Original Article

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۱-۳۶، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۵۳-۶۳

مدل‌سازی و حل مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاه باز چندهدفه با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین

فریبرز مرادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
مهدی یزدانی * (استادیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

با توجه به رقابتی شدن بازار، تولیدکنندگان مجبور به افزایش کارایی و اثربخشی فعالیت‌های خود شده‌اند. در این راستا توجه به مسئله‌ی زمان‌بندی در محیط‌های تولیدی یک مبحث استراتژیک برای بقا در این بازار رقابتی است. از مهم‌ترین مسائل در حوزه‌ی زمان‌بندی، مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاه باز است که تا کنون در تحقیقات صورت گرفته در این خصوص، به منابع انسانی توجهی نشده است. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاه باز دوهدفه با منابع دوگانه‌ی محدود انسان و ماشین ارائه شده است. ابعاد کوچک مسئله با استفاده از روش دقیق محدودیت اپسیلون حل شده است. در ادامه با توجه به پیچیدگی حل و Np-hard بودن این مسئله، از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب و الگوریتم میرایی ارتعاش چندهدفه برای حل مسئله بهره گرفته‌ایم. تحلیل نتایج محاسباتی، بیانگر عملکرد و خروجی بهتر الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب است.

واژگان کلیدی: زمان‌بندی کارگاه باز، منابع دوگانه محدود انسان و ماشین، مدل‌سازی ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، بهینه‌یابی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب، الگوریتم میرایی ارتعاش چندهدفه.

fariborzmoradi212@yahoo.com
m_yazdani@qiau.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه صنایع تولیدی برای رقابت با بازارهای جهانی تحت فشار قرار دارند. کوتاه‌تر شدن چرخه‌ی عمر و دوره‌ی عرضه‌ی محصول به بازار، تولیدکنندگان را وادار به افزایش کارایی فعالیت‌ها و فرایندهای تولید کرده است. مشتریان عنصر کلیدی برای سیستم‌های تولیدی و خدماتی هستند. این سیستم‌ها برای بقا باید خود را با نظرات مشتری سازگار کنند و برای رقابت در بازار باید جنبه‌های مثبت بیشتری در تولید و خدمات نسبت به سایر رقیبان خود داشته باشند تا بتوانند نظر مشتری را برای همراهی با خود جلب کنند. در این بین برخی سیاست‌ها می‌تواند منجر به افزایش قابلیت سازگاری در سیستم‌ها شود. از جمله‌ی این سیاست‌ها بهره‌گیری از مزایای اقتصادی حاصل از پیامدهای استقرار سیستم‌های تولید پیشرفته و ایجاد توانایی سیستم‌ها در انطباق با تحولات سریع بازار بر اثر تغییر سریع ذائقه‌ی مشتری است. با توجه به شرح ذکر شده از شرایط بازار، داشتن یک فرایند زمان‌بندی و توالی عملیات کارا، برای بقا در فضای تجارت ضروری است. از این رو توجه به مسائل زمان‌بندی در بسیاری از مسائل مدیریتی و اصول برنامه‌ریزی اهمیت به سزایی یافته است. محیط‌های کارگاهی نظیر کار کارگاهی[1] و جریان کارگاهی[2] در بسیاری از فرایندهای صنعتی و خدماتی استفاده می‌شود. در یک سیستم تولید کارگاهی هر کار دارای یک مسیر پردازش ثابت از پیش تعیین شده است. در عمل گاهی این اتفاق می‌افتد که مسیر پردازش کار اهمیتی ندارد و تصمیم‌گیری به عهده‌ی شخصی است که زمان‌بندی را انجام می‌دهد. آن‌جا که مسیر کارها باز است و محدودیتی در ارتباط با مسیر پردازش هر کار روی ماشین‌های کارگاه وجود ندارد، این مدل را «کارگاه باز[3]» می‌نامند. در زمان‌بندی این کارگاه هر کار مجاز است مسیر پردازش خود را داشته باشد و مسیر پردازش کارهای مختلف می‌تواند متفاوت از هم باشد. از آن‌جا که در محیط‌های دنیای واقعی، محیط کارگاه باز نیز رخ می‌دهد، ارائه‌ی مدل مناسب و دقیق کمک بزرگی خواهد بود به مدیران و صنعتگرانی که با این محیط‌ها رو به رو می‌شوند. از نمونه مسائل زمان‌بندی کارگاه‌های باز که در دنیای واقعی رخ می‌دهد می‌توان اشاره کرد به: کلینیک‌های دندان‌سازی برای کارهای مختلف، مجموعه تعمیرگاهی اتومبیل (باطری‌سازی، صافکاری، تعمیر موتور و ...)، فرایند تسویه‌حساب‌های دانشجویی در دانشگاه‌ها و ... با توجه به تفاسیر یاد شده، در مسئله‌ی زمان‌بندی در محیط کارگاه باز با مجموعه عملیاتی مواجه‌ایم که در آنها ترتیب خاصی رعایت نمی‌شود. بنابراین فضای حل مسئله به طور قابل ملاحظه‌یی از فضای حل مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی و زمان‌بندی جریان کارگاهی بزرگ‌تر است.

از طرفی با بررسی پیشینه‌ی مسئله به نظر می‌رسد پژوهشگران توجه کم‌تری

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۳/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۱/۳۰، پذیرش ۱۳۹۹/۲/۱۰.
DOI:10.24200/J65.2020.53187.1982

نسبت به مسائل زمان‌بندی کارگاه باز داشته‌اند. در اکثر زمان‌بندی‌های موجود در ادبیات تنها تجهیزات کارگاهی نظیر ماشین‌ها به عنوان منابع محدود در نظر گرفته شده است، اما در واقعیت ما با منابع محدود انسان و ماشین در کنار یکدیگر مواجه هستیم. سیستم‌هایی که در آن بحث کاربرد دو منبع نیروی انسانی و ماشین برای تهیه‌ی برنامه‌ی زمان‌بندی وجود دارد و منابع اشاره شده به طور محدود در نظر گرفته می‌شود، سیستم‌های با منابع دوگانه‌ی محدود (DRC) [۴] نامیده شده‌اند.[۱] در این سیستم‌ها نیروی انسانی صرفاً یک نقش کمکی ندارد بلکه سیستم متکی بر نیروی انسانی است و بدون وجود و دسترسی به نیروی انسانی، پردازش کارها عملاً غیر ممکن است. در این‌گونه سیستم‌ها علاوه بر این که ماشین‌ها همیشه در دسترس نیستند، کارگران نیز به علت مشغول بودن در ایستگاه‌های مختلف و حرکت بین ایستگاه‌ها ممکن است در دسترس نباشند. همچنین در این سیستم‌ها تعداد نیروهای کاری کم‌تر از تعداد ماشین‌هاست (حداقل یک کارگر وجود دارد که قادر است روی بیشتر از یک ماشین کار کند). بنابراین تصمیمات زمان‌بندی در محیط DRC هم ظرفیت ماشین و هم دسترس‌پذیری نیروی انسانی را باید در نظر بگیرد.[۲] نلسون[۳] یکی از پیشگامان تحقیق در زمینه‌ی سیستم‌های تولیدی با محدودیت منابع انسان و ماشین با عنوان محیط DRC بود که این مسئله را مورد مطالعه قرار داد. گنزالس و ساهنی[۴] مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاه باز با دو ماشین و مجاز بودن قطع کار و هدف کمینه‌سازی طولانی‌ترین زمان تکمیل را مورد بررسی قرار دادند و یک الگوریتم زمان خطی برای این مسئله ارائه کردند. خوری و میریال[۵] جنبه‌ی پیچیدگی مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاه‌های باز را مورد بررسی قرار دادند و ثابت کردند این مسئله NP-hard است. ژیجون و جیانینگ[۶] یک روش بهینه‌سازی هوشمند را که بر اساس الگوریتم ژنتیک ایجاد شده بود برای مسئله‌ی زمان‌بندی کارکارگاهی با منابع دوگانه‌ی محدود (DRCJSP) [۵] به کارگرفتند. یزدانی و همکاران[۷] مسئله‌ی زمان‌بندی کارکارگاهی منعطف با دو منبع محدود انسان و ماشین (DRCFJSP) [۶] را مورد مطالعه قرار دادند. آنها یک مدل ریاضی برای مسئله ارائه کردند و یک الگوریتم فراابتکاری برای حل آن پیشنهاد کردند. در انتها ثابت شده الگوریتم ارائه شده روشی مؤثر برای حل این مسئله است.

