



SOLVING FLEXIBLE JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM WITH LOT STREAMING

S. Mofarrang Balani, M. Hosseini & P. Fattahi*

Sahand Mofarrang Balani, MSc of Industrial Eng, Bu-Ali Sina University.

Mohammad Hosseini, MSc of Industrial Eng, Bu-Ali Sina University.

Parviz Fattahi, Associate professor of Industrial Eng, Bu-Ali Sina University.

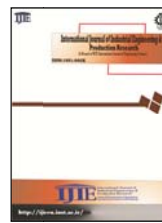
Keywords

Lot streaming,
flexible job shop,
Harmony Search algorithm,
SA algorithm

ABSTRACT

Lot streaming is one of the production planning techniques that can effectively increase the velocity of the flow of material over machines, and therefore reduce the production makespan. Lot streaming involves splitting a production lot (batch) of jobs into smaller-sized sublots (transfer batches), and then processing them in an overlapping fashion over the machines. In this research a flexible job shop scheduling problem as an extension of classic job shop is considered with respect of lot streaming and makespan as objective function. In order to solve the problem, a heuristic algorithm based on combination Harmony Search and SA algorithms is proposed. Numerical examples are presented to demonstrate the effect of lot streaming on makespan and efficiency of algorithm is evaluated that shows its efficiency.

© 2016 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 27, No. 1, All Rights Reserved



حل مساله زمان بندی تولید کارگاهی انعطاف پذیر با در نظر گیری جریان محموله

سهند مفرنگ بالانی، محمد حسینی و پرویز فتاحی*

چکیده:

جریان محموله یکی از تکنیک های برنامه ریزی تولید است که به طور موثری به سرعت جریان مواد بین ماشین ها می افزاید و در نتیجه دوره ساخت را کوتاه می سازد. جریان محموله شامل تقسیم یک محموله (دسته) تولیدی از کارها به زیرمحموله های با اندازه کوچک تر و سپس در نظر گیری روی هم افتادگی در حین پردازش آن ها است. این تحقیق به مساله زمان بندی تولید کارگاهی انعطاف پذیر که حالت توسعه یافته ای از زمان بندی تولید کارگاهی است با در نظر گرفتن جریان محموله و تابع هدف حداکثر زمان تکمیل می پردازد. برای حل مساله یک الگوریتم فرا ابتکاری بر مبنای ترکیب الگوریتم های جستجوی هارمونی و شبیه سازی تبرید پیشنهاد شده است. مثال های عددی به منظور نشان دادن تاثیر جریان محموله روی دوره ساخت آورده شده و همچنین کارایی الگوریتم پیشنهادی ارزیابی شده که کارایی آن را نشان می دهد.

کلمات کلیدی

جریان محموله،
تولید کارگاهی انعطاف پذیر،
الگوریتم جستجوی
هارمونی،
الگوریتم شبیه سازی تبرید

۱. مقدمه

زمان بندی سیستم های تولید کارگاهی انعطاف پذیر به دلیل جایگاه ویژه آن در مراکز تولیدی مورد توجه زیاد مدیران واحدهای تولیدی است. مساله زمان بندی تولید کارگاهی انعطاف پذیر^۱ ($FJSP$) به صورت زمان بندی مساله زمان بندی تولید کارگاهی کلاسیک یعنی m کار (J_1, J_2, \dots, J_n) روی مجموعه ای شامل m ماشین (M_1, M_2, \dots, M_m) تعریف می شود. هر کار دارای O_j عملیات است که بایستی به ترتیب و بر اساس پیش نیازی انجام گردند [۱]. هدف زمان بندی این مساله، تعیین توالی عملیات با به نحوی است که یک تابع هدف از قبل مشخص شده مثل دوره ساخت بهینه گردد. از آنجاکه در مساله $FJSP$ هر عملیات بر روی بیش از یک ماشین قابل پردازش است، علاوه بر تعیین توالی عملیات، تخصیص آن ها به ماشین ها نیز به مساله اضافه

تاریخ وصول: ۹۲/۰۹/۰۲

تاریخ تصویب: ۹۳/۰۲/۳۱

سهند مفرنگ بالانی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا،
sahand_mofarangi@yahoo.com

محمد حسینی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا،
undergraduate_sub@yahoo.com

* نویسنده مسئول مقاله: پرویز فتاحی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا، fattahi@basu.ac.ir

می گردد. از این رو علاوه بر دشواری های مساله کلاسیک پیچیدگی های خاص تخصیص را نیز دارد. بنابراین مساله $FJSP$ به دو زیر مساله تقسیم می گردد: (۱) زیر مساله تخصیص که به تخصیص هر عملیات به یکی از ماشین های مجاز می پردازد و (۲) زیر مساله زمان بندی که توالی انجام عملیات روی ماشین ها را مشخص می سازد [۲-۳].
جریان محموله^۲ یک روش برنامه ریزی تولید کاراست است که می تواند به طور موثر سرعت جریان مواد بین ماشین آلات را افزایش داده و در نتیجه منجر به کاهش دوره ساخت، چرخه تولید و متوسط موجودی کار در جریان گردد. همچنین از میزان فضای انبار و همچنین استفاده از ظرفیت تجهیزات حمل مورد نیاز می کاهد [۴]. در واقع جریان محموله فرایند تقسیم یک کار به زیرمحموله های^۳ آن است به طوری که عملیات های آن قابلیت روی هم افتادگی^۴ را دارند. جریان محموله را می توان نوع خاصی از تقسیم محموله^۵ در نظر گرفت. اصطلاح تقسیم محموله به شکستن حجم محموله^۶ داده شده به زیرمحموله های کوچک تر اشاره دارد. اندازه محموله خودش یک مقدار از قبل تعیین شده است، که به طور مثال توسط مشتری تنظیم می شود [۴]. در مساله برنامه ریزی تولید کارگاهی کلاسیک محموله ها معمولاً تفکیک پذیر نمی باشند. عملیات روی تمامی محموله ها باید قبل از اینکه به عملیات بعدی

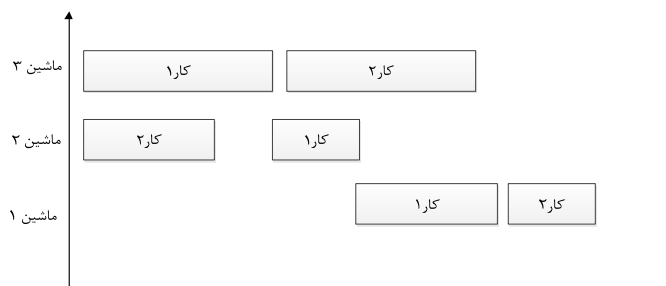
در ابتدا تکنیک جریان محموله، یک متدولوژی برای جدا کردن یک کار به تعدادی محموله‌های کوچک‌تر بود به طوری که عملیات‌های متوالی از کارهای یکسان بتوانند به طور موازی پردازش شوند. بنابراین زمان تکمیل کل کار می‌توانست تا حد ممکن کوتاه شود. قبل از تقسیم کار، ماهیت اندازه کار و نوع محموله‌ها بهتر است تعریف شده باشد. به‌طور کلی، اندازه محموله می‌تواند گسسته یا پیوسته باشد. اندازه محموله گسسته به این معنی است که یک محموله می‌تواند شامل یک تعداد صحیح از آیتم‌های مشابه باشد. در حالت پیوسته اندازه محموله می‌تواند یک مقدار حقیقی باشد. همچنین نوع زیر محموله می‌تواند متغیر یا ثابت باشد. نوع متغیر به این معنی است که اندازه زیر محموله بین ماشین‌های متوالی، می‌تواند متفاوت باشد و نوع ثابت مساله را محدود می‌کند که اندازه زیر محموله‌ها ثابت است. در این تحقیق نوع زیر محموله‌ها ثابت و گسسته در نظر گرفته شده است.

ادبیات مساله تولید کارگاهی با در نظرگیری جریان محموله، به نسبت خود مساله جریان کارگاهی دامنه چندان وسیعی ندارد. اما کاربرد این رویکرد همواره حاکی از بهبود توابع هدف مختلف به‌ویژه دوره ساخت بوده است [۶]. برای مثال شکل (۱) نشان‌دهنده یک مساله تولید کارگاهی با دو کار محموله‌ای بر روی سه ماشین است. حال اگر از رویه جریان محموله برای تقسیم حجم کارها استفاده کرده و سپس کارها را دوباره زمان بندی نماییم بهبود حاصل را در میزان دوره ساخت به‌وضوح مشاهده خواهیم کرد (شکل (۲)).

