

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

سال نهم، شماره ۳۳، بهار ۱۳۹۸

شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

ص ص ۸۶ - ۶۱

ارائه الگوریتمی مبتنی بر جست‌وجوی هارمونی برای حل مسئله  
زمان‌بندی چندهدفه تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاژ و با  
در نظر گرفتن جریان محموله

پرویز فتاحی\*، الهام محمدی\*\*، فاطمه دانش‌آموز\*\*\*

چکیده

در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی چندهدفه همراه با یک مرحله مونتاژ و جریان محموله بررسی شده است. جریان محموله، فرآیندی است که طی آن، یک کار (محموله) به تعدادی کار کوچک‌تر (زیرمحموله) تقسیم می‌شود تا بتوان هم‌پوشانی در انجام عملیات مختلف را ایجاد کرد. هدف این مسئله، زمان‌بندی و تعیین توالی عملیات به نحوی است که ضمن برقراری محدودیت‌های موردنظر، دو تابع هدف حداکثر دوره ساخت و هزینه وزنی زودکردها و دیرکردها کمینه شود تا با صرفه‌جویی در زمان و هزینه بتوان به مدیریتی کارآمدتر در واحدهای صنعتی پیشرفته دست یافت. ابتدا به منظور تشریح مسئله، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه شد. از آنجاکه مسئله موردبررسی جزو مسائل NP-hard است، برای حل مسئله از الگوریتمی پیشنهادی مبتنی بر جست‌وجوی هارمونی استفاده شد. به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، از چندین معیار عملکرد استفاده شد. نتایج محاسباتی، عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را نسبت به الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب در کسب جواب‌های باکیفیت نشان داد.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی؛ تولید کارگاهی؛ مونتاژ؛ جریان محموله؛ جست‌وجوی هارمونی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۰.

\* استاد، دانشگاه الزهرا (نویسنده مسئول).

E-mail: p.fattahi@alzahra.ac.ir

\*\* کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

\*\*\* دانشجوی دکتری، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

## ۱. مقدمه

مسئله زمان‌بندی در هر دو شاخه مدیریت تولید و بهینه‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است. زمان‌بندی با تخصیص منابع به فعالیت‌ها سروکار دارد؛ به طوری که هدف، بهینه‌سازی یک یا تعداد بیشتری معیارهای عملکرد باشد. از میان مسائل زمان‌بندی، مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی<sup>۱</sup> (JSSP) یکی از سخت‌ترین مسائل در زمینه زمان‌بندی بوده و به‌عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری مهم در سیستم‌های تولیدی معاصر شناخته شده است. مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی شامل زمان‌بندی  $n$  کار روی مجموعه  $M$  از ماشین‌ها شامل  $m$  ماشین است. هر کار دارای تعدادی عملیات است که باید به‌ترتیب انجام شوند تا معیارهای موردنظر بهینه شود [۱۳].

امروزه با پیشرفت روزافزون فناوری و تنوع در نیازها و خواسته‌های مشتری، حرکت به سوی ساخت و مونتاژ بر اساس سفارش مشتری افزایش یافته است. در این‌گونه مسائل، قطعات در مرحله نخست پردازش شده و قطعات موردنیاز هر محصول در مرحله دوم مونتاژ می‌شوند؛ همچنین امروزه تولیدکنندگان نیازمند پاسخگویی سریع به نیازهای مشتریان و تولیدات باکیفیت بالا هستند. ظهور فناوری‌های جدید، بهبود پیوسته در کیفیت تولیدات و اتخاذ تکنیک‌های برنامه‌ریزی تولید پیشرفته این امر را میسر ساخته است. جریان محموله یکی از تکنیک‌های برنامه‌ریزی تولید است که به‌طور مؤثری به‌سرعت جریان مواد بین ماشین‌ها می‌افزاید و در نتیجه دوره ساخت را کوتاه می‌سازد. ریتز (۱۹۶۶)، برای نخستین بار تکنیک جریان محموله را برای تقسیم یک کار به زیرمحموله‌های آن به طوری که عملیات‌های آن قابلیت روی هم‌افتادگی را داشته باشند، معرفی کرد [۱۴]. در این حالت کارها به‌صورت محموله فرض می‌شوند و طی فرآیندی به اجزای کوچک‌تر تقسیم می‌شوند و پردازش روی آن‌ها صورت می‌گیرد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با توجه به اهمیت مسائل زمان‌بندی تولید دومارحله‌ای و کاربردهای فراوان آن در صنایع تولیدی، چان و همکاران (۲۰۰۸)، برای نخستین بار جریان محموله و مسئله تولید کارگاهی مونتاژ را با هم ترکیب کردند و کاربرد جریان محموله به هر دو مرحله ماشین‌کاری و مونتاژ را گسترش دادند [۱]. در مسئله موردبررسی توسط آن‌ها تابع هدف مسئله حداقل کردن مجموع هزینه نگهداری قطعات تکمیل‌شده و زیرانباشته‌ها و هزینه دیرکرد محصولات بود. آن‌ها برای حل این مسئله پیچیده یک الگوریتم ژنتیک پیشنهاد کردند.

