوریتم‌های ارائه شده، نشان می‌دهد این الگوریتم‌ها برای مسائل کوچک، عملکرد صحیحی دارند. البته زمان‌های حل مسائل کوچک توسط GAMS کوچکتر از زمان‌های حل آنها توسط الگوریتم‌های پیشنهادی است.

با بزرگتر شدن اندازه مسئله، زمان حل آن با الگوریتم‌های دقیق، به سرعت افزایش پیدا می‌کند. در جدول ۹ نتایج حل مسائل نمونه ۹ تا ۱۲ آمده است. زمان حل این مسائل با GAMS از حدود ۱۶ دقیقه برای مسئله ۹ به حدود ۹.۵ ساعت برای مسئله ۱۲رسیده است. افزایش سریع زمان حل دقیق مسئله، نشان می‌دهد الگوریتم‌های دقیق برای حل مسائل متوسط و بزرگ مناسب نیستند. مقایسه تابع هدف بهینه با جواب‌های به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی، نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی نتوانسته است برای مسائل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ جواب بهینه را به دست آورد؛ اما جوابی با کیفیت مناسب را در زمان اجرای حدود یک دقیقه به دست آورده است.

برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده در جدول ۴، مسائل نمونه ۹ تا ۱۸ نیز با استفاده از این الگوریتم‌ها حل شدند. با توجه به تفاوت در جواب‌های نهایی الگوریتم‌ها برای هر مسئله، و دو هدفه بودن مسئله، به معیاری برای مقایسه کیفیت جواب‌ها نیاز داریم. برای این منظور، ابتدا جواب‌های هر تابع هدف، نرمال‌سازی شدند و میانگین موزون آنها به عنوان معیار مقایسه تلقی شد. در این میانگین موزون، وزن تابع هدف اول را خیلی بالاتر از وزن تابع هدف دوم در نظر گرفتیم تا لکزیکوگراف بودن تابع هدف‌ها لحاظ شده باشند. جدول ۱۰ میانگین ۳ اجرای مختلف در هر مسئله را نمایش می‌دهد. مقایسه ستون‌های جدول ۱۰ نشان می‌دهد تغییرات اعمال شده در الگوریتم پایه کلونی زنبور عسل، موجب بهبود عملکرد آن شده‌اند.