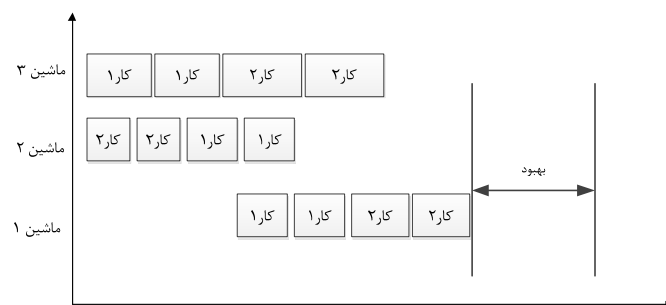
برسد پایان پذیرید که منجر به استفاده کمتر ماشین‌ها و طولانی شدن زمان تکمیل می‌گردد. از سوی دیگر تکنیک‌های جریان محموله، امکان تقسیم یک محموله به چندین زیرمحموله کوچک‌تر را می‌دهد که عملیات‌ها می‌توانند به‌صورت جداگانه روی آن‌ها انجام شوند و بلافاصله به مرحله بعدی انتقال یابند. به این ترتیب زیرمحموله‌های مختلف یک کار می‌توانند به‌طور همزمان در مراحل مختلف پردازش شوند. تداخل عملیات‌ها در نتیجه این رویکرد می‌تواند تولید را به‌طور قابل توجهی شتاب بخشد. با این حال، با توجه به تعامل پیچیده بین زیر محموله‌ها و ماشین‌آلات، تدوین و حل مساله تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با در نظرگیری جریان محموله دشوار است [۵]. در این مطالعه ابتدا در بخش ۲ به مفاهیم و مرور ادبیات می‌پردازیم. بخش ۳ شامل توضیح جزئیات الگوریتم پیشنهادی است. آزمایش‌ها و نتایج در بخش ۴ و نتیجه‌گیری و موارد پیشنهادی برای آینده در بخش ۵ آورده شده است.

۲. مفاهیم و مرور ادبیات

کلی جریان محموله در مکان‌های مختلف در ادبیات تولید ظاهر شده است. مدل جریان محموله پایه، یک مدل کارگاه گردش^۷ کاری با یک کار است که در آن اندازه محموله تعیین شده است. تابع هدف در این رویکرد کمینه‌سازی دوره ساخت است. حتی زمانی که ضابطه و معیار کلی چیزی غیر از دوره ساخت باشد، حداقل کردن دوره ساخت کارها به‌صورت تکی و منحصر به فرد، عملکرد را بهبود داده و منجر به افزایش توان عملیاتی می‌شود [۵].



شکل ۱. انجام کارها بدون بهره‌گیری از جریان محموله



شکل ۲. تاثیر بهره‌گیری از جریان محموله در زمان اتمام کارها

آزمایش قرار گرفته است. مدل آن‌ها را می‌توان الهام بخشی مهم برای فرموله کردن مسائل چند محصولی با جریان محموله، در یک محیط تولید کارگاهی دانست.

بوشر و همکاران [۶] از مطالعات پیشگام در استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در این زمینه است. در مطالعه آن‌ها یک الگوریتم سه مرحله‌ای مبتنی بر TS^A ارائه شده است. این الگوریتم به‌طور کلی تعیین سائز اولیه زیر محموله‌ها، زمان‌بندی آن‌ها و در آخر تعیین زمان‌بندی بهینه را شامل می‌شد. الگوریتم پیشنهادی قادر به رسیدن به کران‌های پایین‌تر برای برخی از مسائل با ابعاد بزرگ، در زمانی معقول بود. آن‌ها همچنین در مطالعه دیگر خود [۱۲] مدل جدیدی از مساله جریان محموله در یک محیط تولید کارگاهی را ارائه دادند. برنامه‌ریزی عدد صحیح پیشنهادی به‌اندازه کافی قادر به توصیف پویایی زیر محموله‌ها و تعیین همزمان زمان‌بندی ماشین‌آلات و تعیین اندازه زیر محموله‌ها است. نمونه‌های کوچکی از مسائل تولید کارگاهی با زیرمحموله‌های ثابت به‌طور بهینه حل شده است. در تایید نتایج محاسباتی که با استفاده از استراتژی جریان محموله به‌دست‌آمده است، نشان داده شد که زمان اتمام عملیات به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

به حالت انعطاف‌پذیر مساله تولید کارگاهی با در نظرگیری جریان محموله تنها در دفرشا و همکاران [۱۳] اشاره شده است. در مطالعه آن‌ها یک مدل جریان محموله برای یک محیط تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر توسعه داده شده است. مدل آن‌ها مدلی بر مبنای جایگاه است و چند حالت مانند زمان راه‌اندازی، زمان آزادسازی ماشین و زمان تاخیر را در نظر می‌گیرد. به‌منظور حل مدل، یک الگوریتم ژنتیک موزای ارائه شده است. در نهایت الگوریتم حل بر روی نمونه‌ای طراحی شده، اجرا و سپس توانایی آن در مقایسه با الگوریتمی مقایسه‌ای پیشنهادی نشان داده شده است. از آنجایی که مطالعات روی یک روش حل جامع و کارا با در نظر گرفتن جریان محموله برای مساله تولید کارگاهی در حالت انعطاف‌پذیر، بسیار محدود است، این موضوع ضرورت ارائه روش حلی مناسب و موثر برای آن را تبیین می‌کند.

۳. الگوریتم جستجوی هارمونی^۹

از الگوریتم‌های فرا ابتکاری که از عملکرد طبیعی نوازندگان موسیقی پیروی می‌کند، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) است. این الگوریتم توسط گیم و همکاران [۱۴] ارائه شده و از پروسه موسیقی طبیعی، زمانی که یک موسیقی دان با جایگزینی نت‌ها سعی در ایجاد یک هارمونی عالی را دارد الهام گرفته شده است. الگوریتم جستجوی هارمونی در ابتدا برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته ارائه شد و بعداً برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته نیز بسط داده شده است. از ویژگی‌های مهم جستجوی هارمونی این است که در تشخیص نواحی عملکردی بزرگ از فضای جواب، در

برای تابع هدف به حداقل رساندن دوره ساخت، دوزر پرز و همکاران [۵] یک روش تکرارشونده برای استفاده از جریان محموله در تولید کارگاهی ارائه دادند. پیشنهاد آن‌ها به این صورت بود که ابتدا محموله کارها به زیر محموله‌های کوچک‌تر تقسیم‌شده، و سپس این زیرمحموله‌ها به‌عنوان کارهای مستقل، در مساله تولید کارگاهی زمان‌بندی شوند. همچنین فرض شده است که تغییر اندازه زیر محموله‌ها در ماشین‌های مختلف امکان‌پذیر نیست. بنابراین اندازه زیر محموله‌ها در مرحله اول محاسبه شده است، و در مرحله دوم، توالی کارها با حل مساله زمان‌بندی تولید کارگاهی استاندارد با اندازه زیرمحموله‌های ثابت و مشخص محاسبه شده است. از آنجاکه این مساله NP_hard است، رویه‌ای ابتکاری بر اساس روش تغییر گلوگاه برای حل آن به کار گرفته شده است. نتایج آزمایش‌های عددی حاکی از بهبود در دوره ساخت به دلیل استفاده از جریان محموله است. آن‌ها همچنین در مطالعه دیگر خود [۷] زیر محموله‌ها را بار راه‌اندازی متصل و محدودیت‌های پیش‌نیازی در نظر گرفته‌اند.

وگنر و همکاران [۸] جریان محموله در یک محیط تولید کارگاهی را با تابع هدف به حداقل رساندن زمان جریان و کارهای تاخیردار، اعمال نمودند. مطالعه آن‌ها دو موضوع اصلی را در برمی‌گرفت: تاثیر زمان راه‌اندازی در جریان محموله و تعیین اندازه محموله‌ها. نتایج کار آن‌ها نشانگر کاهش ۳۹ درصدی تاخیر و تعداد کارهای تاخیردار است.