چان و همکاران (۲۰۰۹)، در پژوهش دیگری مطالعات قبلی جریان محموله به مسئله تولید کارگاهی مونتاژ را با مجاز کردن اشتراک‌گذاری قطعات در میان محصولات مجزا توسعه دادند

---

1. Job Shop Scheduling Problem (JSSP)

[۲]. در مسئله مورد بررسی توسط آن‌ها هدف حداقل کردن هزینه نگهداری محصولات بود. آن‌ها علاوه بر استفاده از قواعد توزیع ساده، یک الگوریتم تکاملی با الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله پیشنهاد کردند. وانگ و همکاران (۲۰۰۹)، نیز کاربرد مفهوم جریان محموله در یک مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی مونتاژ با محدودیت منابع را بسط دادند. هدف آن‌ها، کمینه‌سازی هزینه تأخیر کل محصولات نهایی بود و برای افزایش سودمندی مدل، دو عامل تجربی دیگر معرفی شد. این دو عامل شامل نرخ بخش مشترک و شاخص بار کاری بود. آن‌ها یک روش جدید با الگوریتم ژنتیک پیشنهاد کردند و برای آزمون مناسب بودن این روش از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد الگوریتم ژنتیک از لحاظ قدرت بهینه‌سازی و تلاش محاسباتی بهتر از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات عمل می‌کند [۱۷]. وانگ و نگان (۲۰۱۳)، به بررسی مسئله تولید کارگاهی مونتاژ با در نظر گرفتن جریان محموله به منظور حداقل کردن زمان تکمیل محصولات پرداختند. در مسئله مورد بررسی به منظور واقعی تر شدن شرایط مسئله، اشتراک‌گذاری قطعات به منظور تمایز بین قطعات خاص و عمومی محصول در نظر گرفته شد. آن‌ها برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک ترکیبی و الگوریتم انبوه ذرات ترکیبی استفاده کردند. نتایج محاسباتی حاصل از کار آن‌ها نشان داد که الگوریتم ژنتیک ترکیبی با توجه به تابع هدف عملکرد بهتری دارد [۱۸].

سرین و یائو (۲۰۱۱)، مسئله مونتاژ دومرحله‌ای را با رویکرد جریان محموله در یک سیستم تک‌محصولی بررسی کردند. در مسئله مورد بررسی توسط آن‌ها مرحله نخست شامل  $m$  ماشین موازی بود که هر یک، قطعه خاصی از محصول را تولید می‌کرد و مرحله دوم آن شامل یک ماشین مونتاژ بود که محصول پایانی را مونتاژ می‌کرد. آن‌ها همچنین زمان‌های آماده‌سازی را در مسئله منظور کردند و یک الگوریتم با زمان چندجمله‌ای برای به دست آوردن اندازه بهینه زیر انباشته با حداقل کردن زمان ساخت ارائه دادند [۱۵]. یائو و سرین (۲۰۱۴)، به بررسی مسئله مونتاژ دومرحله‌ای با در نظر گرفتن جریان محموله در سیستم تولید چند محصولی پرداختند [۱۹]. آن‌ها از نتایج به دست آمده در مسئله [۳] استفاده و یک الگوریتم شاخه و کران برای مسئله پیشنهاد کردند. همچنین آن‌ها یک حد بالا و پایین برای اندازه زیرانباشته اول و آخر انباشته‌ها تعیین کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم ارائه شده عملکرد بهتری نسبت به جواب‌های به دست آمده از حل مدل ریاضی توسط CPLEX دارد.

