توسعه روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله زمانبندی نیروی انسانی در محیط جریان کارگاهی

فاطمه بزرگ‌نژاد[۱]، ابراهیم اسدی گنگرج[۲،*] و محمدمهدی پایدار[۳]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۳

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۳

واژگان کلیدی:

جریان کارگاهی،

زمان‌بندی نیروی انسانی مدل،

ریاضی خطی عدد صحیح،

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات،

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید.

چکیده

در این تحقیق مسئله یکپارچه زمان‌بندی کارها و نیروی انسانی در محیط جریان کارگاهی مورد بررسی قرار گرفته است که در آن تعدادی نیروی انسانی با مهارت‌های مختلف وجود دارند که قابلیت انجام کارهای متفاوت با سرعت‌های مختلف را دارند. هدف مسئله تعیین زمان‌بندی کارها در مراحل مختلف و تخصیص نیروی انسانی به این مراحل است به گونه ای که بیشنه زمان تکمیل کارها (Cmax) کمینه شود. برای این منظور یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط ارائه شده است که این مدل در نرم‌افزار CPLEX اجرا شده است که می‌تواند مسائل با ابعاد کوچک را در مدت زمان معقول حل کند؛ اما به دلیل NP-hard بودن مسئله، این نرم‌افزار قادر به تولید جواب‌های بهینه برای مسائل با ابعاد بزرگ نمی‌باشد. برای این منظور، دو روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه شده است؛ چون احتمال قرار گرفتن الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در بهینه محلی زیاد است، عملکرد این الگوریتم با استفاده از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA) بهبود داده شده است (IPSO). نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم IPSO عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم PSO در تمامی ابعاد دارد و با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله برتری الگوریتم IPSO محسوس‌تر می‌باشد.

۱-مقدمه

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی در هر جنبه‌ای، یک انقلاب در صرفه‌جویی در زمان به حساب می‌آید که کاربردهای گسترده‌ای در محیط‌های تولیدی و خدماتی دارد. زمانبندی، اختصاص منابع برای اجرای مجموعه‌ای از کارها در یک دوره زمانی مشخص می‌باشد. یافتن یک برنامه زمان‌بندی بهینه در محیط‌های کاری با توجه به محدودیت-های و شاخص‌های عملکردی می‌تواند بسیار آسان یا بسیار مشکل باشد [۱]. زمان‌بندی تأثیر زیادی بر افزایش کارایی و دسترسی به اهداف دارد به گونه‌ای که زمان‌بندی مؤثر، سبب بهبود معیارهای عملکردی خط تولید نظیر خروجی خط، هزینه‌های تولید، درصد استفاده از ایستگاه گلوگاه و رضایت‌مندی مشتریان خواهد شد [۲]. یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در زمان‌بندی، تخصیص نیروی انسانی به فعالیت‌ها در طول افق زمان‌بندی می‌باشد. یکی از مواردی که سبب کاهش کارایی مدل‌های زمان‌بندی توسعه یافته برای محیط‌های تولیدی می‌شود، در نظر نگرفتن نیروی انسانی حین انجام فرآیند زمان‌بندی کارها می‌باشد. معمولاً در محیط‌های صنعتی واقعی، ابتدا کارها بر روی ماشین‌های مختلف زمان‌بندی می‌شود و سپس نیروی انسانی به

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: e.asadi@nit.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

ماشین‌ها یا ایستگاه‌های کاری تخصیص داده می‌شود. این عدم یکپارچگی هم می‌تواند سبب عدم امکان‌پذیری برنامه زمان‌بندی و هم بهینه نبودن برنامه زمان‌بندی ارائه شده شود. بنابراین توسعه یک مدل زمان‌بندی که به صورت همزمان هم زمان‌بندی کارها به ماشین‌ها و هم تخصیص نیروی انسانی به ماشین‌ها را در نظر بگیرد، می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای، سبب افزایش کارایی مدل‌های زمان‌بندی توسعه یافته شود.

در این تحقیق مسئله یکپارچه زمان‌بندی کارها و تخصیص نیروی انسانی در محیط جریان کارگاهی[1] در نظر گرفته شده است. در یک خط تولید با چیدمان جریان کارگاهی، تعداد مشخصی از کارها با مراحل کاری مختلف در دسترس است که در هر مرحله یک ماشین وجود دارد که کارها باید بر روی همه ماشین‌ها فرآیند شود و از خط تولید خارج شوند. هر یک از نیروی‌های انسانی در دسترس، می‌تواند هر کدام از کارها را بر روی هر کدام از ماشین‌ها با مدت زمان فرآیند مشخصی، پردازش نماید. در این تحقیق هر نیروی انسانی به یک ماشین تخصیص می‌یابد و هر ماشین در هر لحظه می‌تواند فقط یکی از کارها را پردازش کند. قطع عملیات کارها بر روی ماشین‌ها مجاز نیست و همچنین ماشین‌ها در طول افق برنامه‌ریزی در دسترس هستند و خراب نمی‌شوند. هدف این تحقیق تعیین برنامه تخصیص نیروی انسانی به ایستگاه‌های کاری و زمان‌بندی و تعیین توالی کارها است، به گونه‌ای که دیرترین زمان تکمیل کارها کمینه شود.

همان‌گونه که اشاره شد در اکثر مسائل زمان‌بندی موجود در ادبیات و همچنین برنامه‌های زمان‌بندی ارائه شده در محیط‌های کاری واقعی، تنها تجهیزات کارگاهی نظیر ماشین‌ها به عنوان منبع محدود در نظر گرفته شده‌اند و محدودیت‌هایی نظیر دسترس‌پذیری کارکنان و مهارت‌های مربوط به آنها جهت اجرای فرایندها نادیده گرفته شده است؛ در حالی که در واقعیت، در نظر گرفتن هر دو منبع انسان و ماشین در کنار هم، در تنظیم برنامه زمان‌بندی و اجرای عملیات سیستم مؤثرند، به گونه‌ای که این مسئله در سال‌های اخیر مورد توجه تعدادی از محققان قرار گرفته است.