لی و جیوئو[۸] برای حل مسئله‌ی DRCFJSP، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر (VNS) [۷] را ارائه کردند. نتایج محاسباتی مزیت قابل توجهی از الگوریتم VNS در حل مسئله را نشان می‌دهد. دمینگ و ژیوپنگ[۹] مسئله‌ی DRCJSP را با زمان پردازش بازه‌یی و منابع ناهمگون بررسی کردند. توابع هدف کمینه کردن طولانی‌ترین زمان تکمیل و کمینه کردن ردپای کربن بود و از روش لکسیکوگرافیکی بهره گرفته شد. جینگیائو و همکاران به منظور حل مسئله‌ی DRCJSP و با هدف کمینه‌سازی طولانی‌ترین زمان تکمیل و هزینه، الگوریتم ژنتیک جمعیت منشعب (BPGA) [۸] را ارائه دادند و استراتژی زمان‌بندی بر اساس فشرده کردن پنجره زمانی به منظور بهبود عملکرد زمان‌بندی سراسری پیشنهاد شده است. ژانگ و همکاران[۱۰] یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هیبرید گسسته جدید برای حل مسئله‌ی DRCJSP با انعطاف پذیری منابع معرفی کردند و نتایج حاصله اثربخشی الگوریتم پیشنهادی را صحه گذاری می‌کرد. ژونگ و همکاران[۱۱] شبیه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی برای مسئله‌ی DRCJSP را مورد بررسی و واکاوی قرار دادند. این تحقیق به منظور بهینه‌سازی این مسئله تحت شرایط تولید پیچیده مطرح شد و اهدافی که در نظر گرفته شده بودند طولانی‌ترین زمان تکمیل و مجموع هزینه پردازش بود. نوری و همکاران[۱۲] تحقیقات انجام گرفته در زمینه بهینه‌سازی مسائل DRCJSP و DRCFJSP را تا سال ۲۰۱۹ مورد تحلیل و بررسی قرار داده و الگوی طبقه‌بندی برای کارهای صورت گرفته در این زمینه مطرح کردند. با توجه به پژوهش‌های انجام گرفته، تا کنون هدف بیشتر مطالعات به کارگیری مبحث منابع دوگانه محدود انسان و ماشین در زمان‌بندی مسائل کارکارگاهی و کارکارگاهی منعطف و جریان کارگاهی بوده است و به کارگیری مبحث DRC در مسائل زمان‌بندی کارگاه‌های باز با توجه به دانش نگارنده تا کنون صورت نگرفته است. از آن‌جایی که واحدهای تولیدی و مراکز خدماتی به صورت هم‌زمان در پی کاهش هزینه‌های تولید و افزایش رضایت مشتریان هستند یکی از مواردی که بر این اساس حائز اهمیت است، کمینه‌سازی میانگین زمان تکمیل کارها است که به طور مستقیم و غیر مستقیم بر هزینه‌های واحد تولیدی/خدماتی تأثیرگذار است. همچنین یکی از مواردی که باعث رضایت مشتری می‌شود تحویل به موقع سفارش او است. کمینه‌سازی زمان دیرکرد، معیاری برای سنجش تاخیر در تحویل به موقع کالا یا خدمت به مشتری از سوی کارخانه‌ها و مراکز خدماتی است. بنابراین ارائه مدل ریاضی حالت دوهدفه مسئله‌ی مورد نظر با اهداف کمینه‌سازی میانگین زمان تکمیل کارها و کمینه‌سازی زمان دیرکرد کارها و سپس حل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر رویکرد پارتو از جمله الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب و الگوریتم میرایی ارتعاشات چندهدفه موضوع اصلی این پژوهش است.

۲. تعریف مسئله

در این قسمت به معرفی مسئله و بیان مفروضات موجود در آن پرداخته می‌شود. مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاه باز با منابع دوگانه‌ی محدود انسان و ماشین (DRCOSSP) [۹] عبارت است از برنامه‌ریزی اجرای n کار روی m ماشین توسط q کارگر. پردازش کارها به دو منبع ماشین و انسان محدود می‌شود. هر کار J_i از m عملیات $(O_{i,1}, O_{i,2}, ..., O_{i,m})$ تشکیل شده، که این عملیات بدون توجه به روابط پیش‌نیاز، به صورت آزادانه اجرا می‌شود. هر عملیات $O_{i,j}$، عملیات jام از کار iام است که می‌تواند تنها روی ماشینی که شماره‌ی آن با شماره‌ی عملیاتش برابر است پردازش شود (به دلیل نحوه‌ی مدل‌سازی)؛ به عنوان مثال O_{12} که عملیات دوم از کار اول است، تنها روی ماشین دوم می‌تواند پردازش شود. همچنین S_k نشان‌دهنده‌ی مجموعه کارگرانی است که توانایی انجام کار روی ماشین kام را دارند. اهداف به کارگرفته شده در این مدل کمینه‌سازی میانگین دیرکرد کارها و کمینه‌سازی میانگین زمان تکمیل کارهاست. این دو تابع هدف معادل نیستند و ارتباطی بین آنها وجود ندارد؛ به همین دلیل برای بهینه‌سازی چندهدفه انتخاب شده‌اند. زیرا اهدافی که در مسائل چندهدفه باید برای بهینه‌سازی هم‌زمان انتخاب شوند نباید هم‌راستا و معادل باشند. میانگین زمان تکمیل کارها یک شاخص مبتنی بر زمان تکمیل کارهاست. در کمینه‌سازی میانگینِ زمانِ تکمیلِ کارها ما به واریانس زمان‌های تکمیل کارها توجهی نداریم؛ در حقیقت با کمینه‌سازی آن سعی بر این داریم که میانگین زمان کارهای در جریان ساخت را کمینه و در نتیجه میانگین زمان کارکرد ماشین‌ها و میانگین انرژی مصرفی که تابعی از زمان کارکرد ماشین‌آلات است را کمینه کنیم. میانگین دیرکرد کارها یک شاخص مبتنی بر موعد تحویل کارهاست و با کمینه‌سازی میانگین دیرکرد کارها سعی بر این است که میانگین نارضایتی مشتریان ناشی از تحویل کارها به آنان دیرتر از موعد تحویل کاهش یافته و در مجموع میانگین رضایت مشتریان را افزایش یابد. این معیار بهینه‌سازی زمانی مهم است که تنها برای دیرکرد جریمه داشته باشیم و برای زودکرد پاداشی در نظر نگرفته باشیم. مفروضات مسئله عبارت است از:

تمامی کارها مستقل از هم بوده و می‌توانند از زمان صفر شروع شوند. تمامی ماشین‌ها و کارگران از زمان صفر در دسترس‌اند. یک ماشین در یک لحظه‌ی زمانی تنها

می‌تواند یک عملیات را انجام دهد. کارگر می‌تواند از ماشینی به ماشین دیگر منتقل شود اما در طول پردازش یک عملیات نمی‌تواند ماشین را ترک کند. هر کارگر می‌تواند روی بیش از یک ماشین کار کند و هر ماشین می‌تواند توسط کارگران متفاوت کنترل شود. امکان انجام هر عملیات توسط ماشین‌ها و کارگران متفاوت وجود دارد؛ در حالی که زمان پردازش متفاوت و قطعی خواهد بود. هر پردازش احتیاج به هر دو منبع ماشین و کارگر دارد. زمان آماده‌سازی و زمان جابه‌جایی بین ماشین‌ها نادیده گرفته شده است. زمان خرابی ماشین‌آلات و زمان نگهداری تعمیرات آنها نادیده گرفته شده است. هر کار از ترتیب ماشینیِ دلخواهی پیروی می‌کند. دو هدف ذکر شده اهمیت یکسانی در تصمیم‌گیری دارند. یک کار نمی‌تواند به طور هم‌زمان روی بیش از یک ماشین پردازش شود. عملیات یک کار می‌تواند به هر ترتیبی پردازش شود؛ قطع کار مجاز نیست. تعداد نیروی انسانی از تعداد ماشین‌ها کم‌تر است.

۳. مدل‌سازی ریاضی

دراین بخش، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) [۱۰] برای مسئله‌ی DRCOSSP ارائه شده است. نمادهای کاربردی در این مدل‌سازی عبارت‌اند از:

۱.۳. اندیس‌ها

i, j: شماره کارها؛

r, s: شماره عملیات‌های کارها؛

k, b: شماره ماشین‌ها؛

h: شماره کارگرها؛

۲.۳. پارامترها

n: تعداد کارها؛

m: تعداد ماشین‌ها و تعداد عملیات‌های هر کار؛

q: تعداد کارگران؛

d_i: موعد تحویل کار iام؛

S_k: مجموعه کارگرانی که توانایی انجام کار روی ماشین kام را دارند؛

$P_{i,r,k,h}$: زمان پردازش عملیات $O_{i,r}$ روی ماشین kام توسط کارگر hام؛

M: عدد مثبت بزرگ.

۳.۳. متغیرهای تصمیم

$Y_{i,r,s}$= اگر عملیات $O_{i,r}$ مقدم باشد به عملیات $O_{i,s}$ عدد ۱ و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.

$X_{i,r,j,s}$= اگر عملیات $O_{i,r}$ مقدم باشد به عملیات $O_{j,s}$ عدد ۱ و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.