امروزه در سیستم‌های تولیدی، تولیدکنندگان تلاش می‌کنند تا به طور هم‌زمان به بهینه‌سازی اهداف بپردازند. برای مثال می‌کوشند تا ضمن کاهش زمان ساخت محصولات، بتوانند هزینه‌های ناشی از نگهداری یا دیرکرد محصولات را کاهش دهند. در دنیای واقعی این مسائل عموماً به صورت بهینه‌سازی هم‌زمان چندین تابع هدف متعارض هستند. در این راستا در مسائل زمان‌بندی تولید دومرحله‌ای، دلیلال (۲۰۱۲)، به بررسی مسئله تولید کارگاهی مونتاژ در حالت

چندهدفه پرداخت. اهداف موردبررسی در پژوهش وی حداقل کردن Makespan و کل دیرکرد بود. با توجه به NP-hard بودن مسئله از سه الگوریتم فراابتکاری چندهدفه ژنتیک، جست‌وجوی ممنوع و ژنتیک هیبریدی استفاده شد. ایشان وی از دو رویکرد حل (رویگرد وزین و پارتو) برای حل مسئله چندهدفه تولید کارگاهی مونتاژ استفاده کرد. در بررسی‌های انجام‌شده الگوریتم ژنتیک هیبریدی در هر دو حالت به نتایج بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر دست یافت [۳]. میدهوان و همکاران (۲۰۱۳)، مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی مونتاژ در حالت چندهدفه را بررسی کردند. اهداف در نظر گرفته‌شده توسط آن‌ها حداقل کردن Makespan و هزینه دیرکرد محصولات بود. آن‌ها در مسئله خود سه سطح ساختار مونتاژ در نظر گرفتند. در مسئله با ساختار تک سطح مونتاژ و دو مونتاژ و برای مسائل با اندازه کوچک و متوسط مدل قادر به به‌دست‌آوردن جواب بهینه شد و برای مسائل با اندازه بزرگ و ساختارهای مونتاژ بیشتر روش‌های تقریبی پیشنهاد شد [۱۲]. تاج‌بخش و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی مسئله جریان کارگاهی مونتاژ با اهداف کمینه‌سازی مجموع زمان‌های دیرکرد و زودکرد و کمینه‌سازی زمان تکمیل تمام محصولات پرداختند. آن‌ها در مسئله موردبررسی مرحله نخست را به‌صورت جریان کارگاهی ترتیبی در نظر گرفتند. بدین معنی که ترتیب قرارگرفتن روی ماشین اول تعیین‌کننده ترتیب قرارگرفتن روی ماشین‌های بعدی است؛ همچنین ذخیره میانی بین ماشین‌آلات در پژوهش آن‌ها به‌صورت نامحدود در نظر گرفته شد و الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه GA-MOPSO برای حل مسئله توسعه داده شد [۱۶].

فتاحی و همکاران (۲۰۱۳)، یک مسئله زمان‌بندی مونتاژ سه‌مرحله‌ای با اهداف کمینه‌سازی مجموع زمان‌های دیرکرد و زودکرد و کمینه‌سازی زمان تکمیل تمام محصولات را بررسی کردند. در این مسئله در مرحله نخست، عملیات مختلف به‌طور موازی و مستقل از هم انجام می‌شود؛ سپس در مرحله دوم اجزای تولیدشده کنترل و آماده‌سازی می‌شوند و در نهایت در مرحله سوم این اجزا با هم مونتاژ شده و محصول نهایی تولید می‌شود. در این پژوهش ابتدا مدل ریاضی برای مسئله ارائه شد؛ سپس الگوریتمی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حل مسئله پیشنهاد شد. در بررسی‌های انجام‌شده الگوریتم پیشنهادی به نتایج بهتری نسبت به دو الگوریتم SPEA-II و NSGA-II دست یافت [۴].

در اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه زمان‌بندی صرفاً به یک مرحله تولید (مرحله نخست) به‌صورت جداگانه پرداخته شده و با توجه به معیاری مشخص، بهترین زمان‌بندی برای انجام کارها در آن مرحله خاص ارائه شده است؛ حال آنکه بیشتر صنایع تولیدی به‌صورت دومرحله‌ای کار می‌کنند که بر اساس آن، قطعات طی مرحله نخست پردازش و تولید می‌شوند و در مرحله دوم با مونتاژ قطعات، محصول نهایی شکل می‌گیرد. امروزه، در سیستم‌های تولیدی، تولیدکنندگان تلاش می‌کنند تا به‌طور هم‌زمان به چند هدف جامه عمل بپوشانند. این