سجادی و همکاران مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی را مورد بررسی قراردادند. آنها مسئله را با سه فرض مختلف شامل ۱) کمینه کردن وزن کلی تأخیرها با فرض در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی برای کارها، ۲) کمینه کردن دیرترین زمان تکمیل کارها با در نظر گرفتن فرض زمان‌های وقفه و ۳) کمینه کردن دیرترین زمان تکمیل کارها با فرض در نظر گرفتن زمان راه‌اندازی وابسته به‌توالی در نظر گرفتند و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مسئله ارائه دادند [۳]. شاه‌ناظری و همکاران مسئله زمان‌بندی نیروی انسانی دو هدفه را مورد بررسی قرار دادند که هدف آن کمینه‌کردن جریمه حاصل از تخصیص کارکنان در سطح مهارت پائین‌تر از مهارت واقعی-شان و بیشینه نمودن مطلوبیت کارکنانی که تمایل به کار کردن در یک سطح مهارت خاص در برخی شیفت‌ها یا برخی روزها دارند، است. در این تحقیق کارکنان به دو گروه متخصص و سه سطح مهارت در هر تخصص طبقه‌بندی می‌شوند که در مدل ارائه شده برخی از قواعد کاری ضروری را اجرا می‌کنند. همچنین آنها، یک رویه حل مبتنی بر مطلوبیت مقادیر تابع هدف پیشنهاد کردند و با استفاده از این رویه، یک جواب مؤثر برای مدل ارائه شده به دست آورده که در این جواب هر دو تابع هدف دارای بالاترین مطلوبیت به طور همزمان می‌باشد [۴]. بناویدس و همکاران مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی موسوم به مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی ناهمگون را ارائه دادند که در آن دو مسئله به‌طور همزمان بررسی می‌شود: ۱) پیدا کردن بهترین تخصیص کارگران به ایستگاه‌های کاری ۲) حل مسئله زمان‌بندی مربوطه. تابع هدف در نظر گرفته شده برای این مسئله، حفظ سطح بهره‌وری با کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها با توجه به قابلیت‌های مختلف کارگران می‌باشد. آنها برای این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی خطی توسعه دادند و روش حلی مبتنی بر برقراری مجدد مسیر را برای این مسئله پیشنهاد نمودند [۵]. کارنیل و همکاران مسئله زمان‌بندی در محیط جریان کارگاهی را با در نظر گرفتن کارگران معلول در خط تولید در نظر گرفتند که هدف آن کمینه‌سازی دیرترین زمان تکمیل کارها می-باشد و برای حل این مسئله سه مدل ریاضی مختلف ارائه دادند [۶]. مهرآوران و لگندران مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی غیر جایگشتی با منابع دوگانه را مورد بررسی قرار

[1] Flow Shop

دادند و برای حل این مسئله ، سطح مهارت‌های مختلفی را برای کارگران و زمان‌های راه‌اندازی وابسته به‌توالی در نظر گرفتند [۷].

سانچز و مونتویا تورس مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی را با در نظر گرفتن کارگران بررسی کردند که در این مسئله، زمان پردازش هر کار وابسته مکان آن در توالی انجام کارها است. آنها برای حل مسئله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه دادند [۸]. بهنامیان مسئله تخصیص کارگر و زمان‌بندی را در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر در نظر گرفت که این مسئله از دو قسمت زمان-بندی کارها بر روی ماشین‌ها و تخصیص کارگران به ماشین‌ها در هر ایستگاه کاری تشکیل شده است. هدف مسئله کمینه‌سازی زودکرد، دیرکرد، دیرترین زمان تکمیل کارها و کل هزینه‌های اشتغال کارگر است. با توجه به NP-hard بودن مسئله، او یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله ارائه داد [۹]. کارنیل و همکاران مسئله تخصیص نیروی انسانی معلول در محیط جریان کارگاهی با هدف کمینه‌کردن دیرترین زمان تکمیل کارها بررسی کردند. آنها برای حل این مسئله، یک مدل ریاضی و یک روش ابتکاری ارائه دادند [۱۰]. هوگ و همکاران مسئله زمان‌بندی نیروی انسانی را در محیط جریان کارگاهی با ایستگاه‌های کاری چندپردازنده مورد بررسی قرار دادند که هدف این مسئله کمینه‌سازی دیرترین زمان تکمیل کارها است. آنها برای حل مسئله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه نمودند [۱۱].

مسئله زمان‌بندی کارها در محیط جریان کارگاهی با تابع هدف Cmax برای محیطی با بیش از سه ماشین ($F_{m\geq 3}||C_{max}$)، یک مسئله NP-hard است؛ بنابراین مسئله زمان‌بندی همزمان نیروی انسانی و کارها در این محیط کاری نیز NP-hard می‌باشد. در نتیجه توسعه روش‌های فراابتکاری برای یافتن جواب‌های بهینه یا نزدیک بهینه برای این مسئله اجتناب‌ناپذیر است. یکی از روش‌های فراابتکاری که در سال‌های اخیر مورد توجه و استفاده محققان مختلف قرار گرفته است، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[1] می‌باشد. بهینه‌سازی ازدحام ذرات، یک روش بهینه‌سازی ابتکاری عمومی است که بر اساس هوش جمعی ذرات فضای حل را جستجو می‌کند که ایده اصلی این الگوریتم از حرکت منظم جمعی پرندگان و ماهی‌ها اقتباس شده است [۱۲]. این الگوریتم به‌طور گسترده‌ای برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود و با توجه اجرای راحت این الگوریتم و تعداد پارامترهای ورودی کم، به سرعت توسعه یافته است.

این الگوریتم همچنین در سال‌های اخیر برای مسائل زمان‌بندی در محیط‌های کاری مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. پال و همکاران الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را که توسط کندی و ابرهارت معرفی شده است را برای حل مسائل بهینه‌سازی عدد صحیح و عدد صحیح مختلط مورد استفاده قرار دادند. آنها این الگوریتم را روی ۱۵ مسئله آزمایش کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که این الگوریتم می‌تواند برای بهینه‌سازی مسائل عدد صحیح و عدد صحیح مختلط به کار می‌رود [۱۳]. رامانان و همکاران مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی را با هدف کمینه کردن دیرترین زمان تکمیل کار مورد بررسی قرار دادند و برای حل آن از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کردند [۱۴]. لیو و همکاران یک الگوریتم ترکیبی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی با هدف کمینه کردن دیرترین زمان تکمیل کارها بررسی کردند. آنها علاوه بر الگوریتم PSO، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای جلوگیری از همگرایی زودرس استفاده کردند [۱۵]. شا و لین از الگوریتم PSO برای حل مسئله کار کارگاهی استفاده کردند و با تغییر موقعیت ذره، سرعت و حرکت ذره را برای حل مسائل گسسته استفاده کردند [۱۶]. کیو و لیو یک روش ترکیبی جدید بر مبنای الگوریتم‌های ایمنی مصنوعی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات را برای مسئله کار کارگاهی با هدف کمینه‌کردن دیرترین زمان تکمیل ارائه دادند. در این تحقیق الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی و سرعت بخشیدن به فرآیند جستجو به کار رفته است [۱۷]. ادالی و همکاران مسئله جریان کارگاهی را با توجه به محدودیت مسدود کردن و با تابع هدف کمینه‌کردن دیرترین زمان تکمیل کارها مورد بررسی قرار دادند. آنها برای حل این مسئله، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده نمودند [۱۸].