$F_{i,r,k,h}$= اگر عملیات $O_{i,r}$ روی ماشین k ام توسط کارگر h ام انجام گیرد عدد ۱ و در غیر این صورت عدد صفر تعلق می‌گیرد.

$St_{i,r}$= متغیر پیوسته برای زمان شروع پردازش عملیات کارها؛

$C_{i,r}$= متغیر پیوسته برای زمان تکمیل پردازش عملیات کارها؛

C_i= متغیر پیوسته برای زمان تکمیل کار i ام؛

T_i= متغیر پیوسته برای زمان دیرکرد کار i ام.

۴.۳. توابع هدف

$$MIN\,Z_1 = \left(\frac{1}{n}\right) \times \left(\sum_{i=1}^{n} T_i\right) \tag{1}$$

$$MIN\,Z_2 = \left(\frac{1}{(n \times m)}\right) \times \left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{r=1}^{m} C_{ir}\right) \tag{2}$$

۵.۳. محدودیت‌ها

$$\sum_{k}\sum_{h\in S_k} F_{irkh} = 1 \qquad \forall i, r | r = k \tag{3}$$

$$St_{ir} + \sum_{h\in S_k} F_{irkh}.P_{irkh} - d_i \leq T_i \qquad \forall i, r, k | r = k \tag{4}$$

$$St_{ir} + \sum_{h\in S_k} F_{irkh}.P_{irkh} \leq C_{ir} \qquad \forall i, r, k | r = k \tag{5}$$

$$st_{ir} + \sum_{h\in S_k} F_{irkh}.P_{irkh} - M(1 - Y_{irs})$$
$$-M.(2 - \sum_{h\in S_k} F_{irkh} - \sum_{h\in S_b} F_{isbh}) \leq St_{is}$$
$$\forall i, r, k, b, s | r = k, s = b, s \neq r \tag{6}$$

$$st_{ir} + \sum_{h\in S_k} F_{irkh}.P_{irkh} - M(1 - X_{irjs})$$
$$-M.(2 - \sum_{h\in S_k} F_{irkh} - \sum_{h\in S_k} F_{jskh}) \leq St_{js}$$
$$\forall i, r, k, s, j | j \neq i, r = k, r = s \tag{7}$$

$$st_{ir} + \sum_{k} F_{irkh}.P_{irkh} - M(1 - X_{irjs})$$
$$-M.(2 - \sum_{k} F_{irkh} - \sum_{b} F_{jsbh}) \leq St_{js} \forall i, j, h, s, r | j \neq i \tag{8}$$

$$X_{irjs} + X_{jsir} = 1 \qquad \forall i, r, j, s | j \neq i, r = s \tag{9}$$

$$Y_{irs} + Y_{isr} = 1 \qquad \forall i, r, s | s \neq r \tag{10}$$

$$C_{im} \leq C_i \tag{11}$$

$$C_i - d_i \leq T_i \tag{12}$$

$$X_{irjs}, Y_{irs}, F_{irkh} = \{0, 1\} \tag{13}$$

$$St_{ir} \geq 0, C_{ir} \geq 0, C_i \geq 0, T_i \geq 0 \tag{14}$$

رابطه‌ی ۱ تابع هدف اول مسئله برای کمینه‌سازی میانگین دیرکرد کارهاست. رابطه‌ی ۲ تابع هدف دوم مسئله برای کمینه‌سازی میانگین زمان تکمیل کارهاست. مهم‌ترین موضوع در خصوص این دو رابطه این است که دو هدف با هم در تضادند. رابطه‌ی ۳ به عنوان محدودیت مسئله است به این صورت که هر عملیات توسط چه کارگری پردازش شود یا به عبارت دیگر هر عملیات از هر کار روی هر ماشین توسط یک کارگر پردازش شود. رابطه‌ی ۴ محدودیت مسئله برای تعریف رابطه‌ی بین زمان شروع پردازش و زمان پردازش و موعد تحویل کارها و زمان دیرکرد کارهاست. رابطه‌ی ۵ به عنوان محدودیت مسئله، رابطه‌ی بین زمان شروع پردازش و زمان پردازش و زمان تکمیل پردازش را درکارگاه مشخص می‌کند. رابطه‌ی ۶ ارتباط توالی بین دو عملیات

متوالی از یک کار را با توجه به رابطه‌ی ۱۰ مشخص می‌کند که بر اساس آن، در یک زمان دو عملیات از یک کار به صورت همزمان پردازش نشوند و بیشینه یکی پردازش شود. رابطه‌ی ۷ ارتباط زمانی دو عملیات مربوط به دوکار متفاوت را با هم مشخص می‌کند، اگر دو عملیات توسط یک ماشین پردازش شود. با توجه به رابطه‌ی ۹، در این صورت هر ماشین در زمانی مشخص، بیشینه یک عملیات را پردازش می‌کند. رابطه‌ی ۸ ارتباط زمانی دو عملیات مربوط به دو کار متفاوت را با هم مشخص می‌کند، اگر دو عملیات توسط یک کارگر پردازش شوند. با توجه به رابطه‌ی ۹، در این صورت یک کارگر در یک زمان بیشینه یک عملیات را پردازش می‌کند. رابطه‌ی ۹ رابطه‌ی ترتیبی بین دو عملیات روی یک ماشین را بیان می‌کند. رابطه‌ی ۱۰ رابطه‌ی ترتیبی بین دو عملیات متوالی از یک کار را بیان می‌کند. رابطه‌ی ۱۱ زمان تکمیل نهایی کار iام را محاسبه می‌کند. رابطه‌ی ۱۲ زمان دیرکرد کار را محاسبه می‌کند. رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ شرایط باینری بودن و غیر منفی بودن متغیرها را مطرح می‌کنند.

۴. الگوریتم‌های توسعه داده شده

مسئله‌ی DRCOSSP از مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی پیچیده است و از آن‌جا که این مسئله جزء مسائل NP-hard است[5] ارائه‌ی روشی دقیق برای بهینه‌سازی مسئله‌ی مورد نظر در یک زمان منطقی، بسیار سخت و دور از ذهن است. در این پژوهش از دو الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر پارتو با نام‌های الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)[۱۳] و الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاش چندهدفه (MOVDO)[۱۴] استفاده شده است که هریک از این الگوریتم‌ها با عملگرهای خاص خود و انتخاب نقاط مختلف، فضای پاسخ مسئله را جستجو می‌کند.

۱.۴. الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های اکتشافی حل مسئله است که از مدل‌های زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به جای یافتن بهترین جواب تک‌بعدی، دسته‌یی از بهترین جواب‌ها را ارائه می‌کند که با نام جبهه‌پارتو شناخته می‌شوند. این دو عملگر عبارت‌اند از:

- عملگری که یک معیار برتری بر اساس رتبه‌بندی نامغلوب و جبهه‌بندی به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد.
- عملگری که تنوع جواب و پراکندگی آنها را در میان جواب‌های با رتبه برابر حفظ می‌کند.

در حالت کلی می‌توان اجزای الگوریتم NSGA-II را به چند بخش اساسی تقسیم کرد:

- رویکرد سریع رتبه‌بندی نامغلوب؛
- تخصیص فاصله‌ی ازدحام؛
- عملگر انتخاب مسابقه‌یی ازدحام؛
- رویه‌ی اصلی الگوریتم ژنتیک.

۲.۴. الگوریتم میرائی ارتعاشات چندهدفه (MOVDO)

الگوریتم میرایی ارتعاشات (VDO) یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری است که با استفاده از مفاهیم میرایی نوسان در نظریه‌ی ارتعاشات توسعه یافته است. در این تحقیق، حالت چندهدفه‌ی الگوریتم میرایی ارتعاشات برای مسئله‌ی پیشنهادی توسعه داده می‌شود. در فضای گسسته برای حل مسئله با استفاده از الگوریتم میرایی ارتعاشات چهارقدم مهم باید طی شود:

- کدینگ مسئله؛
- تعریف تابع برازندگی؛
- تعریف سازوکار تولید حل همسایه.
- تعریف برنامه‌ی میرا کردن ارتعاش، که طبق این برنامه باید دامنه‌ی نوسان کاهش یابد، به نحوی که یک تابع نزولی نسبت به زمان در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا امکان تولید جواب‌های بیشتر در دامنه‌ی نوسان بالا زیاد است اما با کاهش دامنه‌ی نوسان امکان تولید جواب‌ها کاهش می‌یابد.

پارامترهای الگوریتم میرایی ارتعاشات چندهدفه شامل تعداد تکرار، تعداد جمعیت، دامنه‌ی اولیه ($A_۰$)، بیشترین تعداد تکرار در هر دامنه (L)، ضریب میرائی (γ) و انحراف استاندارد (σ) است. پارامترهای تعداد تکرار و تعداد جمعیت تأثیر به سزایی در کیفیت جواب به دست آمده توسط الگوریتم دارند.