جونگ و همکاران [۹] یک روش تکرارشونده برای تقسیم کارها باهدف حداقل کردن دوره ساخت و در نظرگیری موعد تحویل ارائه کردند. آن‌ها تاثیر زمان راه‌اندازی منفصل و استفاده از زیرمحموله‌های پیوسته را نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در روش آن‌ها تغییرات روی اندازه زیر محموله‌ها و توالی آن‌ها تا جایی ادامه می‌یافت که دیگر بهبودی در دوره ساخت صورت نپذیرد. نتایج کار آن‌ها نشانگر بهبود ۸۰ درصدی نسبت به حالت چشم‌پوشی از جریان محموله بوده است.

لو همکاران [۱۰] یک مدل ریاضی برای مساله تولید کارگاهی با جریان محموله با در نظرگیری زمان آماده‌سازی وابسته پیشنهاد نمودند. تابع هدف مدل پیشنهادی آن‌ها دوره ساخت بود. آن‌ها با این فرض این که اندازه زیر محموله‌ها داده می‌شود، چند نمونه را مورد آزمایش قرار دادند که در آن‌ها زیر محموله‌ها هم‌اندازه در نظر گرفته می‌شدند. آن‌ها همچنین مزایای استفاده از جریان محموله را در مساله تولید کارگاهی برشمردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از تکنیک‌های جریان محموله، به‌طور موثر می‌تواند زمان تولید و هزینه در یک سیستم تولید کارگاهی را بهبود بخشد.

فلدمن و بیسکاپ [۱۱] مدل جریان محموله را برای حل مسائل چند محصولی توسعه دادند. به‌منظور بررسی مزایای جریان محموله در مدل توسعه داده‌شده، ۱۶۰ نمونه کوچک و متوسط مورد

زمانی معقول، خوب عمل می کند اما در فرآیند جستجوی محلی برای کاربردهای شمارشی به مشکل برمی خورد [۱۴].

۳-۱. مراحل پیاده سازی الگوریتم جستجوی هارمونی

✓ قدم ۱: مقداردهی اولیه به پارامترهای الگوریتم و پارامترهای مساله

پارامترهای موردنیاز در این الگوریتم عبارتند از:

۱. سایز حافظه هارمونی^{۱۱} یا تعداد بردارهای جواب در حافظه هارمونی
۲. نرخ لحاظ شده برای حافظه هارمونی^{۱۱}، این پارامتر بین ۰ و ۱ تغییر می کند و نرخ انتخاب یک مقدار برای متغیر تصمیم جدید از مقادیر قبلی ذخیره شده در حافظه هارمونی می باشد.
۳. نرخ تعدیل صدا^{۱۱}، نرخ که مشخص می کند مقدار متغیر جدید که از حافظه انتخاب شده آیا نیاز به تعدیل دارد یا خیر.
۴. تعداد جایگزینی ها در حافظه هارمونی با شرط توقف. (ماکزیمم تعداد جستجوها)

✓ قدم ۲: ارزیابی و مقداردهی اولیه به حافظه هارمونی

در موسیقی هر نوازنده، یک نت را که در محدوده‌ی ممکن قرار دارد می نوازد و این نت‌ها در مجموع یک بردار هارمونی را می سازند اگر مجموعه این نت‌ها یک هارمونی خوب را بسازند این تجربه در حافظه هر نوازنده ذخیره می شود و احتمال ساخت یک هارمونی خوب در نوبت بعدی افزایش می یابد. به همین ترتیب در مسایل بهینه سازی نیز هر متغیر تصمیم در ابتدا یکی از مقادیر موجود در رده ممکن را اتخاذ می کند و مجموعه این مقادیر یک بردار جواب را می سازند، اگر ارزش‌های تخصیص یافته به متغیرهای تصمیم، با توجه به ارزش حاصله برای تابع هدف، یک جواب خوب را بسازند این تجربه در حافظه متغیرها ذخیره می شود و احتمال ایجاد یک جواب خوب در نوبت بعدی افزایش می یابد.

✓ قدم ۳: ساخت هارمونی جدید (بردار جواب جدید)

زمانی که یک متغیر تصمیم جدید بخواهد یک مقدار اختیار کند،

در الگوریتم HS، از یکی از ۳ قاعده زیر را پیروی می شود:

۱. انتخاب یکی از مقادیر موجود در حافظه^{۱۳}.
۲. انتخاب یک مقدار همسایه و نزدیک به یکی از مقادیر موجود در حافظه^{۱۴}.
۳. انتخاب کاملاً تصادفی مقداری از بین محدوده مقادیر ممکن^{۱۵}.
۴. قدم ۴: به روزرسانی حافظه هارمونی

اگر بردار هارمونی جدید حاصل شده مقدار بهتری از نظر تابع هدف، نسبت به بدترین هارمونی موجود در حافظه داشته باشد، جایگزین

هارمونی قبلی در حافظه هارمونی شده و هارمونی با بدترین مقدار تابع هدف از آن خارج می شود.

✓ قدم ۵: بررسی شرط توقف الگوریتم

الگوریتم زمانی پایان می یابد که شرط توقف برآورده شود در غیر این صورت مراحل ۳ و ۴ تا برقراری شرط توقف تکرار می شوند.

۳-۲. الگوریتم جستجوی هارمونی پیشنهادی

به منظور منطبق کردن فضای مساله با ساختار الگوریتم جستجوی هارمونی بخش‌های موردنیاز مختلفی برای الگوریتم تعریف شده و باهدف بهبود کارایی آن تغییرات لازم در الگوریتم جستجوی هارمونی کلاسیک داده شده است که عبارتند از:

۳-۲-۱. تابع برازندگی^{۱۶}

تابع برازندگی الگوریتم طراحی شده برای حل این مساله، بر پایه مقدار دوره ساخت محاسبه خواهد شد که این مقدار در واقع بیشترین زمان تکمیل عملیات‌های زمان بندی شده است.

۳-۲-۲. نحوه نمایش جواب

برای نمایش جواب‌ها در الگوریتم پیشنهادی از روش نمایشی مشابه روش جایگشتی استفاده شده است. با این تفاوت که برای اعمال زیر محموله‌ها در نمایش جواب با هر یک از آن‌ها به مانند یک کار جداگانه رفتار می شود. به این ترتیب هر جواب در الگوریتم پیشنهادی با یک بردار دو سطری مطابق با شکل (۳) نمایش داده می شود. سطر اول جواب نشانگر شماره ماشین تخصیص یافته است و ستون متناظر با آن در سطر دوم شماره فعالیت تخصیص یافته به آن ماشین را نمایش می دهد. ماشین تخصیصی به هر یک از عملیات‌ها نیز از میان ماشین‌های مجاز برای آن عملیات تعیین می گردد. نحوه تخصیص شماره به عملیات‌ها با در نظرگیری قوانین اولویت است. به این صورت است که ابتدا قواعد پیش‌نیازی روی زیر محموله‌ها و سپس روی عملیات‌ها اعمال می گردد (مطابق با شکل (۴)).