الگوریتم شبیه سازی تبرید، یک الگوریتم بهینه‌سازی

[1] Particle Swarm Optimization

فراابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی است که برای حل گستره وسیعی از مسائل زمان‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش یک روش شناخته شده برای مسائل بهینه‌سازی است که بیشتر برای مسائل بهینه-سازی گسسته نسبت به پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. نوری و همکاران مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی غیر جایگشتی m ماشینه را با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان تکمیل کارها مورد بررسی قرار دادند و آن را با استفاده از الگوریتم SA حل کردند [۲۰]. نادری و همکاران مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی با زمان آماده‌سازی وابسته به‌توالی و محدودیت عدم دسترسی روی ماشین‌ها را در نظر گرفتند و به منظور کمینه‌کردن بیشنه زمان تکمیل کارها، از دو الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک (GA)[1] استفاده نمودند [۲۱]. جبارزاده و همکاران مسئله زمان-بندی گروهی جریان کارگاهی ترکیبی را با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به‌توالی و تابع هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای حل این مسئله، دو روش فراابتکاری مبتنی بر SA و GA را توسعه دادند [۲۲].

محیط جریان کارگاهی یکی از پرکاربردترین محیط‌های کاری در سیستم‌های تولیدی و خدماتی مختلف است. از طرف دیگر در نظر گرفتن نیروی انسانی همزمان با زمان-بندی کارها سبب افزایش کارایی مدل‌های زمان‌بندی ارائه شده می‌شود. بنابراین در این تحقیق یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای حل مسئله زمان‌بندی نیروی انسانی در محیط جریان کارگاهی پیشنهاد شده است. با توجه به پیچیدگی بالای مسئله و عدم توانایی حل مدل ارائه شده برای مسائل با ابعاد بزرگ، دو روش فراابتکاری مبتنی بر PSO ارائه شده است. این الگوریتم فراابتکاری که الهام گرفته از حرکات جمعی پرندگان می‌باشد، به علت بهره-مندی از حافظه همه ذرات و اشتراک‌گذاری اطلاعات، یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری موفق می‌باشد. اما یکی از مشکلات این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی، گیرکردن در دام بهینه محلی[2] می‌باشد. برای رفع این مشکل تغییرات مختلفی را می‌توان در ساختار این الگوریتم ایجاد نمود که یکی از این تغییرات، ترکیب این الگوریتم با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر شبیه‌سازی تبرید (SA)[3] می‌باشد. در واقع با ترکیب این دو الگوریتم به علت پذیرفتن جواب‌های بدتر در گام‌های ابتدایی الگوریتم، از افتادن در دام بهینه محلی جلوگیری می شود و الگوریتم با تقریب بهتری به جواب بهینه یا نزدیک بهینه همگرا می شود.

ادامه این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله زمان‌بندی نیروی انسانی در محیط جریان کارگاهی ارائه شده است و در بخش سوم دو روش فراابتکاری بر مبنای الگوریتم‌های فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات و شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله ارائه می‌شود. در بخش چهارم کارایی مدل‌های ارائه شده در این تحقیق براساس مسائل تصادفی تولید شده مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای تحقیقات آتی در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- مدل ریاضی

در این بخش به معرفی مدل ریاضی برای حل مسئله زمان‌بندی در محیط جریان کارگاهی با در نظر گرفتن نیروی انسانی می‌پردازیم. نمادها، پارامترها و متغیرهای تصمیم موردنیاز برای این مدل به شرح ذیل است:

j: اندیس کارها $(j=1,..,n)$

w: اندیس کارکنان با مهارت‌های مختلف $(w=1,...,W)$

t: اندیس مراحل کاری $(t=1,...,T)$

P_{jwt}: زمان پردازش کار j در مرحله t توسط کارگر w

M: یک عدد بسیار بزرگ

C_{max}: دیرترین زمان تکمیل کار

C_{jt}: زمان تکمیل کار j در مرحله t

P'_{jt}: مدت زمان پردازش کار j در مرحله t که توسط کارگز تخصیص یافته انجام می‌شود.

Y_{ljt}: اگر کار l در مرحله t بر کار j اولویت داشته باشد مقدار یک می‌گیرد؛ در غیر این صورت صفر

Z_{wt}: اگر کارگر w به مرحله t تخصیص داده شود مقدار

[1] Genetic Algorithm
[2] Local Optimum
[3] Simulated Annealing

یک می‌گیرد؛ در غیر این صورت صفر

با توجه به پارامترها و متغیرهای تعریف شده، مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مسئله به صورت زیر می‌باشد:

$$Z = min\ C_{max} \quad (۱)$$

$$C_{jT} \le C_{max} \qquad j=1,2,..,n \quad (۲)$$

$$C_{j1} \ge \sum_{j=1}^{n} p'_{j1} \qquad j=1,2,..,n \quad (۳)$$

$$C_{jt} + M(1 - y_{ljt}) \ge C_{lt} + p'_{jt} \qquad j=1,2,..,n,\ j \ne l,\ t=1,2,...,T \quad (۴)$$

$$C_{lt} + M(y_{ljt}) \ge C_{jt} + p'_{lt} \qquad j=1,2,..,n,\ j \ne l,\ t=1,2,...,T \quad (۵)$$

$$C_{jt} \ge C_{j,t-1} + p'_{jt} \qquad j=1,2,..,n,\ t=2,...,T \quad (۶)$$

$$p'_{jt} = \sum_{w=1}^{W} p_{jwt}\, z_{wt} \qquad j=1,2,..,n,\ t=1,2,..,T,\ W=1,2,..,W \quad (۷)$$

$$\sum_{t=1}^{T} z_{wt} = 1 \qquad W=1,2,..,W \quad (۸)$$

$$y_{ljt}, x_{jt}, z_{wt} \in \{0,1\} \qquad j=1,2,..,n,\ j \ne l,\ t=1,2,...,T,\ w=1,2,..,W \quad (۹)$$