جدول (۸): عملکرد الگوریتم‌ها در حل مسائل کوچک

مسئله	Worker-Machine			InitialHeuristic			Basic			Complete			نتایج GAMS		
	F_1	F_2	Time	F_1	F_2	Time	F_1	F_2	Time	F_1	F_2	Time	F_1	F_2	Time
۱	۷	۱۱۹	۲۱.۱	۷	۱۱۹	۱۵.۲	۷	۱۱۹	۱۵.۳	۷	۱۱۹	۲۵.۱			
۱	۷	۱۱۹	۲۰.۹	۷	۱۱۹	۱۵.۱	۷	۱۱۹	۱۵	۷	۱۱۹	۱۷.۲	۷	۱۱۹	۰.۶۸
۱	۷	۱۱۹	۲۰.۸	۷	۱۱۹	۱۵.۲	۷	۱۱۹	۱۵	۷	۱۱۹	۱۴.۵			
۲	۶۳	۲۴۲	۲۱.۸	۶۳	۲۴۲	۱۵.۸	۶۳	۲۴۲	۱۵.۶	۶۳	۲۴۲	۱۵.۷			
۲	۶۳	۲۴۲	۲۱.۸	۶۳	۲۴۲	۱۵.۷	۶۳	۲۴۲	۱۵.۶	۶۳	۲۴۲	۱۵.۸	۶۳	۲۴۲	۱.۳۱
۲	۶۳	۲۴۲	۲۱.۸	۶۳	۲۴۲	۱۵.۹	۶۳	۲۴۲	۱۵.۶	۶۳	۲۴۲	۱۵.۷			
۳	۰	۹۸	۱۹.۱	۰	۹۸	۱۳.۹	۰	۹۸	۱۳.۶	۰	۹۸	۱۹			
۳	۰	۹۸	۱۹.۱	۰	۹۸	۱۳.۹	۰	۹۸	۱۳.۷	۰	۹۸	۱۹	۰	۹۸	۱.۱۲
۳	۰	۹۸	۱۹.۱	۰	۹۸	۱۳.۹	۰	۹۸	۱۳.۷	۰	۹۸	۱۹			
۴	۳۴۸	۲۵۸	۲۲	۳۴۸	۲۵۸	۱۶	۳۴۸	۲۵۸	۱۵.۷	۳۴۸	۲۵۸	۱۷.۸			
۴	۳۴۸	۲۵۸	۲۲	۳۴۸	۲۵۸	۱۶	۳۴۸	۲۵۸	۱۵.۸	۳۴۸	۲۵۸	۱۷.۲	۳۴۸	۲۵۸	۱.۲۲
۴	۳۴۸	۲۵۸	۲۲	۳۴۸	۲۵۸	۱۶	۳۴۸	۲۵۸	۱۵.۷	۳۴۸	۲۵۸	۲۰.۴			
۵	۰	۹۸	۲۲.۲	۰	۹۸	۱۶.۱	۰	۹۸	۱۵.۸	۰	۹۸	۲۲.۲			
۵	۰	۹۸	۲۲.۱	۰	۹۸	۱۶.۱	۰	۹۸	۱۵.۸	۰	۹۸	۲۲	۰	۹۸	۱.۶۸
۵	۰	۹۸	۲۲.۱	۰	۹۸	۱۶	۰	۹۸	۱۵.۸	۰	۹۸	۲۲.۱			
۶	۰	۶۵	۲۱.۲	۰	۶۵	۱۵.۲	۰	۶۵	۱۵	۰	۶۵	۲۱.۲			
۶	۰	۶۵	۲۱.۱	۰	۶۵	۱۵.۲	۰	۶۵	۱۵	۰	۶۵	۲۱.۱	۰	۶۵	۱.۳۴
۶	۰	۶۵	۲۱	۰	۶۵	۱۵.۲	۰	۶۵	۱۵	۰	۶۵	۲۱			
۷	۴	۱۲۵	۲۲.۶	۴	۱۲۵	۱۶.۳	۴	۱۲۵	۱۶.۳	۴	۱۲۵	۱۷.۹			
۷	۴	۱۲۵	۲۲.۶	۴	۱۲۵	۱۶.۳	۴	۱۲۵	۱۶.۳	۴	۱۲۵	۱۸	۴	۱۲۵	۱.۷۵
۷	۴	۱۲۵	۲۲.۶	۴	۱۲۵	۱۶.۳	۴	۱۲۵	۱۶.۵	۴	۱۲۵	۲۰.۷			
۸	۳۰	۸۲	۲۳.۲	۳۰	۸۲	۱۶.۷	۳۰	۸۲	۱۶.۷	۳۰	۸۲	۱۸.۶			
۸	۳۰	۸۲	۲۳.۴	۳۰	۸۲	۱۶.۶	۳۰	۸۲	۱۶.۶	۳۰	۸۲	۲۲.۱	۳۰	۸۲	۱.۴۲
۸	۳۰	۸۲	۲۳.۶	۳۰	۸۲	۱۶.۶	۳۰	۸۲	۱۶.۶	۳۰	۸۲	۲۰			

جدول (۹): مقایسه نتایج با GAMS

مسئله	نتایج GAMS			نتایج الگوریتم		
	F_1	F_2	Time	F_1	F_2	Time
۹	۲۲۲	۲۲۷	۱۰۲۳	۲۲۲	۲۲۷	۲۳.۰۶
۱۰	۱۰۲	۲۳۳	۱۷۳۴۰	۱۰۲	۲۴۶	۲۵.۴
۱۱	۴۹۷	۲۷۰	۲۸۹۸۰	۴۹۷	۳۰۹	۶۱.۲
۱۲	۲۴	۱۶۰	۳۴۰۸۰	۲۷	۱۶۸	۷۲.۸

جدول (۱۰): میانگین وزنی توابع هدف نرمال‌سازی شده

مسئله	Basic	InitialHeuristic	Worker-Machine	Complete
۹	۰.۲۵۹	۰.۲۳۹	۰.۴۰۴	۰.۱۵۹
۱۰	۰.۹۰۵	۰.۱۲۰	۰.۰۴۵	۰.۰۸۶
۱۱	۰.۶۸۱	۰.۶۳۶	۰.۷۲۷	۰.۳۸۱
۱۲	۰.۷۵۹	۰.۴۵۳	۰.۴۰۰	۰.۳۳۴
۱۳	۰.۷۰۴	۰.۲۵۰	۰.۱۶۱	۰.۲۵۲
۱۴	۰.۵۶۹	۰.۱۸۵	۰.۰۳۴	۰.۰۲۸
۱۵	۰.۳۵۹	۰.۰۲۵	۰.۰۲۰	۰.۰۳۵
۱۶	۰.۴۹۱	۰.۰۵۸	۰.۰۴۹	۰.۰۱۲
۱۷	۰.۷۸۷	۰.۳۸۰	۰.۲۴۵	۰.۰۶۸
۱۸	۰.۸۳۵	۰.۶۷۲	۰.۶۷۳	۰.۰۶۴