۳-۲-۳. کدگشایی جواب‌ها

چهار نوع برنامه زمان بندی شدنی برای مساله تولید کارگاهی انعطاف پذیر در ادبیات مساله معرفی شده است: نیمه فعال، فعال، بهینه و برنامه غیر تاخیری. در الگوریتم ارائه شده، از برنامه زمان بندی فعال برای رمزگشایی راه حل استفاده می شود. در برنامه فعال نیز هیچ عملیاتی را نمی توان پیش از دیگری بدون ایجاد تاخیر در عملیات‌های دیگری و یا نقض محدودیت آغاز نمود. رویه کار به این صورت است:

(j,s,0)	(۱,۱,۱)	(۱,۲,۱)	(۱,۱,۲)	(۱,۲,۲)	(۲,۱,۱)	(۲,۲,۱)	(۲,۱,۲)	(۲,۲,۲)	(۳,۱,۱)
شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

شکل ۳. نحوه تخصیص شماره فعالیت‌ها، z: شماره کار، s: شماره زیرمحواله، 0: شماره عملیات

ماشین	۳	۲	۱	۳	۱	۲	۲	۱	۳
فعالیت	۷	۳	۵	۴	۱	۹	۶	۲	۸

شکل ۴. نمایش تخصیص عملیات‌ها به ماشین‌ها و توالی مربوط به آن‌ها

تعداد و اندازه زیرمحموله‌های هر کار است. از آنجایی بین اندازه زیر محموله‌ها هیچ رابطه خاصی وجود ندارد، برای مقاردهی اولیه آن‌ها از سه رویه زیر بهره می‌بریم:

۱. زیر محموله‌هایی با اندازه‌های برابر (B_j) برابر اندازه محموله J ام و S_j برابر تعداد زیر محموله‌ها و bs_j برابر اندازه زیرمحموله s ام از محموله J است.:

$$b_{sj} = B_j / S_j \quad \forall s, \forall j \quad (1)$$

۲. هر زیرمحموله متأثر از ضریبی مانند a است که یک عدد تصادفی بین ۰ تا ۱ تعریف شده است. بنابراین اندازه زیر محموله‌ها برابرند با:

$$b_{sj} = \frac{a_{sj}}{\sum_{s=1}^{S_j-1} a_{sj}} \cdot B_j \quad s = 1, \dots, S_j - 1 \quad (2)$$

$$b_{S_j j} = B_j - \sum_{s=1}^{S_j-1} b_{sj} \quad (3)$$

۳. مطابق با رویه پیشنهادی مشابه با بوشر [۶]، به هر زیرمحموله ضریبی مانند f تخصیص داده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f_{sj} = s^2 (S_j - s + 1)^2 / S_j + Rand(2, \dots, 10) \quad (4)$$

$$b_{sj} = \frac{f_{sj}}{\sum_{s=1}^{S_j-1} f_{sj}} \cdot B_j \quad s = 1, \dots, S_j - 1 \quad (5)$$

$$b_{S_j j} = B_j - \sum_{s=1}^{S_j-1} b_{sj} \quad (6)$$

برخلاف روش‌های معمول که سائز برابری به زیرمحموله‌های مختلف تخصیص می‌دهند، این رویه برای مقاردهی اولیه به زیر محموله‌ها نه تنها انعطاف‌پذیری بیشتری به الگوریتم می‌دهد بلکه تخمین مطمئن‌تری برای اندازه نهایی آن‌ها است. لازم به ذکر است که این مقادیر همانند پاسخ اولیه برای الگوریتم قلمداد شده و طی فرایند بهینه‌سازی اندازه آن‌ها به منظور رسیدن به جوابی بهینه دست خوش تغییر خواهد شد.

۱. برای عملیات‌هایی که امکان آغاز شدن دارند، زودترین زمان آغاز ممکن با در نظرگیری روابط پیش‌نیازی در میان ماشین‌های مجاز به‌عنوان زمان ورود تعیین می‌گردد.

۲. پس از تعیین زمان ورود در گام ۱، عملیاتی که زودترین زمان ورود ممکن را دارد برگزیده می‌شود.

۳. چنانچه زمان ورود تعیین‌شده زمانی کمتر از زمان تکمیل آخرین عملیات ماشین مربوط به آن برای پردازش عملیات انتخابی باشد، عملیات انتخابی در همان زمان روی ماشین مربوطه آغاز می‌گردد و زمان تکمیل آخرین کار بروز می‌گردد.

۴. چنانچه گام ۳ برای عملیات انتخابی میسر نشد این عملیات در جای تعیین‌شده خود یعنی پس از آخرین عملیات پردازش‌شده روی ماشین مربوطه قرار می‌گیرد.

۵. روند بالا تا مشخص شدن وضعیت تمامی عملیات‌ها ادامه می‌یابد.

استفاده از این رویه کدگشایی سبب می‌شود که الگوریتم برای یافتن جواب نهایی، فضای کمتری را جستجو نماید.

۳-۲-۴. تولید جواب اولیه

تولید جواب اولیه شامل دو مرحله تخصیص ماشین به تمام عملیات‌ها و تعیین توالی آن‌ها است. در این با توجه به ویژگی بارز این الگوریتم که از جستجوی تصادفی استفاده می‌کند از این رو برای تولید جواب از قاعده‌ای تصادفی استفاده شده است. به این صورت که جایگشتی تصادفی از عملیات‌های ایجادشده و به صورت تصادفی به ماشین‌های مجاز مربوطه تخصیص داده می‌شوند. لازم به ذکر است که از آنجایی که امکان ایجاد جواب‌های نشدنی در این نحوه تولید زیاد است از این رو برای جلوگیری از نشدنی بودن جواب‌ها نوعی فرایند اصلاحی به کار برده شده است. در فاز اول فرایند اصلاحی نحوه چیدمان شماره فعالیت‌ها بررسی می‌گردد که قوانین پیش‌نیازی زیر محموله‌ها و عملیات‌ها در مورد هر کار رعایت شده باشد. بنابراین اولویت‌ها از چپ به راست مطابق با اصول پیش‌نیازی تعیین می‌گردند. در فاز دوم نیز بررسی می‌شود که ماشین تخصیص‌یافته مجاز به پردازش عملیات مربوطه باشد. با اعمال این فرایندها در بدنه جواب از تولید هرگونه جواب نشدنی جلوگیری می‌گردد. جواب‌های تولیدی سپس از نظر تابع هدف ارزیابی و در حافظه تخصیص‌یافته مرتب می‌شوند.

۳-۲-۵. تولید سائز اولیه برای زیر محموله‌ها

بردار جواب تعریف‌شده تنها به تخصیص و توالی عملیات‌های زیر محموله‌ها می‌پردازد اما نکته مهمی که باید اضافه شود، اعمال تاثیر

۳-۲-۶. ساخت هارمونی جدید

در این مرحله یک بردار هارمونی جدید ساخته می شود. مطابق با اصول اولیه الگوریتم در بخش انتخاب تصادفی، می بایست هارمونی های جدید را بدون قاعده خاصی و پس از در نظرگیری حافظه هارمونی ساخت. اما در الگوریتم پیشنهادی ابتدا هارمونی های جدید بر اساس قاعده ای بر پایه عملگر تقاطع ساخته می شود. در الگوریتم پیشنهادی دو عملگر ادغام مورد استفاده قرار می گیرند که یکی تغییر در توالی و دیگری تغییر در تخصیص را در جواب حاصل (فرزند) بر عهده دارند. در یک مساله زمان بندی، در هنگام استفاده از یک عملگر ادغام که موجب تغییر در توالی می گردد، لازم است که قواعد پیش نیازی نیز مدنظر قرار گیرد. عملگر مورد استفاده در این بخش در واقع عملگر پیشنهادی توسط کیسم و همکاران [۱۵] تحت عنوان POX است که روابط پیش نیازی را به خوبی در نظر می گیرد.

عملگر POX در هر بار ادغام دو فرزند تولید می نماید. به این ترتیب که ابتدا به تصادف یک کار را انتخاب می کند. سپس تمامی عملیات های مربوط به تمامی محموله های این کار را از والد اول به اولویت های مشابه در فرزند اول کپی می کند. عملیات مربوط به سایر کارها نیز با توجه به اولویت های والد دوم، اولویت های خالی فرزند اول را پر می کنند. مشابه همین فرایند برای فرزند دوم تکرار می گردد. عملگر ادغام دوم استفاده شده نیز بر نحوه تخصیص اثر می گذارد. این عملگر ابتدا زیرمجموعه ای از عملیات ها را انتخاب می کند. برای تخصیص در فرزند اول، برای این زیرمجموعه ای از الگوی تخصیص والد اول و برای سایر عملیات ها از الگوی والد دوم استفاده می کند. قاعده ای مشابه نیز در مورد فرزند دوم مورد استفاده قرار می گیرد.

در الگوریتم پیشنهادی انتخاب تصادفی والدها بر اساس روش چرخ رولت صورت گرفته است. پس از تولید جواب ها در نتیجه عمل تقاطع مذکور، جواب ها بر اساس تابع هزینه ارزیابی و فرزند بهتر به عنوان هارمونی جدید انتخاب می شود. تعداد هارمونی های تولید شده به این روش بر اساس نیاز و شرایط مساله تعیین می گردد.