تابع هدف مسئله، به دنبال کمینه‌کردن دیرترین زمان تکمیل کار است که در رابطه اول نشان داده شده است. محدودیت دوم $C_{\max}$ را به عنوان زمان تکمیل آخرین آخرین تعریف می‌کند و محدودیت سوم زمان تکمیل کار j را در مرحله اول نشان می‌دهد. محدودیت‌های چهارم و پنجم محدودیت‌های انفصالی هستند که زمان تکمیل کارها را مطابق با اولویتشان در هر مرحله نشان می‌دهد. محدودیت ششم نشان دهنده رابطه میان زمان تکمیل یک کار در دو مرحله متوالی می‌باشد که در آن زمان تکمیل کار j در مرحله t بزرگ‌تر یا مساوی زمان تکمیل کار j در مرحله $t\text{-}1$ است. محدودیت هفتم نشان می‌دهد که زمان پردازش یک عملیات وابسته به کارگر تخصیص یافته به آن مرحله است. محدودیت هشتم بیان می‌کند که هر نیروی انسانی تنها می‌تواند به یک مرحله در خط تولید تخصیص یابد و در نهایت محدودیت نهم نشان می‌دهد که متغیرهای تصمیم x_{jt}, y_{ljt}, z_{wt} تنها می‌توانند مقادیر صفر و یک را اختیار نمایند.

۳- روش‌های فراابتکاری

همان‌گونه که در بخش‌های قبل اشاره شد، به دلیل NP-hard بودن مسئله، حل مسائل با ابعاد بزرگ به کمک نرم‌افزار CPLEX در مدت زمان معقول امکان‌پذیر نیست، بنابراین استفاده از روش‌های فراابتکاری برای حل مسئله تحقیق اجتناب‌ناپذیر است. در این تحقیق، برای حل این مسئله دو روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته (IPSO) که ترکیبی از روش‌های فرابتکاری PSO و SA است، ارائه شده است.

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک روش بهینه‌سازی سراسری است که با استفاده از آن می‌توان به جواب بهینه یا نزدیک بهینه برای مسائل بهینه‌سازی مختلف دست یافت. در این الگوریتم هر ذره دارای یک موقعیت است که مشخص‌کننده مختصات ذره در فضای جستجوی چند بعدی می‌باشد که با حرکت ذره در طول تکرارهای مختلف، موقعیت ذره تغییر می‌نماید. $X_i(t)$ بیانگر موقعیت ذره i ام در تکرار t ام می‌باشد و همچنین هر ذره برای حرکت نمودن در فضا نیاز به یک بردار سرعت دارد که $V_i(t)$ سرعت ذره i ام در تکرار t ام نشان می‌دهد. با افزودن سرعت هر ذره به موقعیت هر ذره، می‌توان موقعیت جدیدی برای ذره در فضای حل نظر گرفت.

$$\mathrm{V_i(t+1)} = \mathrm{V_i(t)} * \mathrm{w} + \mathrm{C_1} * \mathrm{rand_1} * \left(\mathrm{pbest_i^t} - \mathrm{X_i^t}\right) + \mathrm{C_2} * \mathrm{rand_2} * \left(\mathrm{gbest}^t - \mathrm{X_i^t}\right) \quad (۱۰)$$

$$\mathrm{X_i(t+1)} = \mathrm{X_i(t)} + \mathrm{V_i(t+1)} \quad (۱۱)$$

برای تعیین سرعت ذره، از سه مفهوم سرعت فعلی ذره، بهترین موقعیت ذره i تاکنون ($\mathrm{pbest_i^t}$) و بهترین موقعیت کل ذرات تاکنون (gbest^t) استفاده می‌شود که معادله به روز نمودن سرعت و موقعیت ذره در دو معادله ۱۰ و ۱۱

دیده می‌شود.

همان‌گونه که اشاره شد سمت راست معادله (۱۰) از سه قسمت تشکیل شده است که قسمت اول سرعت فعلی ذره و قسمت‌های دوم و سوم تغییر سرعت ذره و چرخش آن به سمت بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه گروهی را بر عهده دارند؛ همچنین معادله (۱۱) موقعیت جدید ذره را تعیین می‌کند. الگوریتم PSO در ابتدا به گونه‌ای طراحی شد که برای حل مسائل در فضای حل پیوسته مناسب بود. از طرف دیگر در مسئله تحقیق حاضر، توالی انجام کارها و توالی تخصیص کارگران به هر مرحله یک مسئله گسسته می‌باشد. بنابراین، برای رفع این مشکل، یک روش پیشنهادی به نام روش کمترین مقدار (SV)[1] برای انتقال بردار از یک فضای پیوسته به یک فضای گسسته ارائه شده است. بر اساس این روش، توالی کارها و تخصیص نیروی انسانی با یک ترتیب غیر کاهشی از مقادیر واقعی تخصیص داده شده تعیین می‌شود. برای درک بهتر این روش مثالی در زیر ارائه شده است:

فرض می‌شود یک مسئله زمان‌بندی با ۷ کار در دسترس است. ابتدا یک بردار به نام O با اعداد تصادفی در بازه [0,1] تشکیل می‌شود (O= (0.5, 0.9, 0.1, 0.4, 0.2, 0.8, 0.3). توالی هم‌ارز با بردار O مطابق با روش SV برابر است با sequence=(5,7,1,4,2,6,3). کمترین مقدار در بردار O برابر است با ۰,۱ که در جایگاه سوم در بردار O قرار دارد، بنابراین سومین جایگاه در بردار sequence عدد ۱ را به خود اختصاص می‌دهد. دومین مقدار کم در بردار O عدد ۰,۲ است که در جایگاه پنجم در بردار O قرار دارد، بنابراین پنجمین جایگاه در بردار sequence عدد ۲ را به خود اختصاص می‌دهد؛ به همین ترتیب بقیه مقادیر بردار sequence محاسبه می‌شوند.