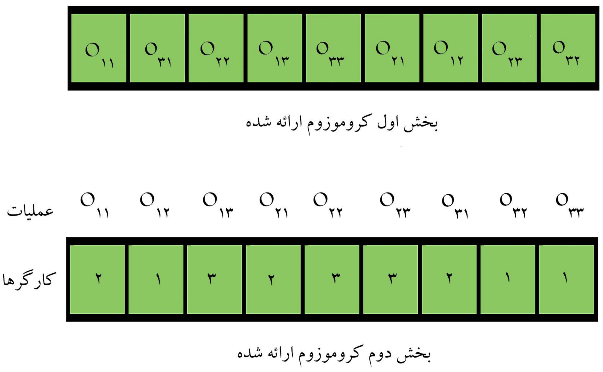
۳.۴. نحوه‌ی نمایش جواب الگوریتم‌ها

مهم‌ترین بخش مربوط به جزئیات الگوریتم‌های فراابتکاری نحوه‌ی نمایش جواب‌هاست. شیوه‌ی نمایش جواب ارائه شده دارای دو بخش است:

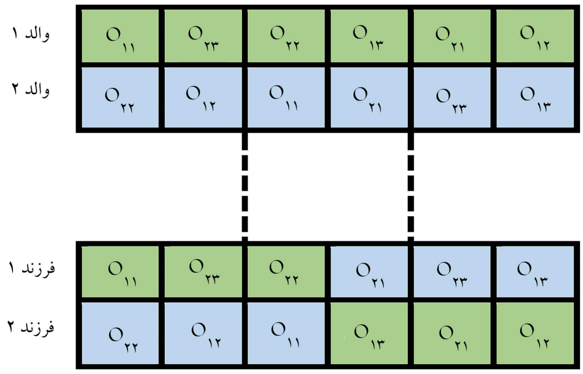
- بخش اول نشان‌دهنده‌ی توالی انجام عملیات کارهاست. در صورتی که مسئله دارای n کار و هرکار دارای m عملیات باشد، بخش اول جواب به صورت برداری و دارای یک سطر و n × m ستون است. در بخش اول شکل ۱، نمونه‌یی از این ماتریس برای ۳ کار و ۳ عملیات/ماشین را مشاهده می‌کنید O_{ir} نشان‌دهنده‌ی عملیات rام از کار iام است.
- بخش دوم از نمایش جواب دارای یک سطر و n × m ستون است که ستون‌ها نشان‌دهنده‌ی عملیات به ترتیب عملیات موجود در بخش اول جواب است. اعداد موجود در این سطر نشان‌دهنده‌ی تخصیص هر عملیات از هرکار به یک کارگر است. در تخصیص هر عملیات از هرکار به یک کارگر، بر اساس پارامتر S_k آن عملیات از آن کار را به یکی از کارگرهایی که توانایی پردازش آن عملیات از آن کار را داشته باشد، اختصاص می‌دهیم. درکروموزوم ارائه شده در شکل ۱، نمونه‌یی از بخش دوم نمایش جواب با این شرط که $n = ۳$ و $q = ۳$ و $m = ۳$ و $n_i = ۳$، نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، عملیات ۱ از کار ۱ بر روی ماشین ۱ توسط کارگر ۲ پردازش می‌شود؛ عملیات ۲ از کار ۱ بر روی ماشین ۲ توسط کارگر ۱ پردازش می‌شود. لازم به ذکر است در شیوه‌ی نمایش جواب مسئله‌ی کارگاه باز، وضعیت تخصیص ماشین‌ها مشخص نمی‌شود زیرا در این مسئله هر عملیات با توجه به شماره‌ی خودش به ماشین هم‌شماره برای پردازش تخصیص داده می‌شود.

۴.۴. عملگر تقاطع برای الگوریتم NSGA-II

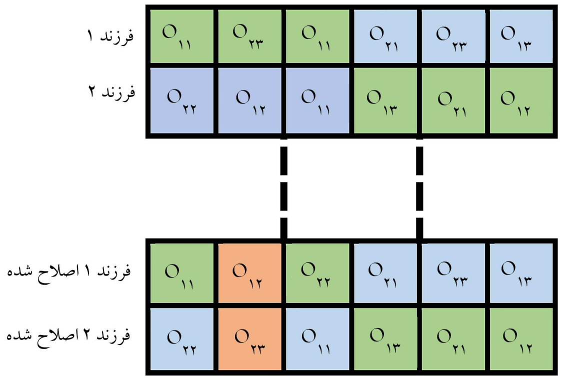
در الگوریتم ارائه شده، از تقاطع یک نقطه‌یی استفاده شده است. به عنوان مثال، در شکل ۲، بخش اول کروموزوم برای والد ۱ و والد ۲ نشان داده شده است؛ سپس از تقاطع آنها دو فرزند جدید حاصل شده است.



شکل ۱. بخش اول و دوم کروموزوم ارائه شده.



شکل ۲. عملگر تقاطع/تولید مثل دو جواب از دو والد.

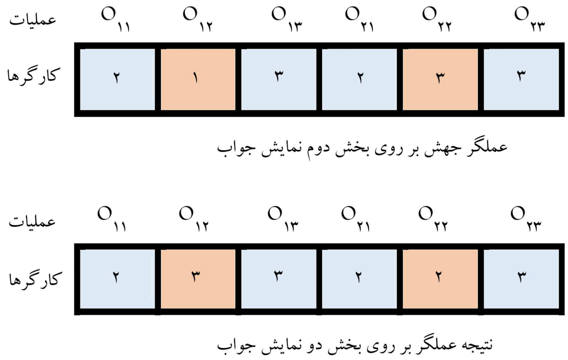


شکل ۳. عملگر تقاطع اصلاح شده.

پس از انجام تقاطع، فرزند اول دارای دو ژن $O_{۲۳}$ است؛ ژن $O_{۱۲}$ در فرزند ۱ وجود ندارد، فرزند ۲ دارای دو ژن $O_{۱۲}$ است و ژن $O_{۲۳}$ در فرزند دوم وجود ندارد. لذا جواب‌های تولید شده نشدنی هستند. بنابراین برای اصلاح این جواب‌ها، ابتدا ژن‌های ۲ بار تکرار شده در هر دو فرزند را پیدا می‌کنیم. سپس اولین درایه از فرزند ۱ که ۲ بار تکرار شده است را حذف کرده و مقدار ژنی که در فرزند دوم ۲ بار تکرار شده را به جای آن قرار می‌دهیم. سپس در فرزند دوم، اولین درایه‌یی که ۲ بار تکرار شده است را انتخاب کرده و مقدار ژنی که ۲ بار در فرزند ۱ تکرار شده را به جای آن قرار می‌دهیم. جواب اصلاح شده مطابق شکل ۳ است.

بر روی بخش دوم نمایش جواب نیز همانند شکل ۲ عمل تقاطع یک نقطه‌یی انجام می‌شود، بدین صورت که والدهای انتخاب شده در بخش اول نمایش جواب را در نظر گرفته و کارگران تخصیص داده شده در بخش دوم نمایش جواب آنها را از یک نقطه تصادفی برای شکست ترکیب می‌کنیم. بر اساس تعریفی که از این بخش نمایش جواب شده بود ژن‌های موجود در این کروموزم از سمت چپ به راست بر اساس ترتیب عملیات کارهای موجود بنا شده بود، به این صورت که اولین ژن از سمت چپ، کارگر تخصیص داده شده به عملیات اول ازکار اول و دومین ژن، کارگر تخصیص داده شده به عملیات دوم ازکار اول و ... را نمایش می‌داد. با توجه به این تعریف هنگامی که در دوکروموزم یک نقطه‌ی متناظر برای جهش انتخاب می‌شود، حصول جواب غیر موجه امکان ندارد.

شکل ۴. عملگر جابه‌جایی/تعویض و معکوس‌سازی برای جهش.



شکل ۵. عملگر جهش و نتیجه‌ی عملگر روی بخش دوم نمایش جواب.

۵.۴. عملگر جهش برای الگوریتم NSGA-II

در این پژوهش برای جهش بر روی بخش اول نمایش جواب از دو عملگر تعویض و معکوس‌سازی استفاده شده است (قسمت بالا و پایین شکل ۴).

جهش روی بخش دوم نمایش جواب به این صورت اعمال می‌شود: درصد مشخصی از ژن‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و تخصیص آنها به ماشین‌ها وکارها به صورت تصادفی تغییر می‌کند. فرض کنید $n \times m$ برابر با ۶ باشد و درصد متغیرهایی که بر روی آنها جهش اعمال می‌شود ۰٫۳ باشد. بنابراین $۱/۸ = ۶ \times ۰/۳$ و این نتیجه به سمت نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد شده که همان عدد ۲ است و روی ۲ متغیر عملیات جهش اعمال می‌شود. فرض کنید مطابق شکل ۵، عملیات ۲ و ۵ به صورت تصادفی انتخاب شده باشند، لذا کروموزم جدید پس از تغییر وضعیت تخصیص کارگران این دو عملیات، به صورت قسمت پایین شکل ۵ تولید می‌شود.