همان طور که ذکر شد یکی دیگر از قواعد تولید هارمونی جدید انتخاب یکی از مقادیر موجود در حافظه است. در این قاعده مقدار متغیر جدید با احتمال $HMCR$ از مقادیر موجود در حافظه هارمونی انتخاب می شوند. در الگوریتم پیشنهادی در این مرحله یک عدد تصادفی تولید و در صورتی که $HMCR$ بزرگ تر از آن باشد یکی از مقادیر موجود در حافظه انتخاب و جایگزین جواب تولیدی متناظر در مرحله ادغام می گردد.

به منظور پیاده سازی قاعده دوم یعنی انتخاب یک مقدار همسایه و نزدیک به یکی از مقادیر موجود در حافظه، از آنجایی که ماهیت مساله اجازه استفاده از روش های کلاسیک الگوریتم جستجوی

هارمونی را نمی دهد، ازین رو برای تولید و همچنین بهبود جواب ها بجای استفاده از روندهای تصادفی و جهشی، چنانچه مقدار PAR بیش از عدد تصادفی تولیدی باشد، ساختار همسایگی منطبق بر ساختار مساله تعریف می گردد. از آنجایی که ساختار همسایگی باید به گونه ای باشد که هم تخصیص و توالی را در نظر بگیرد و هم اندازه زیر محموله ها را، از این رو دو نوع ساختار همسایگی تعریف می گردد که ساختارهای اولین نوع عبارتند از:

۱. دو عملیات به تصادف انتخاب و چنانچه متعلق به یک بلوک بحرانی باشند، آن ها را باهم جابجا می کنیم. این روش ایجاد همسایگی که توسط لارهوون و همکاران [۱۶] پیشنهاد شده است دارای خاصیتی به نام اتصال^{۱۸} است. این ویژگی سبب می شود که امکان رسیدن به بهینه سراسری برای هر توالی شدنی به کمک این همسایگی وجود داشته باشد [۱۶].
۲. دو عملیات به تصادف انتخاب و آن ها را باهم جابجا می کنیم^{۱۹}.
۳. یکی از عملیات ها را به تصادف انتخاب و آن را به یکی از ماشین های مجاز به پردازش انتقال می دهیم.
۴. مطابق با شکل (۵) دو عملیات به تصادف انتخاب و عمل معکوس سازی^{۲۰} را بین آن ها انجام می دهیم.

۶	۳	۱۰	۲	۸	۴	۷	۵	۹	۱
---	---	----	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۵-الف. عملیات های ۲ و ۵ انتخاب شده اند

۶	۳	۱۰	۲	۷	۴	۸	۵	۹	۱
---	---	----	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۵-ب. عمل معکوس سازی روی عملیات های مابین ۲ و ۵ اعمال شده است

۵. مطابق با شکل (۶) دو عملیات به تصادف انتخاب و عمل حذف و انتقال^{۲۱} را روی آن ها اعمال می کنیم.

۶	۳	۱۰	۲	۸	۴	۷	۵	۹	۱
---	---	----	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۶-الف. عملیات های ۲ و ۵ انتخاب شده اند.

۶	۳	۱۰	۸	۴	۷	۵	۲	۹	۱
---	---	----	---	---	---	---	---	---	---

شکل ۶-ب. عمل حذف و انتقال روی عملیات ۲ اعمال شده است.

۶. دو مقدار تخصیص یافته به اندازه زیر محموله ها به تصادف انتخاب و آن ها را باهم جابجا می کنیم.

جستجوی هارمونی، حکم جواب اولیه‌ای باکیفیت و با اندازه زیر محموله تعیین شده برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را خواهد داشت. فلوجارت رویه بهینه‌سازی در این الگوریتم به‌اختصار در شکل ۷ آورده شده است.

۳-۲-۹. طراحی آزمایش‌ها

هریک از الگوریتم‌های مورد استفاده برای انجام فرایند بهینه‌سازی، نیازمند تعریف مقادیر پارامترهای تشکیل‌دهنده آن‌ها می‌باشند. در الگوریتم جستجوی هارمونی معرفی شده، تعداد تکرارهای معین برای رسیدن به شرط توقف، اندازه حافظه و نرخ‌های در نظرگیری حافظه و همسایگی به‌عنوان پارامترهای موثر در نظر گرفته شدند. در مورد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نیز پارامترهای دمای اولیه، چگونگی کاهش دما، نرخ کاهش دما، تعداد تکرار در هر دما و تعداد تکرار پارامترهای موثر تعریف شده‌اند. هدف از پیاده‌سازی طراحی آزمایش‌ها، به دست آوردن حداکثر اطلاعات ممکن با حداقل تعداد آزمایش‌ها است. در این تحقیق، به‌منظور کشف اثر هر یک از پارامترهای ذکر شده در بخش قبل و تعیین سطح بهینه هر یک از آن‌ها با حداقل تعداد آزمایش، از رویکرد طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. با توجه به تعداد پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده برای هر یک از آن‌ها در الگوریتم پیشنهادی از یک طرح آزمایش تاگوچی استفاده شد. نتایج حاصل که در واقع نشان‌دهنده پارامترهای مناسب جهت به‌کارگیری با معیار کیفیت تابع هدف در یک‌زمان معقول است، در جدول (۱) نشان داده شده است.

۷. دو مقدار تخصیص‌یافته به‌اندازه زیر محموله‌ها به‌تصادف انتخاب و در صورت امکان به مقدار اول یک واحد اضافه و از دومی یک واحد می‌کاهیم.

پس از اعمال هر ساختار همسایگی جواب حاصله بررسی می‌گردد، چنانچه جواب تولیدی را بهبود داده باشد، جایگزین جواب قبلی می‌شود و ساختار همسایگی بعدی روی جواب تولیدی جدید اعمال می‌گردد. اولویت انتخاب روش تغییر همسایگی از موارد بالا به صورت تصادفی است.

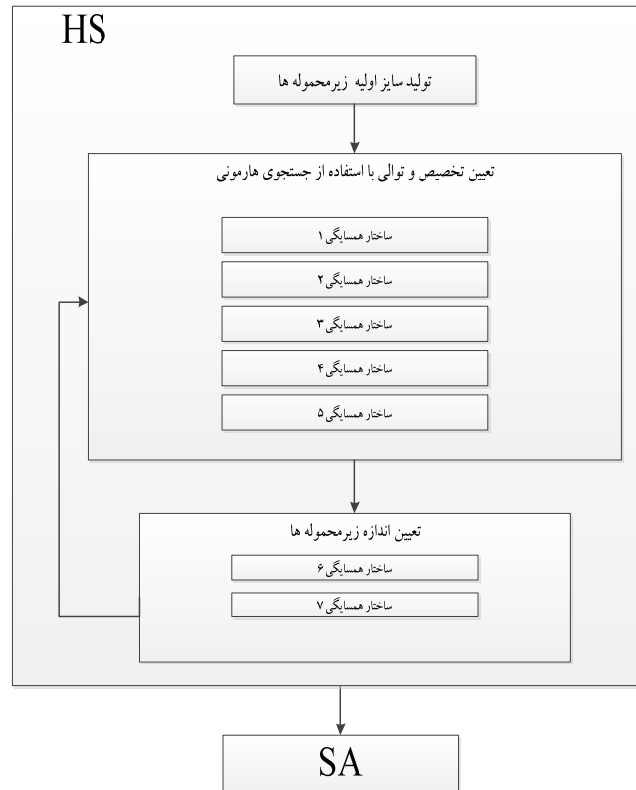
۳-۲-۷. به‌روزرسانی حافظه هارمونی

بردار هارمونی جدید حاصل شده از نظر تابع هدف ارزیابی شده و چنانچه مقدار بهتری نسبت به بدترین هارمونی موجود در حافظه داشته باشد، جایگزین هارمونی قبلی در حافظه هارمونی شده و هارمونی با بدترین مقدار تابع هدف از آن خارج می‌شود، این پروسه جایگزینی^{۲۲} نامیده می‌شود.

۳-۲-۸. بررسی شرط توقف

الگوریتم زمانی پایان می‌یابد که شرط توقف برآورده شود در غیر این صورت مراحل بالا تا برقراری شرط توقف تکرار می‌شوند. شرط توقف در الگوریتم پیشنهادی رسیدن به حد معینی از تکرار تعریف شده است.