از همین رویکرد برای تخصیص نیروی انسانی به ماشین‌ها در مراحل مختلف استفاده می‌شود. براین اساس، ابتدا یک بردار با اعداد تصادفی به اندازه تعداد نیروی انسانی تولید شده و با استفاده از تکنینک RV، این بردار تبدیل به اعداد گسسته می‌شود. سپس نیروهای انسانی به ترتیب اعداد موجود در بردار گسسته به ماشین‌ها تخصیص می‌یابند.

شبه کد الگوریتم PSO در شکل (۱) مشاهده می‌شود:

مقدار دهی اولیه:
اندازه جمعیت/تعداد تکرار/ مقادیر ثابت (C_1, C_2)/ حداکثر وزن W_{max}/ حداقل وزنW_{min}/ دمای اولیه.
تولید بردار جمعیت اولیه کار و نیروی انسانی مطابق روش SV.
مقدار k را برابر ۱ قرار بده.
تا زمانی که $k \leq maxiter$ حلقه زیر را تکرار کن:
محاسبه مقدار هدف برای هر ذره i در تکرار k $(C_{max_i}^{\ k})$
ارزیابی ذرات برای محاسبه $P_{best_i}^{\ k}$: اگر $C_{max_i}^{\ k} \leq P_{best_i}^{\ k}$ باشد آنگاه قرار بده $P_{best_i}^{\ k} = C_{max_i}^{\ k}$
ارزیابی ذرات برای محاسبه $P_{best}^{\ k}$: اگر $min_i\{C_{max_i}^{\ k}\} \leq g_{best}^{k}$ باشد آنگاه قرار بده $g_{best}^{k} = min_i\{C_{max_i}^{\ k}\}$
k را برابر $k+1$ قرار بده
پایان حلقه

شکل ۱- شبه‌کد الگوریتم PSO

۲-۳- الگوریتم PSO بهبود یافته (IPSO)[2]

در این تحقیق، به منظور گریختن از دام بهینه محلی در الگوریتم PSO و بهبود عملکرد آن، از الگوریتم PSO بهبود یافته که مبتنی بر ترکیب دو الگوریتم PSO و SA استفاده می‌شود. ترکیب این دو الگوریتم سبب می‌شود که از همگرایی زودرس جلوگیری شود؛ زیرا همگرایی زودرس موجب می‌شود که الگوریتم در همان تکرارهای ابتدایی به یک جواب نسبتاً خوب برسد، در حالی که این جواب ممکن است جواب بهینه محلی باشد. بنابراین انتظار می‌رود این الگوریتم جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم PSO در فضای حل جستجوی نماید.

برای حل مسئله با الگوریتم پیشنهادی IPSO، ابتدا هر ذره از یک جواب اولیه شروع می‌کند و سپس در یک حلقه تکرار به جواب‌های همسایه حرکت می‌کند. اگر gbest کلیه ذرات در تکرار جاری بهتر از gbest فعلی باشد، الگوریتم آن را به‌عنوان gbest جدید قرار می‌دهد (به آن حرکت می‌کند)،

[1] Smallest Value

[2] Improved PSO

در غیر این صورت، الگوریتم این gbest را با احتمال زیر به عنوان gbest جدید می‌پذیرد:

$$\exp(\frac{C(x_{i+1})-C(x_i)}{T}) \geq r \qquad (۱۲)$$

در این رابطه $C(X_{i+1})$ و $C(X_i)$ به ترتیب مقدار تابع هدف ذره gbest در تکرار فعلی و قبلی می‌باشد و T بیانگر پارامتر دما در الگوریتم SA است. همچنین r یک عدد تصدفی در بازه $(0,1)$ است.

شبه کد الگوریتم IPSO در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

۳-۳- نتایج

این بخش به بررسی کیفیت حل مدل‌های ریاضی و روش-های فراابتکاری ارائه شده می‌پردازد. با توجه به پیچیدگی مسئله تحقیق، مسائل تصادفی تولید شده در دو دسته دسته‌بندی شده‌اند. در دسته اول ۱۰ مسئله آزمایشی با ابعاد کوچک تولید شده است که برای مقایسه جواب الگوریتم‌های فراابتکاری با جواب مدل ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در دسته دوم، ۳۰ مسئله آزمایشی با ابعاد بزرگ برای مقایسه کیفیت دو الگوریتم فراابتکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل ریاضی توسعه داده شده در نرم‌افزار CPLEX کد شده است و الگوریتم‌های فراابتکاری در نرم‌افزار Matlab اجرا شده است. همچنین کلیه الگوریتم‌ها و مدل ریاضی بر روی یک رایانه شخصی با مشخصات 2.8) 2.0 GB RAM GHz CPU) اجرا شده است.

مقدار دهی اولیه:
اندازه جمعیت/تعداد تکرار/ مقادیر ثابت (C_1, C_2)/ حداکثر وزن W_{max}/ حداقل وزن W_{min}/ دمای اولیه/ نرخ کاهش دما α.
تولید بردار جمعیت اولیه کار و کارگر مطابق روش کم ترین SV.
مقدار k را برابر ۱ قرار بده.
تا زمانی که $k \leq maxiter$ حلقه زیر را تکرار کن:
محاسبه مقدار هدف برای هر ذره i در تکرار k $(C_{max_i}^{\ k})$
ارزیابی ذرات برای محاسبه $P_{best_i}^{\ k}$:
اگر $C_{max_i}^{\ k} \leq P_{best_i}^{\ k}$ آنگاه $P_{best_i}^{\ k} = C_{max_i}^{\ k}$
در غیر اینصورت اگر $r \leq e^{\frac{(P_{best_i}^{\ k} - C_{max_i}^{\ k})}{T}}$ آنگاه $P_{best_i}^{\ k} = C_{max_i}^{\ k}$
در غیر اینصورت $P_{best_i}^{\ k} = P_{best_i}^{\ k-1}$
ارزیابی ذرات برای محاسبه $P_{best}^{\ k}$:
اگر $min_i\{C_{max_i}^{\ k}\} \leq g_{best}^{\ k}$ آنگاه $g_{best}^{\ k} = min_i\{C_{max_i}^{\ k}\}$
در غیر اینصورت اگر $r \leq e^{\frac{(min_i\{C_{max_i}^{\ k}\} - g_{best}^{\ k})}{T}}$ آنگاه $g_{best}^{\ k} = min_i\{C_{max_i}^{\ k}\}$
در غیر اینصورت $g_{best}^{\ k} = g_{best}^{\ k-1}$
کاهش دما: $T = T \times \alpha$
k را برابر $k+1$ قرار بده
پایان حلقه