خاطر نشان می‌شود در تخصیص عملیات انتخاب شده به کارگرها، همانند بخش تولید جواب اولیه، باید به مقادیر ماتریس S_k دقت شود، بدین صورت که کارگری که به صورت تصادفی تغییر می‌کند قادر به انجام آن عملیات باشد.

۶.۴. ساختار همسایگی برای الگوریتم MOVDO

با توجه به این‌که در الگوریتم MOVDO از یک کروموزم برای ایجاد همسایگی استفاده می‌شود، ساختار همسایگی استفاده شده مشابه ساختار عملگر جهش در الگوریتم NSGA-II است. بر این اساس برای ایجاد همسایگی در بخش اول نمایش جواب از دو عملگر تعویض و معکوس‌سازی استفاده می‌شود و در بخش دوم نمایش جواب، درصد مشخصی از ژن‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده و تخصیص آنها به ماشین‌ها و کارها به صورت تصادفی تغییر می‌کند.

خاطر نشان می‌شود در تخصیص عملیات انتخاب شده به کارگرها، همانند بخش تولید جواب اولیه، باید به مقادیر ماتریس S_k دقت شود، بدین صورت که کارگری که به صورت تصادفی تغییر می‌کند قادر به انجام آن عملیات باشد.

۷.۴. شرط توقف در الگوریتم‌های NSGA-II و MOVDO

در روش NSGA-II و MOVDO پیشنهادی، شرط توقف را رسیدن به زمان محاسباتی خاصی در نظر می‌گیریم که این زمان به صورت تجربی از مشاهده‌ی نمودار همگرایی و میانگین زمان همگرایی الگوریتم‌ها بعد از چندین بار اجرا در ابعاد مختلف مسئله حاصل شده است. این زمان برای مسائل با ابعاد کوچک ۳۰۰ ثانیه و برای مسائل با ابعاد متوسط ۶۰۰ ثانیه و برای مسائل با ابعاد بزرگ ۹۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

۸.۴. معیارهای مقایسه‌ی کارایی الگوریتم‌ها

ما در این پژوهش برای مقایسه‌ی کارایی عملکرد الگوریتم‌ها از چهار شاخص متفاوت بهره جستیم:[۱۵-۱۸]

- تعداد اعضای جبهه‌ی پارتو (NOS) [۱۱]
- متوسط فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل (MID) [۱۲]
- شاخص پراکندگی[۱۳]
- شاخص یکنواختی فضا[۱۴]

۹.۴. تنظیم پارامتر الگوریتم‌های پیشنهادی

از آن‌جا که الگوریتم‌های غیردقیق و فراابتکاری متضمن یافتن جواب بهینه‌ی سراسری نیستند، ممکن است در هر بار استفاده از این الگوریتم‌ها به جواب‌های متفاوتی برسیم و عملکرد متفاوتی را از الگوریتم مشاهده کنیم. لذا یک الگوریتم فراابتکاری زمانی خوب عمل می‌کند که در هر بار استفاده به جواب‌های مشابهی برسد. تأثیرگذارترین پارامترها در الگوریتم NSGA-II تعداد جمعیت اولیه (nPop)، نرخ تقاطع (Pc)، نرخ جهش (Pm) است، در حالی که در الگوریتم MOVDO تعداد جمعیت اولیه (nPop)، دامنه‌ی اولیه ($A_\circ$) و بیشترین تعداد تکرار در هر دامنه (L) تأثیرگذارترین پارامترهاست. با استفاده از روش تاگوچی پارامترهای این الگوریتم‌ها را تنظیم خواهیم کرد.

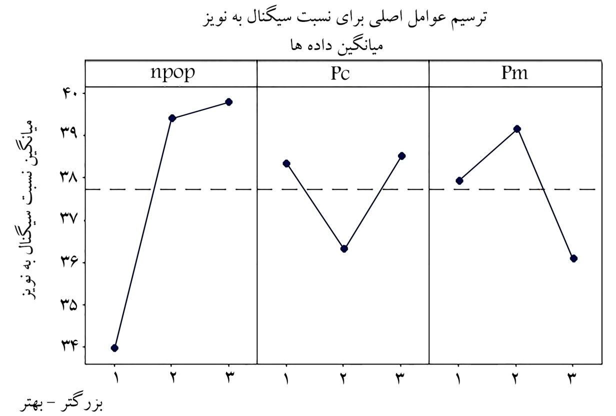
چنان که بیان شد، در الگوریتم NSGA-II سه عامل/پارامتر nPop، Pc و Pm و در الگوریتم MOVDO سه عامل nPop، $A_\circ$ و L باید در سطوح بهینه تنظیم شوند. برای این منظور، ابتدا برای هر پارامتر سه سطح کم ۱، متوسط ۲ و زیاد ۳ را در نظر می‌گیریم که در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. سپس مجموعه آزمایش‌های پیشنهادی روش تاگوچی برای ۳ عامل در ۳ سطح محاسبه شده است که ۲۷ حالت مختلف بوده و برای ۳ مسئله با ابعاد مختلف با الگوریتم‌های NSGA-II و MOVDO حل می‌کنیم.

جدول ۱. مقداردهی به عوامل/پارامترهای NSGA-II در سه سطح.

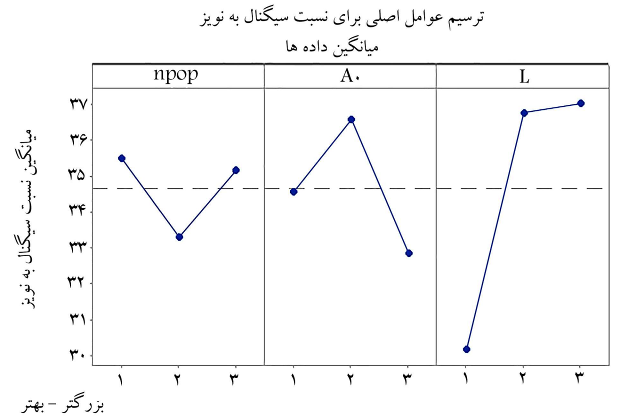
پارامتر/عامل NSGA – II	سطح کم (۱)	متوسط (۲)	سطح زیاد (۳)
NPop	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
Pc	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۷
Pm	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۳

جدول ۲. مقداردهی به عوامل/پارامترهای MOVDO در سه سطح.

پارامتر/عامل MOVDO	سطح کم (۱)	متوسط (۲)	سطح زیاد (۳)
NPop	۵۰	۷۰	۱۰۰
$A_\circ$	۴	۶	۸
L	۳	۵	۷



شکل ۶. نسبت S/N تنظیم پارامترها به روش تاگوچی برای الگوریتم NSGA-II.



شکل ۷. نسبت S/N تنظیم پارامترها به روش تاگوچی برای الگوریتم MOVDO.

در مرحله‌ی آخر بر اساس معیار متوسط فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل که از مهم‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌هاست؛ به عنوان متغیر پاسخ، نرخ S/N محاسبه می‌شود و سطوح بهینه‌ی پارامترهای ورودی مشخص می‌شود. برای انجام این کار از نرم افزار Minitab ۱۸ استفاده شده و خروجی نرم‌افزار در شکل ۶ و ۷ ارائه شده و نتایج حاصل در جدول‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. سطوح بهینه‌ی تعیین شده برای الگوریتم **NSGA-II**.

	نرخ جهش	نرخ تقاطع	جمعیت اولیه
الگوریتم	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۳
NSGA-II	۰/۲	۰/۷	۱۵۰

جدول ۴. سطوح بهینه‌ی تعیین شده برای الگوریتم **MOVDO**.