پس از انجام رویه بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی، جواب‌های تولیدی به‌منظور بهبود کیفیت در تعیین تخصیص و توالی، توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^{۲۳} دوباره در رویه بهینه‌سازی شرکت داده می‌شود. در واقع خروجی‌های الگوریتم



شکل ۷. رویه بهینه سازی الگوریتم پیشنهادی

۴. آزمایش ها و نتایج

یکی از نمونه مسائل موجود در زمینه تولید کارگاهی، مسائل پیشنهادی فتاحی و همکاران [۱۷] است که به واسطه پراکندگی مناسب و درستی و در دسترس بودن داده ها با استقبال قابل توجهی از جانب محققین روبهرو شده تا جایی که از آن به عنوان یکی از بهترین نمونه های موجود یاد می گردد [۱۸]. به این ترتیب برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی این سری مسائل به عنوان مسائل مرجع در نظر گرفته می شوند. این مجموعه مسائل شامل ۲۰ مساله شامل ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ است. ابعاد هر مساله با سه پارامتر زیر تعیین می گردد:

m : تعداد ماشین های موجود، n : تعداد کارهای موجود برای پردازش، z : تعداد عملیات تشکیل دهنده هر کار بنابراین هر مساله را می توان با یک سه تایی مرتب (m, n, z) معرفی کرد. هرچقدر پارامترهای فوق مقادیر بزرگ تری بپذیرند، فضای جواب مساله بزرگ تر شده و زمان حل مساله افزایش می یابد. اولین مساله از نظر بعد فضای جواب کوچک ترین مساله و با بزرگ تر شدن شماره مساله، ابعاد نیز آن نیز بزرگ تر می شود. جدول (۲) مشخصات مسائل نمونه مورد آزمایش را نشان می دهد.

جدول ۱. مقادیر انتخابی برای پارامترهای موثر

پارامتر	اندازه مناسب	پارامتر	اندازه مناسب
تعداد تکرارهای HS	۱۰۰	دمای اولیه SA	۱۰۰
HMS	۵	چگونگی کاهش دما	هندسی
HMCR	۰.۹۵	نرخ کاهش دما	۰.۸۵
PAR	۰.۳	تعداد تکرار در هر دما	۵
		تعداد تکرار SA	۵۰۰

جدول ۲. مشخصات مسائل نمونه

شماره مساله	p _۱	p _۲	p _۳	p _۴	p _۵	p _۶	p _۷	p _۸	p _۹	p _{۱۰}
n	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴
m	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۵	۴	۳	۵
o _j	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳
شماره مساله	p _{۱۱}	p _{۱۲}	p _{۱۳}	p _{۱۴}	p _{۱۵}	p _{۱۶}	p _{۱۷}	p _{۱۸}	p _{۱۹}	p _{۲۰}
n	۵	۵	۶	۷	۷	۸	۸	۹	۱۱	۱۲
m	۶	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۸	۸	۸
o _j	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۴	۴	۴

برای حل نمونه‌ها نیز از الگوریتم پیشنهادی استفاده شد که نتایج در جدول (۳) آورده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری جریان محموله باحالتی که از آن چشم‌پوشی شود، درمی‌یابیم که به‌کارگیری این رویکرد تاثیر چشم‌گیری در کاهش دوره ساخت داشته است تا آنجا که در تمامی موارد پاسخی بهتر از حالت معمول ارائه داده است.

غالب بودن پاسخ‌های ارائه شده توسط الگوریتم با در نظرگیری جریان محموله به‌وضوح در شکل (۸) قابل‌مشاهده است و در تمامی موارد شاهد بهبود در دوره ساخت هستیم، حال آنکه در برخی نمونه‌ها پاسخ‌ها بهبود چشمگیری نسبت به بقیه داشته‌اند.

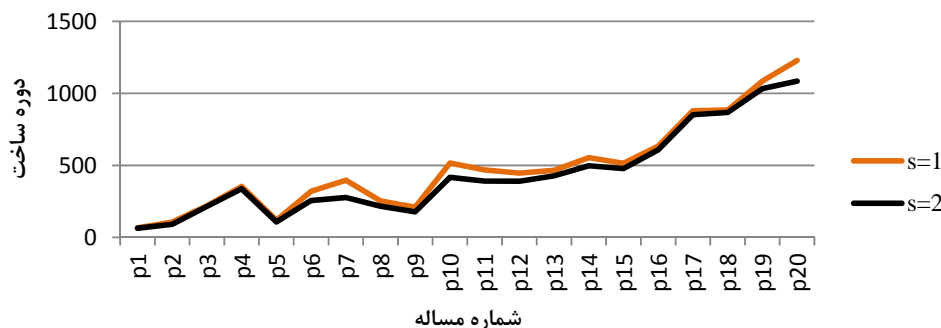
۴-۱. نتایج حاصل از حل مسائل نمونه با در نظرگیری جریان محموله

برای محاسبه دوره ساخت (C_{max}) در حالت در نظرگیری جریان محموله به صورتی که قابل‌مقایسه باحالت بدون در نظرگیری آن، از روشی مشابه با بوشر [۶] استفاده می‌کنیم. در این حالت دوره ساخت از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$C_{max} = C_{max}^j / B_j \quad (7)$$

جدول ۳. نتایج حاصل از جریان محموله و درصد بهبود در صورت به‌کارگیری آن

شماره مساله	S _{j=۲}	S _{j=۱}	درصد بهبود
۱p	۶۴	۶۶	۳.۰۳
۲p	۹۰.۹	۱۰۷	۱۵.۰۴
۳p	۲۱۵.۹	۲۲۱	۲.۳
۴p	۳۳۷.۵	۳۵۵	۴.۹
۵p	۱۰۸.۲	۱۱۹	۹
۶p	۲۵۶	۳۲۰	۲۰
۷p	۲۷۷	۳۹۷	۳۰.۲۲
۸p	۲۱۶.۷	۲۵۳	۱۴.۳
۹p	۱۷۷.۶	۲۱۰	۱۵.۴
۱۰p	۴۱۷.۵	۵۱۶	۱۹.۰۸
۱۱p	۳۹۰.۹	۴۶۸	۱۶.۴۷
۱۲p	۳۸۹.۵	۴۴۶	۱۲.۶۶
۱۳p	۴۲۸.۱	۴۶۶	۸.۱۳
۱۴p	۴۹۷.۶	۵۵۴	۱۰.۱
۱۵p	۴۷۸.۲	۵۱۴	۶.۹۶
۱۶p	۶۰۸.۲	۶۳۴	۴.۰۶
۱۷p	۸۵۲	۸۷۹	۳.۰۷
۱۸p	۸۶۸.۲	۸۸۴	۱.۷۸
۱۹p	۱۰۳۳.۲	۱۰۸۵	۴.۷۷
۲۰p	۱۰۸۵.۵	۱۲۲۸	۱۱.۰۶



شکل ۸. مقایسه پاسخ‌های حاصل از در نظرگيري جريان محموله با عدم در نظرگيري

استفاده از فرایند تولید تصادفی بردارهای جواب و نیز استفاده از تعاریف تولید همسایگی بجای جهش‌های تصادفی است. چنانچه استفاده از فرایند تولید تصادفی را حالت ۱ و جهش‌های تصادفی را حالت ۲ بنامیم، نتایج بهترین پاسخ تولیدی الگوریتم در هریک از این حالت‌ها در جدول (۴) آورده شده است.