شکل ۲- شبه کد الگوریتم ISPO

۴-۳- مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری با جواب بهینه

با توجه به NP-hard بودن مسئله تحقیق، مدل ریاضی قابلیت رسیدن به جواب بهینه برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ را ندارد. در نتیجه مسائل آزمایشی تولید شده در این بخش فقط محدود به مسائل با ابعاد کوچک می‌باشد (مطابق جدول ۲، نرم‌افزار می‌تواند مسئله با حداکثر ۷ کار، ۴ ماشین و ۴ نیروی انسانی را در مدت زمان ۶۰۰ ثانیه حل نماید). برای این منظور ۱۰ مسئله آزمایشی براساس پارامترهای تعداد مرحله، تعداد کار، تعداد نیروی انسانی و زمان پردازش کارها تولید شده است که مقادیر هر یک از پارامترها در جدول ۱ خلاصه شده است:

جدول ۱- ابعاد مسئله در نظر گرفته شده

پارامترهای مسئله	مقدار
تعداد مرحله	U[2,6]
تعداد کار	U[3,8]
تعداد نیروی انسانی	U[3,6]
زمان پردازش	U[25,50]

برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری، جواب به دست آمده از الگوریتم‌های فراابتکاری با جواب‌های بهینه مقایسه می‌شود. برای این منظور از معیار درصد انحراف به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\text{درصد انحراف} = \frac{Cmax_{\text{فراابتکاری}} - Cmax_{\text{بهینه}}}{Cmax_{\text{بهینه}}} * 100 \quad (۱۳)$$

نتایج حاصل از این مقایسه در جدول ۲ قابل مشاهده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نرم‌افزار CPLEX فقط برای ۸ مسئله از ۱۰ مسئله آزمایشی توانسته است در مدت زمان ۶۰۰ ثانیه به جواب بهینه برسد. برای مسائل حل شده در این بازه زمانی، میانگین درصد انحراف روش فراابتکاری PSO از جواب بهینه برابر با ۱٫۷۸٪ و برای روش فراابتکاری IPSO، برابر با ۱٫۳۶٪ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم جواب‌های نزدیک بهینه را می‌توانند در مدت زمان معقول ارائه کنند.

همچنین متوسط مدت زمان حل برای این دو الگوریتم به ترتیب برابر با ۱۲٫۱ و ۱۰٫۶ ثانیه است که نشان می‌دهد دو الگوریتم از نظر زمان حل تفاوت قابل ملاحظه‌ای با هم ندارند.

جدول ۲- مقایسه جواب های بهینه با الگوریتم‌های PSO و IPSO

شماره	تعداد مرحله	تعداد نیروی انسانی	تعداد کار	CPLEX		PSO			IPSO		
				C_{max}	زمان (ثانیه)	C_{max}	زمان (ثانیه)	درصد انحراف	C_{max}	زمان (ثانیه)	درصد انحراف
۱	۲	۲	۳	۱۳۵	۰٫۰۳	۱۳۷	۵	۱٫۴٪	۱۳۷	۴	۱٫۴٪
۲	۳	۳	۴	۲۱۰	۰٫۱۳	۲۱۳	۵	۱٫۴٪	۲۱۳	۵	۱٫۴٪
۳	۴	۴	۴	۲۳۳	۰٫۱۷	۲۳۷	۶	۱٫۶٪	۲۳۶	۶	۱٫۲٪
۴	۳	۳	۵	۲۴۹	۰٫۲۰	۲۵۴	۱۷	۱٫۹٪	۲۵۳	۱۶	۱٫۵٪
۵	۵	۵	۵	۳۰۲	۰٫۷۳	۳۰۸	۲۴	۱٫۹٪	۳۰۶	۲۰	۱٫۳٪
۶	۳	۳	۶	۳۰۰	۱٫۲۸	۳۰۶	۱۲	۱٫۹٪	۳۰۴	۱۰	۱٫۳٪
۷	۶	۶	۵	۳۴۶	۳٫۲۰	۳۵۴	۱۵	۲٫۲٪	۳۵۱	۱۲	۱٫۴٪
۸	۴	۴	۷	۳۴۹	۲۹۸	۳۵۶	۱۳	۱٫۹٪	۳۵۴	۱۲	۱٫۴٪
*۹	۵	۵	۸	۴۴۰	۶۰۰	۴۵۱	۲۵	---	۴۴۸	۲۲	---
*۱۰	۴	۴	۸	۴۰۱	۶۰۰	۴۱۲	۴۵	---	۴۱۰	۴۱	---

* نرم افزار CPLEX در مدت زمان ۶۰۰ ثانیه نتوانسته است به جواب بهینه دست یابد.

۵-۳- مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری در مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ

همان‌گونه که اشاره شد با توجه به NP-hard بودن مسئله، مدل ریاضی توانایی رسیدن به جواب بهینه در مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ در مدت زمان معقول را ندارد. بنابراین در این بخش فقط به مقایسه این دو الگوریتم فراابتکاری با یکدیگر پرداخته می‌شود. برای این منظور ۳۰ مسئله آزمایشی با ابعاد متوسط و بزرگ براساس پارامترهای مختلف ابعاد مسئله تولید شده است. در این مسائل تعداد کارها ۳۰، ۴۰ و ۵۰، تعداد مراحل از ۲ تا ۱۱ و تعداد نیروی انسانی نیز از ۲ تا ۱۱ می‌باشد. برای مقایسه کیفیت جواب های تولید شده از دو الگوریتم، از معیار درصد انحراف به‌صورت زیر استفاده شده است:

$$\text{درصد انحراف} = \frac{Cmax_{\text{PSO}} - Cmax_{\text{IPSO}}}{Cmax_{\text{IPSO}}} * 100 \quad (۱۴)$$