جدول (۱۱): آزمون معناداری تفاوت عملکرد الگوریتم‌ها

مقایسه میانگین الگوریتم کامل با الگوریتم Basic	P-Value= ۰.۰۰۰۰۱
مقایسه میانگین الگوریتم کامل با الگوریتم InitialHeuristic	P-Value= ۰.۰۰۹۲۵
مقایسه میانگین الگوریتم کامل با الگوریتم Worker-Machine	P-Value= ۰.۰۴۶۰۲

برای بررسی وجود تفاوت معنادار بین عملکرد الگوریتم‌ها، آزمون T انجام شد. جدول ۱۱ نتایج آزمون T را در مقایسه دو به دوی الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. الگوریتم کامل با سه الگوریتم دیگر مقایسه شده است. جدول ۱۱ مقدار P-Value را برای هر سه آزمون نشان می‌دهد. مقدار P-Value در همه موارد، کمتر از ۰.۰۵ است و نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم کامل، تفاوت معناداری با بقیه ترکیب‌ها دارد.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این تحقیق مسئله‌ی زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دوگانه منابع در نظر گرفته شده است. مسئله موجود در این تحقیق با هدف حداقل‌سازی مجموع موزون تأخیرها و حداکثر

زمان تکمیل کارها مورد بررسی قرار گرفته است. رویکرد برخورد با توابع هدف به‌صورت لکزیکوگراف است و تابع هدف اول، مجموع موزون تأخیرها در نظر گرفته می‌شود. با توجه به فرضیات مطرح شده و به دلیل سخت بودن مسئله، یک الگوریتم ترکیبی کلونی زنبور عسل مصنوعی برای حل مسائل ارائه می‌شود. به منظور ایجاد تعادل بین دو ویژگی بهره‌برداری و اکتشاف، در الگوریتم ارائه شده در تولید جواب جدید از عملگرهای ژنتیک استفاده شده است. برای بررسی کیفیت الگوریتم، نتایج اجرای الگوریتم با نتایج حاصل از حل مدل در نرم افزار GAMS مقایسه می‌شود. به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ارائه شده، مطالعات محاسباتی با در نظر گرفتن مسائل نمونه انجام شده است. نتایج الگوریتم نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، عملکرد مناسبی برای جواب مسئله داشته و روشی مؤثر برای حل مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دوگانه منابع است.

دو هدف کاهش تأخیر کارها و کاهش زمان انجام کارها، دو هدف متداول در دنیای واقعی هستند. رویکردهای پسینی نظیر جبهه پارتو نیز برای مسائل زمان‌بندی چند هدفه مناسب به نظر نمی‌آیند. بنابراین کاربرد رویکرد لکزیکوگراف برای مواجهه با این دو تابع هدف، برای سایر مسائل زمان‌بندی نیز می‌تواند موضوع تحقیقات آینده باشد.

مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان داد که طراحی الگوریتم برای تابع هدف‌های لکزیکوگراف می‌تواند بسیار دشوار باشد. الگوریتم جستجو باید بتواند برای بهبود هر دو تابع هدف عمل کند. به عنوان مثال، تا وقتی مجموع تأخیرها مثبت است، الگوریتم باید در جهت کاهش تأخیرها عمل کند. اما وقتی مجموع تأخیرها صفر شد، الگوریتم باید بتواند ضمن صفر نگه داشتن تأخیرها، زمان انجام کارها را بهبود دهد. از آنجایی که بهبود تابع هدف تأخیر و بهبود تابع هدف زمان انجام کارها، مکانیزم‌های متفاوتی دارند، الگوریتم جستجو باید بسیار متنوع و منعطف باشد.