۴-۲. تحلیل نتایج حاصل از به کارگيري تغییرات پیشنهادی

در ساختار الگوریتم جستجوی هارمونی

همان‌طور که در بیان ساختار الگوریتم پیشنهادی، پاره‌ای از تغییرات در بدنه الگوریتم جستجوی هارمونی اصلی به‌منظور بالا بردن کارایی الگوریتم بکار برده شده است. این تغییرات شامل استفاده از عملگر تقاطع در تولید بردارهای جواب جدید به‌جای

جدول ۴. نتایج حاصل از به کارگيري تغییرات پیشنهادی در ساختار الگوریتم جستجوی هارمونی

شماره مساله	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
پیشنهادی	۶۴	۹۰.۹	۲۱۵.۹	۳۳۷.۵	۱۰۸.۲	۲۵۶	۲۷۷	۲۱۶.۷	۱۷۷.۶	۴۱۷.۵
حالت ۱	۶۴	۹۰.۹	۲۱۵.۹	۳۳۷.۵	۱۰۸.۲	۲۵۹	۲۸۶	۲۳۳	۱۸۷	۴۴۲
حالت ۲	۶۴	۹۰.۹	۲۱۵.۹	۳۳۷.۵	۱۰۸.۲	۲۶۱	۲۸۴	۲۲۷.۵	۱۷۷.۶	۴۳۴.۵
شماره مساله	p11	p12	p13	p14	p15	p16	p17	p18	p19	p20
پیشنهادی	۳۹۰.۹	۳۸۹.۵	۴۲۸.۱	۴۹۷.۶	۴۷۸.۲	۶۰۸.۲	۸۵۲	۸۶۸.۲	۱۰۳۳.۲	۱۰۸۵.۵
حالت ۱	۴۰۲	۴۰۳	۴۳۹.۲	۵۲۴.۵	۴۹۱	۶۲۸	۸۷۹	۸۸۴	۱۰۸۳	۱۱۹۲
حالت ۲	۳۹۹.۵	۴۱۳	۴۴۲	۵۲۴	۴۸۷.۵	۶۱۹	۸۷۳	۸۸۲.۵	۱۰۶۷	۱۱۴۳

همان‌طور که گفته شد جواب خروجی حاصل از الگوریتم HS پیشنهادی به‌عنوان جواب اولیه الگوریتم SA در نظر گرفته می‌شود و دوباره وارد فرایند بهینه‌سازی می‌گردد. نتایج خروجی حاصل از خود الگوریتم HS در جدول (۵) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید اضافه نمودن SA به‌عنوان الگوریتم بهبوددهنده جواب نهایی در ۱۱ مساله اول تاثیر چندانی ندارد. با بالا رفتن اندازه نمونه‌ها تاثیرات مثبت این الگوریتم آشکار می‌گردد تا جایی که در نمونه‌های آخر بهبود چشمگیر است. در جدول (۵) پاسخ‌هایی از الگوریتم پیشنهادی که بر پاسخ‌های HS غالب هستند برجسته شده‌اند.

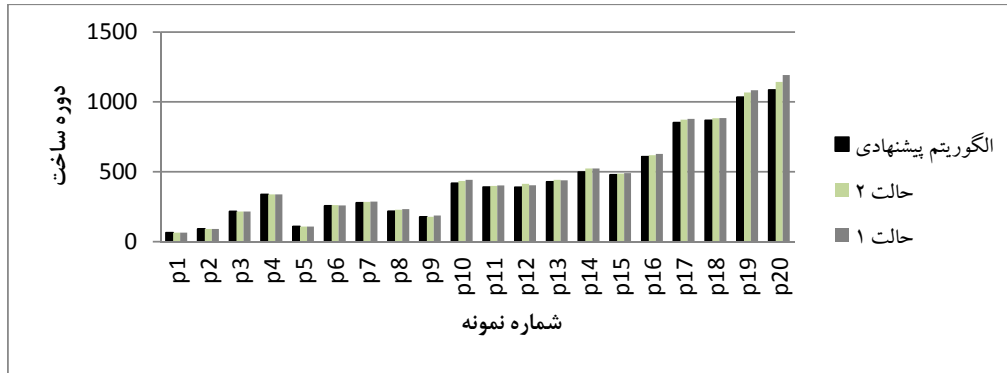
در حالت ۱ تمامی بردارهای جدید به‌طور تصادفی تولید شده‌اند. این رویه تولید بردار جواب به‌طور معمول در جستجوی هارمونی کلاسیک استفاده می‌گردد. عملگر تقاطع پیشنهادی هرچند تا حدودی از ویژگی کاوش در فضای جواب می‌کاهد، ولی خاصیت استخراج پاسخ‌های باکیفیت را افزایش می‌دهد. در جستجوی هارمونی کلاسیک، از قاعده‌ای مشابه با جهش و به‌گونه‌ای تصادفی بهره برده می‌شود، حال آنکه با تعریف همسایگی‌ها در الگوریتم پیشنهادی این رویه تا حدود چشمگیری قانونمند شده است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود استفاده از این تغییرات در کیفیت جواب‌ها به‌ویژه در مسایل بزرگ‌تر بسیار موثر بوده و همواره اثر مثبتی در بهترین پاسخ به‌دست‌آمده داشته است.

۳-۴. ارزیابی کارایی الگوریتم در حالت در نظرگیری جریان

محموله

حال برای نشان دادن کارایی آن در حالت در نظرگیری جریان محموله، شرایط حاکم در این حالت را روی الگوریتم GA پیشنهادی توسط چن و همکاران [۱۹] اعمال و ۲۰ مساله نمونه حل گردید. نتایج حاصل از این الگوریتم در جدول (۶) آورده شده است.

مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی و GA حاکی از غالب بودن جواب‌های الگوریتم پیشنهادی به‌ویژه در مواردی است که اندازه مساله بالا رفته و فضای جواب گسترده‌تر و پیچیده‌تر می‌گردد. برتری کارایی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



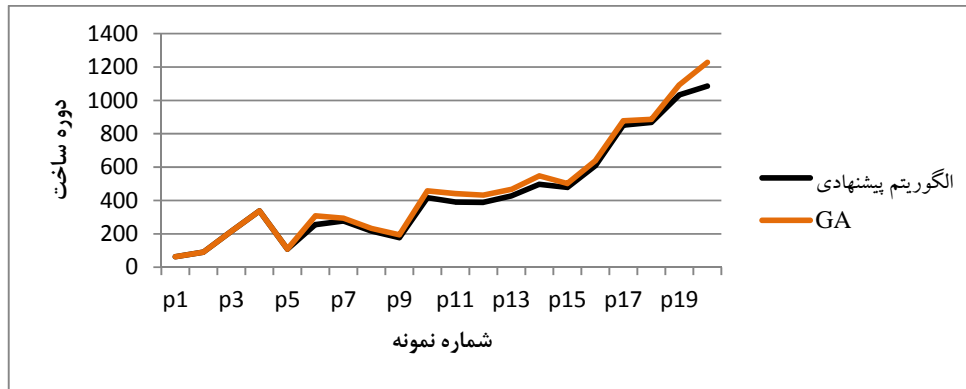
شکل ۹. مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری تغییرات پیشنهادی در ساختار الگوریتم جستجوی هارمونی

جدول ۵. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی و HS

شماره مساله	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
پیشنهادی	۶۴	۹۰.۹	۲۱۵.۹	۳۳۷.۵	۱۰۸.۲	۲۵۶	۲۷۷	۲۱۶.۷	۱۷۷.۶	۴۱۷.۵
HS	۶۴	۹۰.۹	۲۱۵.۹	۳۳۷.۵	۱۰۸.۲	۲۵۶	۲۷۷	۲۱۶.۷	۱۷۷.۶	۴۱۷.۵
شماره مساله	p11	p12	p13	p14	p15	p16	p17	p18	p19	p20
پیشنهادی	۳۹۰.۹	۳۸۹.۵	۴۲۸.۱	۴۹۷.۶	۴۷۸.۲	۶۰۸.۲	۸۵۲	۸۶۸.۲	۱۰۳۳.۲	۱۰۸۵.۵
HS	۳۹۰.۹	۳۹۴	۴۲۸.۱	۵۰۷.۱	۴۸۱	۶۱۲	۸۵۶.۲	۸۷۱.۱	۱۰۴۲.۵	۱۰۹۵

جدول ۶. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی و GA

شماره مساله	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
پیشنهادی	۶۴	۹۰.۹	۲۱۵.۹	۳۳۷.۵	۱۰۸.۲	۲۵۶	۲۷۷	۲۱۶.۷	۱۷۷.۶	۴۱۷.۵
GA	۶۴	۹۰.۹	۲۱۵.۹	۳۳۷.۵	۱۰۸.۲	۳۰۸	۲۹۴.۵	۲۳۳.۲	۱۹۴	۴۵۷.۵
شماره مساله	p11	p12	p13	p14	p15	p16	p17	p18	p19	p20
پیشنهادی	۳۹۰.۹	۳۸۹.۵	۴۲۸.۱	۴۹۷.۶	۴۷۸.۲	۶۰۸.۲	۸۵۲	۸۶۸.۲	۱۰۳۳.۲	۱۰۸۵.۵



شکل ۱۰. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی و GA

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق مساله زمان بندی توليد کارگاهی در سیستمی شامل کارهای محموله‌ای مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به انعطاف پذیری مساله در امکان استفاده از مسیرهای موازی در پردازش برخی عملیات‌ها، به عنوان مساله توليد کارگاهی انعطاف پذیر مورد بررسی واقع شد. همچنین رویه جریان محموله و اثرات آن در این مساله مورد توجه قرار گرفت. پیش از این مساله توليد کارگاهی با در نظرگیری جریان محموله مورد بررسی واقع شده بود اما در هیچ کدام انعطاف پذیری مسیر توليد وجود نداشته است. در تنها مطالعه‌ای که انعطاف پذیری مورد بررسی واقع شده است، رویکردی کاملا برای تعریف مدل ارائه شده است.