بهینه‌سازی چندهدفه باعث افزایش وسعت دید برنامه‌ریزان می‌شود و در نهایت به بهبود و کارایی عملکرد سیستم منجر خواهد شد. همچنین در راستای دستیابی به این اهداف مفهوم جریان‌های محموله می‌تواند به کار گرفته شود؛ بنابراین نظر به اینکه پژوهش در زمینه ارائه و بهینه‌سازی مدلی جامع و نیز ارائه راهکارهایی برای تسهیل بهینه‌سازی این خطوط، امری مفید و ضروری به نظر می‌رسد، در این مقاله مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی همراه با یک مرحله مونتاژ با در نظر گرفتن جریان محموله و در حالت چندهدفه به دلیل نزدیک بودن به شرایط دنیای واقعی برای نخستین بار مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با توجه به ماهیت پیچیده مسئله، الگوریتمی فراابتکاری برای حل ارائه شده است. این الگوریتم مبتنی بر جستجوی هارمونی بوده که با بهره‌گیری از رتبه‌بندی نامغلوب به صورت چندهدفه ارائه شده و به منظور برقراری محدودیت‌های خاص این مسئله، بهبودهایی در آن صورت گرفته است.

در ادامه، مدل ریاضی به منظور تشریح مسئله و استفاده از آن برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌ها ارائه می‌شود؛ سپس الگوریتم جستجوی هارمونی پیشنهادی معرفی خواهد شد. سرانجام الگوریتم پیشنهادی با استفاده از آزمایش‌های عددی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

**مدل ریاضی مسئله.** در مسئله مورد بررسی در این پژوهش، سیستم مورد نظر شامل دو مرحله پردازش و مونتاژ بوده و قرار است  $P$  محصول با تقاضای  $DM_p$  و موعد تحویل  $D_p$  آماده تحویل به مشتری شود. هر محصول متشکل از تعدادی قطعه است که این قطعات به صورت زیرمحموله‌هایی وارد خط تولید می‌شوند. بعد از ورود به خط، ماشین‌کاری قطعات انجام شده و زمانی که تمام قطعات مورد نیاز ساخت یک محصول، مرحله پردازش را به پایان رساندند، کار مونتاژ محصول مورد نظر شروع می‌شود. هدف از این مسئله، تعیین توالی عملیات‌ها و اندازه زیرمحموله‌ها به نحوی است که دو تابع هدف دوره ساخت و مجموع دیرکردها و زودکردهای وزنی محصولات بهینه شود. در این قسمت یک مدل ریاضی به منظور شناسایی و همچنین استفاده از آن برای حل مسئله ارائه می‌شود.

**مالکیت مدل.** در نظر گرفتن مفهوم جریان محموله برای مونتاژ محصولات در فضای تولید کارگاهی<sup>1</sup> (AJSSP)، نخستین بار توسط چان و همکاران (۲۰۰۸)، بررسی شد. در مسئله مورد بررسی آن‌ها، قطعات تولیدشده ممکن است مونتاژ شوند یا نشوند و هدف مسئله، کمینه‌سازی هزینه دیرکردها و زودکردهای محصولات است. چان و همکاران (۲۰۰۹) نیز مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی با مرحله مونتاژ را با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های دیرکرد بررسی

1. Assembly Job Shop Scheduling Problem (AJSSP)

کردند. در پژوهش حاضر برای نخستین بار، مدل ریاضی مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاژ به صورت دوهدفه و با در نظر گرفتن جریان محموله ارائه شده است و از این رو شرایط مسئله به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر است. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه شده توسعه یافته مدل ریاضی فتاحی و همکاران (۲۰۰۷) و مدل چان و همکاران (۲۰۰۸) است. در مدل ارائه شده، محدودیت‌های جریان محموله (همراه با تغییرات متناسب با شرایط مسئله) و محدودیت‌های مونتاژ برای اضافه کردن یک مرحله مونتاژ به مدل اضافه شده است که از نوآوری‌ها این پژوهش در ارائه مدل ریاضی است.