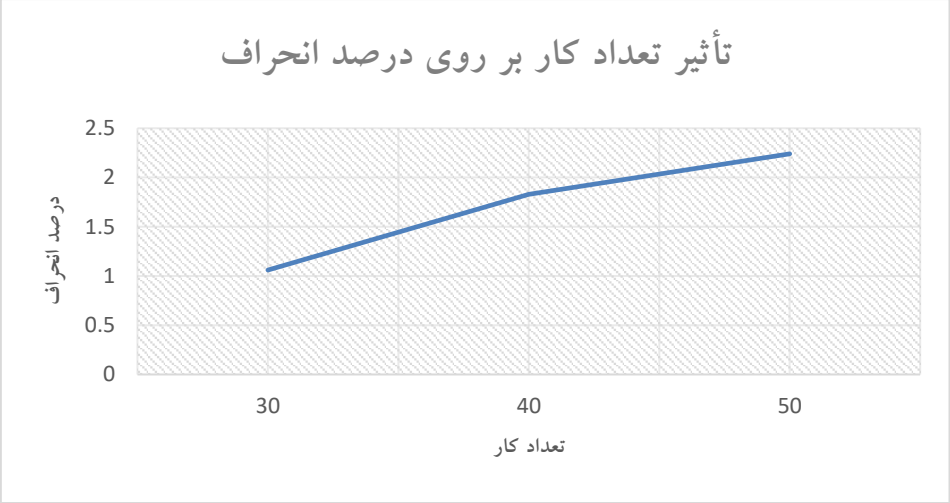
نتایج حاصل از مقایسه این دو الگوریتم در جدول ۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تمامی مسائل، روش IPSO جواب‌های بهتری را نسبت به روش PSO ارائه می‌کند (با توجه به درصد انحراف مثبت). همچنین متوسط انحراف برای ۳۰ مسئله آزمایشی تولید شده برابر با ۱٫۷٪ درصد می‌باشد. نتیجه دیگری که از این جدول می‌توان دریافت متوسط مدت زمان حل برای

الگوریتم PSO برابر با ۵۶٫۸ ثانیه و برای الگوریتم IPSO برابر با ۵۶٫۶ ثانیه می‌باشد که نشان می‌دهد این دو الگوریتم از نظر زمان حل تفاوتی با یکدیگر ندارند. برای بررسی بیشتر، تأثیر افزایش ابعاد مسئله (تعداد کار) بر روی درصد انحراف مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور نمودار تعداد کار به متوسط انحراف رسم شده است که در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

جدول ۳- مقایسه جواب های PSO و ISPO برای مسائل با ابعاد بزرگ

شماره	تعداد کار	تعداد مرحله	تعداد نیروی انسانی	PSO		IPSO		درصد انحراف
				زمان (ثانیه)	C_{max}	زمان (ثانیه)	C_{max}	
۱	۳۰	۲	۲	۵۲	۱۱۸۰	۵۲	۱۱۶۵	۱٫۲٪
۲		۳	۳	۵۲	۱۴۲۱	۵۲	۱۴۱۵	۰٫۴٪
۳		۴	۴	۵۴	۱۶۴۳	۵۴	۱۶۳۱	۰٫۷٪
۴		۵	۵	۵۳	۱۹۰۷	۵۲	۱۸۸۵	۱٫۱٪
۵		۶	۶	۵۳	۲۵۶۶	۵۳	۲۵۴۶	۰٫۷٪
۶		۷	۷	۵۴	۳۱۵۱	۵۴	۳۱۰۶	۱٫۴٪
۷		۸	۸	۵۵	۳۴۲۸	۵۵	۳۳۸۵	۱٫۲٪
۸		۹	۹	۵۵	۳۹۸۵	۵۳	۳۹۴۴	٪۱٫۰
۹		۱۰	۱۰	۵۵	۴۲۲۵	۵۴	۴۱۷۳	۱٫۲٪
۱۰		۱۱	۱۱	۵۷	۴۷۶۳	۵۷	۴۶۸۰	۱٫۷٪
۱۱	۴۰	۲	۲	۵۵	۱۴۵۳	۵۵	۱۴۳۲	۱٫۴٪
۱۲		۳	۳	۵۵	۱۶۹۷	۵۵	۱۶۵۵	۲٫۴٪
۱۳		۴	۴	۵۶	۱۹۸۸	۵۶	۱۹۶۰	۱٫۴٪
۱۴		۵	۵	۵۵	۲۷۸۱	۵۵	۲۷۱۷	۲٫۳٪
۱۵		۶	۶	۵۷	۳۴۳۸	۵۷	۳۳۸۵	۱٫۵٪
۱۶		۷	۷	۵۷	۴۲۳۳	۵۷	۴۱۴۰	۲٫۱٪
۱۷		۸	۸	۵۷	۴۸۷۱	۵۷	۴۸۰۳	۱٫۳٪
۱۸		۹	۹	۶۱	۵۱۰۱	۶۱	۴۹۶۹	۲٫۶٪
۱۹		۱۰	۱۰	۶۱	۵۳۵۴	۶۱	۵۲۸۹	۱٫۲٪
۲۰		۱۱	۱۱	۶۱	۵۶۰۶	۶۱	۵۴۸۷	۲٫۱٪
۲۱	۵۰	۲	۲	۵۴	۱۷۰۸	۵۴	۱۶۵۷	۲٫۹٪
۲۲		۳	۳	۵۵	۲۹۱۴	۵۴	۲۸۵۴	۲٪
۲۳		۴	۴	۵۷	۴۳۴۳	۵۷	۴۲۴۰	۲٫۳٪
۲۴		۵	۵	۵۷	۴۶۹۸	۵۷	۴۵۳۹	۳٫۳٪
۲۵		۶	۶	۶۱	۵۱۱۷	۶۱	۴۹۶۱	٪۳٫۰
۲۶		۷	۷	۶۱	۵۳۴۲	۶۱	۵۲۶۱	۱٫۵٪
۲۷		۸	۸	۶۰	۵۲۷۸	۶۰	۵۱۹۴	۱٫۵٪
۲۸		۹	۹	۶۰	۵۵۶۴	۶۰	۵۴۵۶	۱٫۹٪
۲۹		۱۰	۱۰	۶۲	۵۸۱۲	۶۲	۵۷۱۸	۱٫۶٪
۳۰		۱۱	۱۱	۶۲	۵۸۴۵	۶۲	۵۷۰۴	۲٫۴٪

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد کار، متوسط انحراف نیز افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد با افزایش ابعاد مسئله ، برتری الگوریتم IPSO نسبت به الگوریتم PSO محسوس‌تر است.