	بیشترین تکرار در هر دامنه	دامنه‌ی اولیه	جمعیت اولیه
الگوریتم	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱
MOVDO	۷	۶	۵۰

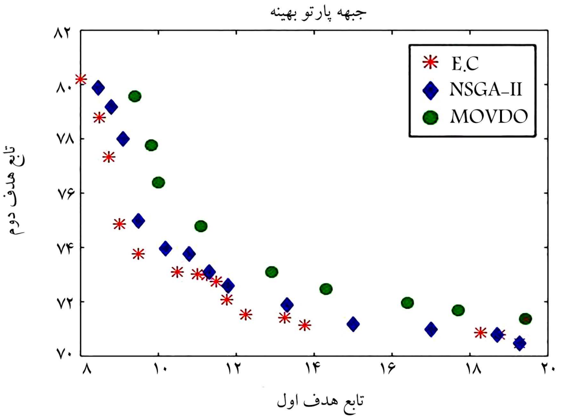
۴.۱۰. نتایج محاسباتی

به منظور آنالیز مدل پیشنهادی و انجام مطالعات محاسباتی تعداد ۳۰ مسئله در ابعاد کوچک (۱۰ مسئله)، متوسط (۱۰ مسئله) و بزرگ (۱۰ مسئله) ایجاد و طراحی شد. زمان پردازش عملیات‌ها در این مسائل به صورت تصادفی در بازه عددی {۱،۹۹} در نظر گرفته شده است. در تمام مسائل تعداد کارگران از تعداد ماشین‌آلات کم‌تر فرض شده است. جزئیات مسائل ایجاد شده در جدول ۵ و ۷ شرح داده شده است. چنان که گفته شد، مدل ریاضی ارائه شده به صورت دوهدفه است و به دلیل تضاد در رفتار اهداف نسبت به یکدیگر، در نرم‌افزار ۲۴.۸.۲ GAMS win۶۴ با روش محدودیت اپسیلون یا همان $\epsilon -$ Constraint حل شده است. این روش برای حل ۱۰ مثال اول در یک زمان محاسباتی منطقی کاربرد داشته است که نتایج شاخص‌های چهارگانه برای آن در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین نتایج برای دو الگوریتم NSGA-II و MOVDO در این جدول ارائه شده است.

یادآور می‌شود الگوریتم‌های ارائه شده در این بخش، بر روی نرم‌افزار MATLAB R۲۰۱۶b کدنویسی شده و روی لپ‌تاپ با حافظه‌ی داخلی ۸ گیگابایت و پردازنده‌ی مرکزی ۲.۴۰ Core i۷ اجرا شده است.

در ادامه، به منظور ارائه‌ی تحلیل آماری دقیق‌تر از نتایج حاصل شده از اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی، ابتدا آزمون نرمال بودن را برای نتایج مسائل با ابعاد کوچک با توجه به کل شاخص‌ها اجرا می‌کنیم. برای این منظور از آزمون شاپیرو ـ ویلک بهره گرفتیم. با توجه به نتایج آزمون شاپیرو ـ ویلک مشخص شد که برای رد نرمال بودن نتایج تعدادی از شاخص‌های مورد ارزیابیِ روش‌های حل، دلایل کافی وجود دارد. در نتیجه به دلیل رد شدن فرض نرمال بودن داده‌ها از آزمون‌های غیر پارامتری استفاده شد.

برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از الگوریتم‌های NSGA-II، MOVDO و روش $\epsilon -$ Constraint روی مسائل با اندازه‌ی کوچک در هر چهار معیار مورد ارزیابی، از آزمون غیر پارامتری کروسکال ـ والیس[15] استفاده شد. در این آزمون فرض صفر حاکی از برابر بودن میانه‌ها است. نتایج در جدول ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار α در تمام آزمایش‌ها برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. عدم رد (قبول) شرط H_0 به این معنی است که میانه‌ها با هم برابر هستند و رد فرض H_0 به این معنی است که میانه‌ها با هم برابر نبوده و اختلاف معناداری بین آنها وجود دارد. با توجه به نتایج آزمون کروسکال ـ والیس در هر چهار معیار، مقدار P-value به دست آمده بیشتر از ۰/۰۵ شده است. در نتیجه در مسائل با ابعاد



شکل ۸. جبهه‌ی پارتویی حاصل شده برای مسئله‌ی شماره ۹ توسط سه روش حل.

کوچک بین میانگین نتایج سه روش از نقطه نظر هر ۴ معیار اختلاف معناداری وجود ندارد.

بنابراین با استناد به نتایج جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت دو الگوریتم فراابتکاری ارائه شده، در مقایسه با روش محدودیت اپسیلون، عملکرد قابل قبولی از خود بر جای گذاشته‌اند و می‌توان به نتایج این دو الگوریتم در ابعاد متوسط و بزرگ این مسئله اعتماد کرد و جواب‌های نزدیک به بهینه از آنها انتظار داشت. در ادامه، جبهه‌ی پارتویی حاصله توسط روش‌های NSGA-II و MOVDO و $\epsilon -$ Constraint (EC) برای مسئله‌ی شماره ۹ در شکل ۸ آورده شده است.

چنان که گفته شد روش $\epsilon -$ Constraint تنها می‌تواند در مسائل با ابعاد کوچک در زمان منطقی به جواب بهینه برسد و در ابعاد متوسط و بزرگ مسئله با توجه به پیچیدگی مسئله و NP-hard بودن آن،[5] کارایی خود را با توجه به زمان محاسباتی از دست می‌دهد. در نتیجه این روش برای حل مسائل متوسط و بزرگ مورد ارزیابی قرار نمی‌گیرد و از نتایج آن فقط برای صحت کارایی الگوریتم‌ها در بخش حل مسائل کوچک استفاده کردیم.

در جدول ۷ نتایج محاسباتی حل ۱۰ مسئله با ابعاد متوسط و ۱۰ مسئله با ابعاد بزرگ توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOVDO ثبت شده است. برای هر مسئله‌ی حل شده توسط الگوریتم‌ها، چهار معیار توضیح داده شده برای بررسی عملکرد الگوریتم‌ها محاسبه شده است. بر اساس نتایج حاصله از الگوریتم‌ها برای حل این ۲۰ مسئله، ما الگوریتم‌ها را از نقطه نظر هر معیار به صورت جداگانه با هم مقایسه می‌کنیم تا متوجه شویم کدام الگوریتم در کدام معیار مورد ارزیابی، عملکرد قوی‌تری از خود به نمایش گذاشته است. برای بررسی فرض نرمال بودن مجددا از آزمون شاپیرو ـ ویلک بهره گرفته شد. با توجه به نتایج آزمون شاپیرو ـ ویلک مشخص شد که برای رد نرمال بودن نتایج همه معیارهای مورد ارزیابی روش‌های حل، دلایل کافی وجود نداشته و تفاوت معناداری مشاهده نشد. بر اساس نتایج حاصل از آزمون نرمال بودن داده‌ها، داده‌های مذکور نرمال هستند و بر این اساس می‌توان از آزمون‌های پارامتریک برای مقایسه‌ی دو به دوی نتایج حاصل از الگوریتم NSGA-II و MOVDO استفاده کرد؛ بدین منظور از آزمون t-student استفاده می‌کنیم. قبل از این که این آزمون مورد استفاده قرار گیرد از آزمونی برای بررسی فرضیه‌ی همگنی واریانس‌ها استفاده می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده فرض صفر (برابری واریانس‌ها) را نمی‌توانیم رد کنیم و واریانس‌ها برابر است. در این‌جا باید از فرض برابری واریانس‌ها استفاده

جدول ۵. نتایج محاسباتی برای ۱۰ مسئله با ابعاد کوچک حاصل از الگوریتم‌های NSGA-II و MOVDO و روش محدودیت اپسیلون.

مشخصات مسئله				الگوریتم NSGA − II				الگوریتم MOVDO				ϵ − Constraint			
شماره مسئله	تعداد کارها	تعداد عملیات/ماشین	تعداد کارگرها	متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل	شاخص یکنواختی فضا	شاخص پراکندگی	تعداد اعضا جبهه پارتو	متوسط فاصله از نقطه ایدآل	شاخص یکنواختی فضا	شاخص پراکندگی	تعداد اعضا جبهه پارتو	متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل	شاخص یکنواختی فضا	شاخص پراکندگی	تعداد اعضا جبهه پارتو
۱	۲	۲	۱	۱۱۵٫۱۵	۱٫۰۳	۲۹٫۲۴	۲	۱۱۵٫۱۵	۱٫۰۳	۲۹٫۲۴	۲	۱۱۵٫۱۵	۱٫۰۳	۲۹٫۲۴	۲
۲	۲	۳	۲	۵۸٫۳۴	۱٫۲۳	۵٫۲۳	۲	۵۸٫۳۴	۱٫۲۳	۵٫۲۳	۲	۵۸٫۳۴	۰٫۰۰۱	۵٫۲۳	۲
۳	۲	۴	۳	۱۰۷٫۴	۲٫۰۱	۹٫۷۰	۲	۱۱۲٫۱۱	۴٫۳	۱۰٫۶۰	۳	۱۰۴٫۴	۲٫۳۸	۲۵٫۳۵	۳
۴	۳	۲	۱	۱۰۴٫۴۷	۲٫۲	۷٫۸۶	۲	۱۰۴٫۴۷	۲٫۲	۷٫۸۶	۲	۱۰۴٫۴۷	۲٫۲	۷٫۸۶	۲
۵	۳	۳	۲	۹۱٫۸۹	۱٫۹۸	۱۳٫۵۷	۲	۹۱٫۸۹	۱٫۹۸	۱۳٫۵۷	۲	۹۱٫۸۹	۱٫۹۸	۱۳٫۵۷	۲
۶	۳	۴	۳	۶۳٫۰۴	۲٫۲۸	۱۴٫۱۰	۵	۷۸٫۱۲	۲٫۴۴	۷٫۱۷	۴	۶۰٫۸۲	۲٫۱۶	۱۱٫۸۶	۴
۷	۴	۳	۲	۹۶٫۹	۵٫۸۷	۱۶٫۳۲	۴	۱۴۲٫۰۹	۶٫۳۲	۲۰٫۹۲	۴	۹۳٫۷۰	۵٫۴۶	۱۸٫۵۲	۴
۸	۴	۴	۳	۹۲٫۸۳	۱٫۷۸	۱۴٫۷۸	۸	۱۲۹	۱٫۶۰	۱۲٫۸۹	۸	۸۷٫۵۹	۱٫۶۲	۱۶٫۹۴	۱۰
۹	۴	۵	۴	۸۸٫۴	۱٫۰۱	۱۳٫۲	۱۳	۱۰۷٫۲۳	۱٫۲۳	۱۲٫۹۸	۹	۷۴٫۵۶	۰٫۵۹	۱۴٫۸۵	۱۶
۱۰	۵	۴	۳	۱۰۵٫۱۲	۲٫۱۸	۱۹٫۳۳	۱۱	۱۱۲٫۸۹	۲٫۳۴	۱۷٫۸۱	۹	۱۰۵٫۱۲	۲٫۱۸	۱۹٫۳۳	۱۶

جدول ۶. نتایج مربوط به آزمون کروسکال ـ والیس.