پارامترهای مسئله به صورت زیر تعریف شده است:

تعداد کل محصولات	$P$
اندیس محصولات ( $p = 1, 2, \dots, P$ )	$p$
تعداد ماشین‌ها	$m$
اندیس شمارنده ماشین‌ها	$i$
تعداد کل قطعات	$n$
اندیس قطعات ( $j = 1, 2, \dots, n_p$ )	$j$
تعداد زیر قطعات محصول $p$	$n_p$
تعداد عملیات‌های اختصاص یافته به ماشین $i$	$k_i$
اندیس شمارنده عملیات‌ها	$h$
اندیس زیرمحموله‌ها ( $s = 1, 2, \dots, S_{j,p}$ )	$s$
تعداد زیر محموله قطعه $j$ از محصول $p$	$S_{j,p}$
اندازه محموله $j$ از محموله $p$	$Q_{p,j}$
عملیات $h$ از زیرمحموله $s$ از محموله $j$ در محصول $p$	$O_{p,j,s,h}$
زمان پردازش عملیات $h$ از قطعه $j$ از محصول $p$	$pt_{p,j,h}$
زمان مونتاژ محصول $p$	$At_p$
یک عدد مثبت بزرگ	$L$
موعد تحویل محصول $p$	$D_p$
هزینه نگهداری (زودکرد) محصول $p$ در هر واحد زمان	$e_p$
هزینه کمبود (دیرکرد) محصول $p$ در هر واحد زمان	$t_p$
تقاضای محصول $p$	$DM_p$
تعداد قطعه $j$ استفاده شده در محصول $p$	$R_{p,j}$

اگر عملیات  $O_{p,j,s,h}$  روی ماشین  $i$  انجام شود، برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

متغیرهای مسئله به صورت زیر قابل بیان است:

زمان تکمیل کل	$C_{max}$
زمان ساخت قطعه $J$ از محصول $p$	$F_{j,p}$
زمان تکمیل محصول $p$	$Ct_p$
میزان زودکرد محصول $p$	$E_p$
میزان دیرکرد محصول $p$	$T_p$
زمان شروع عملیات $O_{p,j,s,h}$	$St_{p,j,s,h}$
زمان شروع عملیات مونتاژ محصول $p$	$St'_p$
زمان شروع به کار ماشین $i$ در نوبت $k$	$Tm_{i,k}$
زمان شروع به کار ماشین مونتاژ در نوبت $k'$	$Sm_{i,k'}$
اندازه زیرمحموله $S$ از محموله $J$ از محصول $p$	$Q_{p,j,s}$
اگر عملیات $O_{p,j,s,h}$ بر روی ماشین $i$ در نوبت $k$ انجام شود، برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.	$X_{i,p,j,s,h,k}$
اگر محصول $p$ در نوبت $k'$ مونتاژ شود، برابر یک و در غیر این صورت صفر است.	$Z_{p,k'}$
اگر اندازه زیرابناشته $S$ از کار $J$ مقداری بیش از صفر باشد، یک و در غیر این صورت صفر است.	$\gamma_{p,j,s}$

با در نظر گرفتن پارامترها و متغیرهای تعریف شده، مسئله به صورت زیر مدل سازی می شود.

$$\text{Min } z_1 = (C_{max}) \quad (1)$$

$$\text{Min } z_2 = \sum_p (e_p E_p + t_p T_p) \quad (2)$$

s.t.

$$C_{max} \geq Ct_p \quad \forall p \quad (3)$$

$$\sum_{s=1}^{S_{j,p}} Q_{p,j,s} = Q_{j,p} \quad \forall p, j \quad (4)$$

$$Q'_{p,j,s} \leq Q_{p,j} \cdot \gamma_{p,j,s} \quad \forall p, j, s \quad (5)$$

$$\gamma_{p,j,s} \leq Q'_{p,j,s} \quad \forall p, j, s \quad (6)$$

$$St_{p,j,s,h} + pt_{p,j,h} \cdot Q'_{p,j,s} \leq St_{p,j,s,h+1} \quad (7)$$

$$\forall p, j, s; h = 1, 2, \dots, H_{j,p} - 1$$

$$St_{p,j,s,h} + pt_{p,j,h} \cdot Q'_{p,j,s} \leq St_{p,j,(s+1),h} \quad (8)$$

$$\forall p, j, h; s = 1, 2, \dots, S_{j,p} - 1$$

$$Tm_{i,k} + pt_{p,j,h} \cdot Q'_{p,j,s} \cdot X_{i,p,j,s,h,k} \leq Tm_{i,k+1} \quad (9)$$