با توجه به $NP-hard$ بودن مساله و پیچیدگی مضاعف آن به دلیل ایجاد زیر محموله‌ها، مدل برنامه‌ریزی خطی تنها جوابگوی ابعاد کوچکی از مسائل بود. بنابراین به منظور دستیابی به جوابی حتی الامکان نزدیک به بهینه ارائه یک الگوریتم فرا ابتکاری ضروری به نظر می‌رسید. برای مواجهه با این موضوع از نوعی الگوریتم که در واقع ترکیبی از الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و شبیه‌سازی تبرید بود، استفاده شد. الگوریتم اولیه که ساختاری مبتنی بر جستجوی هارمونی داشت با رویه‌ای تعریف شده در ایجاد جواب‌های جدید، ابتدا به توليد جواب‌هایی مناسب پرداخت. دلیل استفاده از این الگوریتم قابلیت ایجاد جواب‌هایی با کیفیت در مدت زمانی بسیار کوتاه، آن هم در فضای جوابی بزرگ بوده است. در مرحله بعدی از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید که قابلیت‌های شمارشی و جستجوی محلی بالایی دارد، برای بهبود جواب‌های ایجاد شده در مرحله قبل استفاده شد. الگوریتم پیشنهادی بر روی مجموعه‌ای از ۲۰ مساله مینا اجرا و نتایج آن نشان داده شد. برای اثبات کارایی الگوریتم در حالت اضافه شدن جریان محموله، شرایط مساله روی الگوریتم GA پیشنهادی توسط چن و همکاران [۱۹] اعمال شد و نتایج حل مسایل نمونه مقایسه گردید. نتایج نشانگر غلبه الگوریتم پیشنهادی بر GA مذکور است.

تقسیم هر محموله به زیر محموله مستلزم پرداخت هزینه است اما از آنجایی در این مقاله که تابع هدف تنها بر اساس دوره ساخت تعریف شده است این هزینه در آن لحاظ نشده است. البته این موضوع می‌تواند در توسعه مقاله به کار گرفته شود و به عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد. همچنین اضافه کردن پویایی به مدل ارائه شده می‌تواند از اثرات ناشی از لغو شدن سفارش یا تحویل محموله و یا خرابی دستگاه‌ها، که روند اجرای برنامه زمان بندی را به تعویق می‌اندازد، بکاهد که زمینه‌ای دیگر باری تحقیقات آتی است.

این مدل ارائه شده را می‌توان با چندین روش ممکن توسعه داد. اول، شبکه زنجیره تامین را توسعه داد و تامین کنندگان و خرده فروشان را در نظر گرفت و یا در شبکه زنجیره تامین دوباره کاری و مواد برگشتی را نیز لحاظ کرد. دوم، مدل را می‌توان با در نظرگیری نرخ پردازش، قابلیت اطمینان، سطح موجودی اطمینان و مسیریابی توسعه داد. سوم، تصمیمات توليد- توزیع را می‌توان با تصمیمات دیگری مانند مکان‌یابی یا اقتصاد مهندسی ترکیب نمود.

پی‌نوشت

1. Flexible Job-Shop Scheduling
2. Lot Streaming
3. Sublot
4. Overlapping
5. Lot Splitting
6. Batch Size
7. Flow Shop
8. Tabu Search
9. Harmony Search Algorithm
10. Harmony Memory Size: HMS
11. Harmony Memory Consideration Rate: HMCR
12. Pitch Adjustment Rate: PAR
13. Memory consideration
14. Pitch Adjustment
15. Random Selection
16. Fitness Function
17. Precedence Preserving Order based Crossover
18. Connectivity

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, No. 2, Vol. 24, pp. 773-780.
- [11] Feldmann M, Biskup D. Lot streaming with multiple products, Discussion paper, No. 542, Department of Business Administration and Economics, Bielefeld University, Germany, 2005.
- [12] Buscher U, Shen L. An integer programming formulation for the lot streaming problem in a job shop environment with setups, Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2011, IMECS 2011, 16-18 March, 2011, Hong Kong, pp. 1343-1348.
- [13] Defersha F, Chen M. Jobshop lot streaming with routing flexibility, sequence-dependent setups, machine release dates and lag time, International Journal of Production Research, 2012, No. 8, Vol. 50, pp. 2331-2352.
- [14] Geem Z, Kim J. A new heuristic optimization algorithm: harmony search, Simulation, 2001, No. 2, Vol. 76, pp. 60-68.
- [15] Kacem I. Genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. SMC '03 Conference Proceedings, 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 5-8 Oct. 2003, Piscataway, NJ, USA.
- [16] Van Laarhoven P, Aarts E, Lenstra J. Jobshop scheduling by simulated annealing, Oper Res, 1992, Vol. 40, pp. 113-125.
- [17] Fattahi P, Saidi Mehrabad M, Jolai F. Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems, Journal of Intelligent Manufacturing, 2007, No. 3, Vol. 18, pp. 331-342.
- [18] Ozguven C, Ozbakir L, Yavuz Y. Mathematical models for job-shop scheduling problems with routing and process plan flexibility, Applied Mathematical Modelling, 2010, No. 6, Vol. 34, pp. 1539-1548.
- [19] Chen H, Ihlow J, Lehmann C. "A genetic algorithm for flexible job shop scheduling, Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, 10-15 May 1999, Piscataway, NJ, USA.
19. Swap
20. Reversion
21. Insertion
22. Improvisation
23. Simulated Annealing Algorithm: SA
- مراجع**
- [۱] نهاوندی، نسیم؛ عباسیان، محمد. حل مسأله زمان بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف پذیر پویا به وسیله الگوریتم ژنتیک توسعه یافته، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید جلد ۲۱، شماره ۳، ۱۳۸۹، صص. ۲-۱۲.
- [۲] نهاوندی، نسیم؛ عباسیان، محمد. مسأله زمان بندی کار کارگاهی چندهدفی انعطاف پذیر پویا با در نظر گرفتن محدودیت نگهداری و تعمیرات، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید جلد ۲۲، شماره ۱، ۱۳۹۰، صص. ۱۴-۲۶.
- [3] Xia W, Wu Z. An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems, Computers and Industrial Engineering, 2005, No. 2, Vol. 48, pp. 409-425.
- [4] Baker KR, Trietsch D. Principles of Sequencing and Scheduling, New York, Wiley, 2009.
- [5] Dauzere-Peres S, Lasserre J. An Iterative Procedure for Lot Streaming in Job-shop Scheduling, Computers and Industrial Engineering, 1993, Nos. 1-4, Vol. 25, pp. 231-234.
- [6] Buscher U, Shen L. An integrated tabu search algorithm for the lot streaming problem in job shops, European Journal of Operational Research, 2009, No. 2, Vol. 199, pp. 385-399.
- [7] Dauzere-Peres S, Lasserre J. Lot streaming in job shop scheduling, Operations Research, 1997, No. 4, Vol. 45, pp. 584-595.
- [8] Wagner BJ, Ragatz GL. "The impact of lot splitting on due date performance, Journal of Operations Management, 1994, No. 1, Vol. 12, pp. 13-25.
- [9] Jeong H, Park J, Leachman RC. A batch splitting method for a job shop scheduling problem in an mrp environment, International Journal of Production Research, 1999, No. 15, Vol. 37, pp. 3583-3598.
- [10] Low C, Hsu CM, Huang KI. Benefits of lot splitting in job-shop scheduling, International