مسئله بررسی شده در این پایان‌نامه در صنایع تولیدی، کاربرد بسیاری دارد. می‌توان با لحاظ نمودن فاکتورهایی چون زمان راه اندازی، و زمان‌های توقف ماشین و کارگر، آنرا توسعه داد. استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری کارا و جدید را می‌توان در ترکیب الگوریتم به کار برد تا به نتایج بهتری منجر شود.

مراجع

[1] Yazdani, M., Zandieh, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Jolai, F. (2015). Two meta-heuristic algorithms for the dual-resource constrained flexible job-shop scheduling problem. *Scientia Iranica. Transaction E, Industrial Engineering*, 22(3): 12-42.

[2] Gao, L., & Pan, Q. K. (2016). A shuffled multi-swarm micro-migrating birds optimizer for a multi-resource-constrained flexible job shop scheduling problem. *Information Sciences*, 372: 655-676.

[3] Gonzalez, T., & Sahni, S. (1978). Flow shop and job shop schedules: complexity and approximation. *Operations research*, 26(1): 36-52.

[4] Du, J., & Leung, J.Y.T. (1990). Minimizing Total Tardiness on One Machine Is NP-Hard. *Mathematics of Operations Research*, 15(3): 483-495.

[5] Baker, K. R. (1974). Introduction to sequencing and scheduling. John Wiley & Sons.

[6] Brucker, P., & Schlie, R. (1990). Job-shop scheduling with multi-purpose machines. *Computing*, 45(4): 369-375.

[7] Shahsavari-Pour, N., & Ghasemishabankareh, B. (2013). A novel hybrid meta-heuristic algorithm for solving multi objective flexible job shop scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4): 771-780.

[8] Sobeyko, O., & Mönch, L. (2016). Heuristic approaches for scheduling jobs in large-scale flexible job shops. *Computers & Operations Research*, 68: 97-109.

[9] Rooyani, D., & Defersha, F. M. (2019). An Efficient Two-Stage Genetic Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling. IFAC PapersOnLine, 52(13): 2519–2524.

[10] Fakhrzad, M.B., & Alinezhad, E. (2013). Advanced planning and scheduling with a learning effect in the flexible job shop manufacturing system. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 1(1): 13-24.

[11] Nelson, R. T. (1967). Labor and machine limited production systems. *Management Science*, 13(9): 648-671.

[12] Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2010). Modelling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1): 75-84.

[13] Li, J., Sun, S., Huang, Y., & Wang, N. (2010, June). A hybrid algorithm for scheduling of dual-resource constrained job shop. Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE), 2010 International Conference on, 1: 235-238.

[14] Lobo, B. J., Hodgson, T. J., King, R. E., Thoney, K. A., & Wilson, J. R. (2013). An effective lower bound on Lmax in a worker-constrained job shop. *Computers & Operations Research*, 40(1): 328-343.

[15] Lei, D., & Guo, X. (2014). Variable neighborhood search for dual-resource constrained flexible job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 52(9): 2519-2529.

[16] Liu, X. X., Liu, C. B., & Tao, Z. (2011). Research on Bi-Objective Scheduling of Dual-Resource Constrained Flexible Job Shop. *Advanced Materials Research*, 211: 1091-1095.

[17] Lang, M., & Li, H. (2011). Research on dual-resource multi-objective flexible job shop scheduling under uncertainty. 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), Dengleng, China, 8-10 Aug. 2011, 1375-1378.

[18] Xianzhou, C., & Zhenhe, Y. (2011, March). An improved genetic algorithm for dual-resource

[29] Dhouib, E., Teghem, J., & Loukil, T. (2013). Lexicographic optimization of a permutation flow shop scheduling problem with time lag constraints. *International Transactions in Operational Research*, 20(2): 213-232.

[30] Sawik, T. (2007). A lexicographic approach to bi-objective scheduling of single-period orders in make-to-order manufacturing. *European Journal of Operational Research*, 180(3): 1060-1075.

[31] Palacios, J. J., González-Rodríguez, I., Vela, C. R., & Puente, J. (2015). Swarm lexicographic goal programming for fuzzy open shop scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(6): 1201-1215.

[32] Li, X., Peng, Z., Du, B., Guo, J., Xu, W., Zhuang, K. (2017). Hybrid artificial bee colony algorithm with a rescheduling strategy for solving flexible job shop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 113: 10-26.

[33] Gao, K.Z., Suganthan, P.N., Chua, T.J. Chong, C.S., Cai, T.X., Pan, Q.K. (2015). A two-stage artificial bee colony algorithm scheduling flexible job-shop scheduling problem with new job insertion. *Expert Systems with Applications*, 42 (21): 7652-7663.