تفاوت معنی‌دار	نتیجه	P − value	روش حل	شاخص
×	عدم رد فرض H_0	۰٫۲۵۴	NSGAII VS MOVDO ϵ − VS Constraint	متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل
×	عدم رد فرض H_0	۰٫۸۰۴	NSGAII VS MOVDO ϵ − VS Constraint	شاخص یکنواختی فضا
×	عدم رد فرض H_0	۰٫۵۴۶	NSGAII VS MOVDO ϵ − VS Constraint	شاخص پراکندگی
×	عدم رد فرض H_0	۰٫۹۷۱	NSGAII VS MOVDO ϵ − VS Constraint	تعداد اعضا جبهه پارتو

کنیم. نتایج حاصل از آزمون t-student در جدول ۸ گردآوری شده است. لازم به ذکر است که مقدار α در تمام آزمایش‌ها برابر با ۰٫۰۵ در نظر گرفته شده است.

- **معیار متوسط فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل (MID)**

با توجه به نتایج آزمون t-student موجود در جدول ۸، در معیار متوسط فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل مقدار P-value کم‌تر از ۰٫۰۵ و شرط H_0 رد شده است؛ بین میانگین نتایج روش‌های حل نیز اختلاف معنادار وجود دارد. با توجه به این که معیار متوسط فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل ماهیت منفی داشته و هرچه مقدار کم‌تری داشته باشد بهتر است، الگوریتم NSGA-II در این معیار عملکردی بهتری نسبت به الگوریتم MOVDO در مسائل متوسط و بزرگ داشته است.

- **معیار یکنواختی فضا (Spacing)**

در معیار یکنواختی فضا بر اساس مقدار P-value حاصله در جدول ۸، بین میانگین نتایج الگوریتم‌های NSGA-II و MOVDO اختلاف معناداری وجود ندارد.

- **معیار پراکندگی (Diversity)**

در معیار پراکندگی نیز بر اساس مقدار P-value به دست آمده در جدول ۸، بین میانگین نتایج روش‌های حل اختلاف معناداری وجود ندارد.

- **معیار تعداد اعضا جبهه پارتو (NOS)**

با توجه به نتایج موجود در جدول ۸، در معیار تعداد اعضا جبهه پارتو مقدار P-value کم‌تر از ۰٫۰۵ و شرط H_0 رد شده و در نتیجه اختلاف معناداری بین میانگین نتایج روش‌های حل وجود دارد. بر این اساس با توجه به این که معیار NOS دارای ماهیتی مثبت بوده و مقدار آن هرچه بیش‌تر باشد بهتر است، به این نتیجه می‌رسیم که در این معیار الگوریتم NSGA-II عملکردی بهتری نسبت به الگوریتم MOVDO در مسائل متوسط و بزرگ داشته است.

جدول ۷. نتایج محاسباتی برای ۲۰ مسئله با ابعاد متوسط و بزرگ حاصل از الگوریتم‌های NSGA-II و MOVDO.

مشخصات مسئله				الگوریتم $NSGA-II$				الگوریتم MOVDO			
شماره مسئله	تعداد کارها	تعداد عملیات/ماشین	تعداد کارگرها	متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل	شاخص یکنواختی فضا	شاخص پراکندگی	تعداد اعضا جبهه پارتو	متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل	شاخص یکنواختی فضا	شاخص پراکندگی	تعداد اعضا جبهه پارتو
۱۱	۵	۵	۴	۹۰٫۰۹	۵٫۳۲	۳۴٫۲۱	۹	۹۴٫۲۳	۵٫۹۸	۳۲٫۱۲	۸
۱۲	۵	۶	۵	۹۱٫۷۰	۴٫۳	۳۵٫۸۷	۵	۱۲۰٫۳	۳٫۲	۳۲٫۹۱	۴
۱۳	۶	۵	۳	۳۰۲٫۸	۶٫۷	۱۶٫۴۰	۱۱	۵۶۱٫۱۲	۷٫۳	۱۵٫۲۳	۶
۱۴	۶	۶	۴	۲۲۵٫۴۸	۷٫۴۸	۴۱٫۱۶	۱۰	۴۱۳٫۱۷	۷٫۹۲	۳۷٫۰۹	۶
۱۵	۶	۷	۵	۲۳۸٫۵	۷٫۵۶	۴۴٫۲	۱۰	۴۵۶٫۷۸	۸٫۳۴	۴۲٫۹	۹
۱۶	۷	۶	۴	۲۶۷٫۳	۸٫۵۶	۵۰٫۰۱	۹	۴۹۰٫۰۱	۹٫۴۵	۴۵٫۶	۸
۱۷	۷	۷	۵	۲۷۹٫۱۱	۸٫۹۷	۵۸٫۹۲	۱۰	۵۱۲٫۴۸	۹٫۸۶	۵۱٫۲۰	۱۰
۱۸	۷	۸	۶	۲۹۱٫۴۹	۹٫۲۸	۶۷٫۳۶	۱۱	۵۲۴٫۰۷	۹٫۹۳	۵۷٫۲۷	۹
۱۹	۸	۷	۴	۳۰۱٫۲	۹٫۵۶	۷۴٫۳۹	۱۰	۵۴۸٫۳۹	۱۰٫۳۸	۶۵٫۳۹	۸
۲۰	۸	۸	۵	۳۲۰٫۹	۱۰٫۳۴	۸۹٫۰۳	۱۳	۵۸۶٫۲۸	۱۰٫۸۷	۷۶٫۴۷	۷
۲۱	۸	۹	۶	۳۸۹٫۰۱	۱۲٫۳۹	۱۱۰٫۹۲	۱۱	۶۷۸٫۱	۱۳٫۲۹	۹۳٫۲۸	۹
۲۲	۹	۸	۵	۴۰۹٫۸	۱۳٫۲۸	۱۲۳٫۴	۱۲	۶۹۹٫۲۲	۱۴٫۹۲	۱۰۷٫۹۳	۱۰
۲۳	۹	۹	۶	۴۳۱٫۲۹	۱۳٫۸۳	۱۳۷٫۲	۱۰	۷۱۹٫۲۹	۱۵٫۶۳	۱۲۳٫۲۹	۱۰
۲۴	۹	۱۰	۷	۴۵۱٫۴۶	۱۴٫۲۷	۱۶۰٫۱	۱۴	۷۶۳٫۰۴	۱۶٫۴۸	۱۴۵٫۸	۱۲
۲۵	۱۰	۹	۵	۴۹۲٫۱۹	۱۵٫۰۹	۱۸۹٫۲	۱۱	۷۹۱٫۰۴	۱۶٫۷۸	۱۶۰٫۳۸	۱۱
۲۶	۱۰	۱۰	۶	۵۲۸٫۵	۱۶٫۲۸	۲۰۲٫۳۸	۹	۸۰۶٫۴۸	۱۷٫۴۸	۱۷۶٫۵	۷
۲۷	۱۰	۱۱	۷	۵۶۰٫۴۹	۱۷٫۰۹	۲۳۱٫۲۳	۱۲	۸۳۹٫۰۲	۱۷٫۷۹	۱۹۸٫۴۱	۱۱
۲۸	۱۱	۱۰	۶	۵۷۳٫۲	۱۷٫۲۰	۲۴۷٫۲۹	۱۲	۸۵۱٫۷	۱۸٫۰۱	۲۱۲٫۳۱	۱۰
۲۹	۱۱	۱۱	۷	۶۱۱٫۲	۱۸٫۱۹	۲۵۸٫۹	۱۰	۸۹۰٫۱	۱۸٫۵۸	۲۲۰٫۲	۱۰
۳۰	۱۱	۱۲	۸	۶۵۶	۱۹٫۲۸	۳۰۹٫۳۸	۱۲	۹۴۵٫۰۸	۱۹٫۳۷	۲۶۷٫۲	۹

جدول ۸. نتایج مربوط به آزمون t-student.