شکل ۳- تأثیر ابعاد مسئله بر روی درصد انحراف

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق مسئله زمان‌بندی نیروی انسانی با سطح مهارت‌های چندگانه با هدف کمینه‌کردن دیرترین زمان تکمیل کارها در محیط جریان کارگاهی مورد بررسی قرار می‌دهد. برای این منظور یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح ارائه شده است که به کمک نرم‌افزار CPLEX حل شده است. با توجه به NP-hard بودن مسئله، این نرم‌افزار قادر به حل کردن مسائل با ابعاد بزرگ نمی‌باشد، برای این منظور، دو روش فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته (IPSO) برای این مسئله توسعه یافته است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم توانایی رسیدن به جواب‌های نزدیک بهینه در مدت زمان معقول را دارا هستند، اما روش IPSO جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم PSO ارائه می‌کند که این برتری در مسائل با ابعاد بزرگ، محسوس‌تر است.

تحقیقات آینده در این زمینه می‌تواند بر روی توسعه روش-های دقیق، ابتکاری و فراابتکاری برای تولید جواب‌های بهینه و نزدیک بهینه برای این مسئله متمرکز شود. همچنین می‌توان این مسئله را برای سایر مسائل زمانبندی نظیر جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر و کار کارگاهی در نظر گرفت.

مراجع

[۱] م. بهشتی‌نیا، ن. قاضی وکیلی، "ارزیابی الگوریتم های زمانبندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر و مقایسه آنها با الگوریتم ژنتیک دوبخشی"، مجله علمی پژوهشی مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۰، ۱۳۹۴، صفحه ۱-۱۶.

[2] E. Asadi Gangraj, & N. Nahavandi, "A Metaheuristic approach for Batch Sizing and Scheduling Problem in Flexible Flow Shop with Unrelated Parallel Machines", International Journal of Computer Applications, Vol. 97, No. 6, 2014, pp. 31–36.

[3] S.J. Sadjadi, M.B. Aryanezhad, & M. Ziaee, "The General Flowshop Scheduling Problem: Mathematical Models", Journal of Applied Sciences, Vol. 8, No. 17, 2008, pp. 3032–3037.

[4] P. Shahnazari-Shahrezaei, R. Tavakkoli-Moghaddam, & H. Kazemipoor, "Solving a bi-objective manpower scheduling problem considering the utility of objective functions", IJE Transactions B: Applications, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 251–262.

[5] A.J. Benavides, M. Ritt, & C. Miralles, "Flow shop scheduling with heterogeneous workers", European Journal of Operational Research, Vol. 237, No. 2, 2014, pp. 713–720.

[6] G.C. Carniel, A.J. Benavides, & M. Ritt, "Models for the inclusion of workers with disabilities in flow shop scheduling problems", Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2013.

[7] Y. Mehravaran, & R. Logendran, "Non-permutation flowshop scheduling with dual resources", Expert Systems with Applications, Vol. 40, No. 13, 2013, pp. 5061–5076.

[8] H.S. Sánchez, & J.R. Montoya Torres, "Mathematical model of workforce scheduling problem in flow shop with makespan minimization", Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 4, 2009, pp. 190–201.

[9] J. Behnamian, "Scheduling and worker assignment problems on hybrid flow shop with cost-related objective function", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 74, No. 1–4, 2014, pp. 267–283.

[10] G.C. Carniel, A.J. Benavides, & M. Ritt, "Including workers with disabilities in flow shop scheduling", IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2015.

[11] F Huq, K. Cutright, & C. Martin, "Employee scheduling and makespan minimization in a flow shop with multi-processor work stations: a case study", Omega, Vol. 32, No. 2, 2004, pp. 121–129.

[۱۲] ح. همتیان، ع. فریدون، م. رجب‌پور، "بهینه سازی پانل ساندویچی هسته منشوری براساس الگوریتم گروه ذرات"، مجله علمی پژوهشی مدل سازی در مهندسی، دوره ۸، شماره ۲۰، ۱۳۸۹، صفحه ۱۷-۲۶.

[13] A. Pal, S.B. Singh, & K. Deep, "Use of Particle Swarm Optimization Algorithm for Solving Integer and Mixed Integer Optimization Problems", International Journal of Computing Science and Communication Technologies, Vol. 4, No. 1, 2011, pp. 663–667.

[14] T.R. Ramanan, M. Iqbal, & K. Umarali, "A particle swarm optimization approach for permutation flow shop scheduling problem", International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, Vol. 5, 2014, A20.

[15] B. Liu, L. Wang, & Y. Jin, "An effective hybrid PSO-based algorithm for flow shop scheduling with limited buffers", Computers & Operations Research, Vol. 35, No. 9, 2008, pp. 2791–2806.

[16] D.Y. Sha, & H. Lin, "A multi-objective PSO for job-shop scheduling problems", Expert Systems with Applications, Vol. 37, No. 2, 2010, pp. 1065–1070.

[17] X. Qiu, & H.Y.K. Lau, "An AIS-based Hybrid Algorithm with PSO for Job Shop Scheduling Problem", IFAC Proceedings, Vol. 43, No. 4, 2010, pp. 350–355.

[18] M. Eddaly, B. Jarbouia, & P. Siarry, "Combinatorial particle swarm optimization for solving blocking flowshop scheduling problem", Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 3, No. 4, 2016, pp. 295–311.

[۱۹] ع. رستمی، ا. نوروزی، ه. مختاری، ی. نعمتی، "مسئله بهینه‌سازی پورتفولیوی چندهدفه با اهداف حداکثر کردن بازده، حداقل کردن ریسک و حداقل کردن تعداد دارایی"، مجله علمی پژوهشی مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۵، ۱۳۹۵، صفحه ۹۹-۱۰۹.

[20] B.V. Nouri, P. Fattahi, R. Tavakkoli-Moghaddam, & R. Ramezanian, "A general flow shop scheduling problem with consideration of position based learning effect and multiple availability constraints", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 73, No. 5–8, 2014, pp. 601–611.

[21] B. Naderi, M. Zandieh, & S.M.T. Ghomi, "Scheduling Sequence-Dependent Set-up Time Job Shops with Preventive Maintenance", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 43, No. 1, 2009, pp. 170–181.

[22] F. Jabbarzadeh, M. Zandieh, & D. Talebi, "Hybrid flexible Flow Shops with Sequence-Dependent Setup Times and Machine Availability Constraints", Computers & Industrial Engineering, Vol. 57, No. 3, 2009, pp. 949–957.