[34] Li, J.Q., Pan, Q.K., Tasgetiren M.F. (2014). A discrete artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. *Applied Mathematical Modelling*, 38(3): 1111-1132.

[35] Thammano, A., Phu-ang, A. (2013). A Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm with Local Search for Flexible Job-Shop Scheduling Problem. *Procedia Computer Science*, 20: 96–101.

[36] Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [J]. Technical Report TR06. Turkey: Computer Engineering Department, Erciyes University.

[37] Gao, J., Gen, M., Sun, L. (2006). Scheduling jobs and maintenance in flexible job shop with a hybrid genetic algorithm, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(4): 493-507.

[38] Pezzella, F., Morganti, G., & Ciaschetti, G. (2008). A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 35(10): 3202-3212.

constrained flexible job shop scheduling. Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2011 International Conference on, 1: 42-45.

[19] Li, J.Q., Pan, S. Xie, S. Wang. (2011). A Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling Problems. International Journal of Computers, *Communications & Control*, 2: 286-296.

[20] Lian, Z., Jiao, B., & Gu, X. (2006). A similar particle swarm optimization algorithm for job-shop scheduling to minimize makespan. *Applied mathematics and computation*, 183(2): 1008-1017.

[21] Udaiyakumar, K. C., & Chandrasekaran, M. (2014). Application of firefly algorithm in job shop scheduling problem for minimization of makespan. *Procedia Engineering*, 97: 1798-1807.

[22] Yuan, Y., & Xu, H. (2013). An integrated search heuristic for large-scale flexible job shop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 40(12): 2864-2877.

[23] Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A., & Hajipour, V. (2013). A multi-objective facility location model with batch arrivals: two parameter-tuned meta-heuristic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-18.

[24] Bagheri, A., & Zandieh, M. (2011). Bi-criteria flexible job-shop scheduling with sequence-dependent setup times—variable neighborhood search approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(1): 8-15.

[25] Huang, R. H., & Yu, T. H. (2017). An effective ant colony optimization algorithm for multi-objective job-shop scheduling with equal-size lot-splitting. *Applied Soft Computing*, 57, 642-656.

[26] Zheng, F., & Wang, Zh. (2019). Bi-objective Flexible Job Shop Scheduling with Operation Overlapping Costs. *IFAC PapersOnLine*, 52(13): 893–898.

[27] Farahani, R. Z., SteadieSeifi, M., & Asgari, N. (2010). Multiple criteria facility location problems: A survey. *Applied Mathematical Modelling*, 34(7): 1689-1709.

[28] Mandow, L., & de la Cruz, J. P. (2001). A heuristic search algorithm with lexicographic goals. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14(6): 751-762.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Autumn and Winter 2020, Volume 8., No. 17., pp. 295-309
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2021.22227.1978

Dual Resource Constrained Flexible Job-Shop Scheduling with Lexicograph Objectives

Gh. Mokhtari[1*], M. Abolfathi[2]

1. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Qom University, Qom, Iran
2. M.A., Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Qom University, Qom, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 29 May 2019
Accepted 3 October 2019

***Keywords*:**

Dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem
Artificial bee colony algorithm
Total weighted tardiness
Maximum completion time

ABSTRACT

In this research, the dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem (DRCFJSP) is considered. Compared to the flexible job-shop scheduling, there is a limited research on DRCFJSP. The flexible job-shop scheduling problem is an extension of the classical job-shop scheduling problem by allowing an operation to be assigned to one of a set of eligible machines during scheduling. Hence, solving DRCFJSP not only needs to determine the processing sequences on machines and assign each operation to a machine, but also needs to determine a worker among a set of skilled workers for processing operation on the selected machine. The problem in this study was investigated to minimize two objectives consisting of total weighted tardiness and maximum completion time. The lexicographic approach is applied to compare the solutions and select the optimum solution. The first objective function is total weighted tardiness. DRCFJSP is strongly NP-hard, so a hybrid artificial bee colony algorithm is proposed to solve medium and large instances. In order to evaluate the performance of the proposed algorithm, computational studies have been conducted and compared with the results of the GAMS software. The results show that proposed hybrid algorithm has an appropriate performance for solving the DRCFJSP.

[*] Corresponding author. Gh. Mokhtari
Tel.: 025-32103520; E-mail address: g.mokhtari@qom.ac.ir