تفاوت معنی‌دار	نتیجه	Pvalue	الگوریتم‌ها	شاخص
✓	رد فرض H_0	۰٫۰۰۱	NSGAII VS MOVDO	متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل
×	عدم رد فرض H_0	۰٫۵۷۸	NSGAII VS MOVDO	شاخص یکنواختی فضا
×	عدم رد فرض H_0	۰٫۵۴۳	NSGAII VS MOVDO	شاخص پراکندگی
✓	رد فرض H_0	۰٫۰۰۴	NSGAII VS MOVDO	تعداد اعضا جبهه پارتو

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مسئله‌ی DRCOSSP را در حالت دوهدفه به عنوان یک مسئله‌ی Np-hard بررسی کردیم. نتایج حاصل از این مطالعه مشخص کرد که تاکنون تحقیق و پژوهشی در زمینه‌ی حل مسئله‌ی DRCOSSP انجام نگرفته است. بنابراین با توجه به شکاف تحقیقاتی در این زمینه و نیز ضرورت توجه به منابع انسانی در امر زمان‌بندی انجام کارها در محیط کارگاهی باز، بر آن شدیم به تحقیق و پژوهش در این زمینه بپردازیم. در ابتدا یک مدل ریاضی دوهدفه با اهداف متناقض کمینه‌سازی میانگین دیرکرد کارها و کمینه‌سازی میانگین زمان تکمیل کارها را برای مسئله‌ی DRCOSSP ارائه کردیم. در ادامه تحقیق دو الگوریتم تکاملی چندهدفه مبتنی بر رویکرد پارتو یعنی NSGAII و MOVDO برای حل این مسئله توسعه داده شد. سپس تنظیم پارامترهای این دو الگوریتم بر اساس روش تاگوچی صورت پذیرفت. برای ارزیابی عملکرد نتایج حاصل از دو الگوریتم مذکور، از شاخص‌های تعداد اعضای جبهه پارتو، متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل، شاخص پراکندگی و شاخص یکنواختی فضا استفاده شد. هر چهار معیار برای حل ۳۰ مثال عددی تصادفی در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ توسط الگوریتم‌های MOVDO و NSGA-II بررسی شد. روش محدودیت اپسیلون در مثال‌های با ابعاد کوچک در هر چهار شاخص عملکرد خوبی نسبت به دو الگوریتم ارائه شده دیگر داشت، ولی با افزایش ابعاد مسئله‌ی زمان حل این روش به شکل چشمگیری افزایش یافت و در حل مسائل متوسط و بزرگ کارایی اولیه خود را از دست داد. در مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ، الگوریتم NSGA-II نتایج بهتری نسبت به MOVDO در معیارهای متوسط فاصله از نقطه ایده آل و تعداد اعضای جبهه پارتو ارائه کرد و در معیارهای پراکندگی و یکنواختی فضا تفاوت معناداری از جهت برتری عملکرد بین دو الگوریتم مشاهده نشد. در مرور ادبیات انجام شده مشخص شد بیشتر محققین در حوزه‌ی

زمان‌بندی کارگاهی تنها ماشین‌آلات را به عنوان یک منبع محدود در نظر می‌گیرند و میل کم‌تری به دخیل کردن منابع انسانی در این حوزه نشان داده‌اند. بنابراین مطالعه در خصوص مسئله‌ی زمان‌بندی کارگاه باز با منابع دوگانه‌ی محدود انسان و ماشین درکنار هم می‌تواند زمینه را برای انجام مطالعات بیشتر در مورد مسائل زمان‌بندی در محیط DRC فراهم کند.

برای انجام تحقیقات آتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. مدل‌سازی ریاضی مسئله‌ی DRCOSSP با در نظر گرفتن اثرات یادگیری کارگران مبتنی بر موقعیت و مبتنی بر مجموع زمان پردازش کارها؛

۲. مدل‌سازی ریاضی مسئله‌ی DRCOSSP با در نظر گرفتن زمان جابه‌جایی کارگران روی ماشین‌ها و زمان‌های استراحت ناشی از خستگی کارگران؛

۳. لحاظ کردن محدودیت‌های فرایندی نظیر نگهداری و تعمیرات و خرابی ماشین‌ها و پارامترهای بازه‌یی برای مسئله‌ی DRCOSSP.

پانوشت‌ها

1. job shop
2. flow shop
3. open shop
4. dual resource constrained (DRC)
5. dual resource constrained job shop scheduling problem (DRCJSP)
6. dual resource constrained flexible job shop scheduling problem (DRCFJSP)
7. variable neighborhood search (VNS)
8. branch population genetic algorithm
9. dual resource constrained open shop scheduling problem (DRCOSSP)
10. mixed-integer linear programming (MILP)
11. number of soltion (NOS)
12. mean of ideal distance (MID)
13. diversity
14. spacing
15. Kruskal–Wallis test

منابع (References)

1. ElMaraghy, H., Patel, V. and Ben Abdallah, I. "Scheduling of manufacturing systems under dual-resource constraints using genetic algorithms", *Journal of Manufacturing Systems*, **19**, pp. 186-198 (2000).
2. Jingyao, L., Shudong, S., Yuan, H. and Ganggang, N. "Research on double-objective optimal scheduling algorithm for dual resource constrained job shop", *Artificial Intelligence and Computational Intelligence, Lecture Notes in Computer Science* , **6319**, pp. 222-229 (2010).
3. Nelson, R.T., "Labor and machine limited production systems", *Management Science*, **13 135**(9), pp. 648-671 (1967).
4. Gonzalez, T. and Sahni, S. "Open shop scheduling to minimize finish time", *Journal of the Association for Computing Machinery*, **23**, pp. 665-679 (1976).
5. Khuri, S. and Miryala , S.R. "Genetic algorithms for solving open shop scheduling problems", *Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag*, **1695**, pp. 357-368 (1999).
6. Zhijun, S. and Jianying, Zh. "Intelligent optimization for job shop scheduling of dual-resources", *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, **35**, pp. 376-381 (2005).
7. Yazdani, M., Zandieh, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. and et al. "Two meta-heuristic algorithms for the dual-resource constrained fexible job-shop scheduling problem", *International Journal of Science and Technology*, **22**, pp. 1242-1257 (2015).
8. Lei, D. and Guo, X. "Variable neighbourhood search for dual-resource constrained flexible job shop scheduling", *International Journal of Production Research*, **52**(9), pp. 2519-2529 (2014).
9. Deming , L. and Xiuping , G. "An effective neighborhood search for scheduling in dual-resource constrained interval job shop with environmental objective", *International Journal of Production Economics*, **159**, pp. 296-303 (2015).
10. Zhang, J., Wang, W. and Xu, X. "A hybrid discrete particle swarm optimization for dual-resource constrained job shop scheduling with resource flexibility", *J Intell Manuf*, **28** , pp. 1961-1972 (2017).
11. Zhong, Q., Yang, H. and Tang, T. "Optimization algorithm simulation for dual-resource constrained job-shop scheduling", *International Journal of Simulation Modeling*, **17**, pp. 147-1580 (2018).
12. Nouri, H., Dhiflaoui, M. and Belkahla-Driss, O. "Dual resource constraints in classical and flexible job shop problems: a state of the art review" , *Procedia Computer Science*, **126**, pp. 1507-1515 (2019).
13. Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and et al. "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization NSGA-II", *Proceedings of the Parallel Problem Solving From Nature VI (PPSN-VI) Conference*, pp. 849-858 (2000).
14. Hajipour, V., Mehdizadeh, E. and Tavakkoli-Moghaddam, R. "A vibration damping-based multi-objective optimization algorithm: MOVDO", *Iranian Conference on Fuzzy Systems*, **13**, pp. 71-80 (2013).
15. Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T. and Zandieh, M. "A multi-phase covering paretooptimal front method to multi-objective scheduling in a realistic hybrid flowshop using a hybrid metaheuristic", *Expert Systems with Applications*, **36**(8), pp. 11057-11069 (2009).

16. Van Veldhuizen, D.A. "Multi-objective evolutionary algorithms: classifications, analyses, and new innovations", *Faculty of the Graduate School of Engineering of the air Force Institute of Technology, Air University, Dissertation AFIT/DS/ENG/99-01* (1999).

17. Schott, J. "Fault tolerant design using single and multi-criteria genetic algorithms optimization", *Master's thesis. Department of Aeronautics and Astronautics. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge.*, MA (1995).

18. Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M. and et al. "Performance assessment of multiobjective optimizers", *An Analysis and Review, IEEE T Evolut Comput*, **7**(2), pp. 117-131 (2003).