$$\forall p, j, s, h, i; k = 1, 2, \dots, k_i - 1$$

$$Tm_{i,k} \leq St_{p,j,s,h} + (1 - X_{i,p,j,s,h,k}) \cdot L \quad (10)$$

$$\forall p, j, s, h, k, i$$

$$Tm_{i,k} + (1 - x_{i,p,j,s,h,k}) \cdot L \geq St_{p,j,s,h} \quad (11)$$

$$\forall p, j, s, h, k, i$$

$$\sum_p \sum_j \sum_s \sum_h x_{i,p,j,s,h,k} = 1 \quad \forall k, i \quad (12)$$

$$\sum_k x_{i,p,j,s,h,k} = a_{i,j,p,h} \cdot \gamma_{p,j,s} \quad \forall p, j, h, i, s \quad (13)$$

$$St_{p,j,s,h} + pt_{p,j,h} \cdot Q'_{p,j,s} \leq F_{j,p} \quad \forall p, j, s, h \quad (14)$$

$$F_{j,p} \leq St'_p \quad \forall j, p \quad (15)$$

$$Sm_{k'} + At_p \cdot Z_{p,k'} \leq Sm_{k'+1} \quad (16)$$

$$\forall p; k' = 1, 2, \dots, k'_i - 1$$

$$Sm_{k'} \leq St'_p + (1 - Z_{p,k'}) \cdot L \quad \forall p, k' \quad (17)$$

$$Sm_{k'} + (1 - Z_{p,k'}) \cdot L \geq St'_p \quad \forall p, k' \quad (18)$$

$$\sum_k Z_{p,k'} = 1 \quad \forall p \quad (19)$$

$$At_p + St'_p \leq Ct_p \quad \forall p \quad (20)$$

$$Q_{j,p} = DM_p \cdot R_{p,j} \quad \forall p, j \quad (21)$$

$$\gamma_{p,j,1} = 1 \quad \forall p, j \quad (22)$$

$$\gamma_{p,j,s+1} \leq \gamma_{p,j,s} \quad \forall p, j, s \quad (23)$$

$$Ct_p - D_p = T_p - E_p \quad \forall p \quad (24)$$



$$\begin{aligned} \gamma_{p,j,s}, X_{i,p,j,s,h,k}, Z_{p,k} &\in \{0,1\}; \\ Ct_p, Q_{p,s,j}, T_p, E_p &\geq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

عبارت‌های ۱ و ۲، توابع هدف مسئله هستند. عبارت ۳، مقدار تابع هدف را تعریف می‌کند. محدودیت ۴، نشان می‌دهد که مجموع حجم زیرمحموله‌های هر محموله باید برابر حجم آن محموله باشد. محدودیت‌های ۵ و ۶  $\gamma_{p,j,s}$  را وادار می‌سازند در صورتی که اندازه زیرمحموله متناظر با آن بزرگ‌تر از صفر باشد، مقدار یک را بپذیرد و اگر مقدار زیرمحموله صفر باشد، مقدار صفر را بپذیرد. محدودیت ۷، نشان می‌دهد که هر عملیات روی هر زیرمحموله، زمانی می‌تواند آغاز شود که عملیات قبلی روی آن زیرمحموله به اتمام رسیده باشد. محدودیت ۸، نشان می‌دهد که هر عملیات روی یک زیرمحموله از کار زمانی می‌تواند آغاز شود که همان عملیات روی زیرمحموله قبلی کار به پایان رسیده باشد. محدودیت ۹، نمایانگر این است که در صورتی یک ماشین می‌تواند به کار در نوبت  $k+1$  پردازد که کار آن ماشین در نوبت  $k$  به اتمام رسیده باشد. محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱، این الزام را به وجود می‌آورند که در صورتی یک عملیات می‌تواند شروع شود که هم محدودیت پیش‌نیازی و هم محدودیت ماشین رعایت شده باشد. محدودیت ۱۲، نشان می‌دهد که در هر دوره هر ماشین، تنها مشغول پردازش یک زیرمحموله است. محدودیت ۱۳، موجب می‌شود برای انجام هر عملیات روی زیرمحموله‌ها از ماشین تخصیص‌یافته به همان عملیات استفاده شود. محدودیت ۱۴، بزرگ‌ترین زمان تکمیل پردازش زیرمحموله‌های یک محصول را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۵، زمان شروع عملیات موتناژ محصول را محدود به رسیدن تمام زیرمحموله‌های آن محصول می‌کند. محدودیت ۱۶، نشان می‌دهد که در صورتی ماشین بخش موتناژ می‌تواند به کار در نوبت  $k+1$  پردازد که کار ماشین در نوبت  $k$  به اتمام رسیده باشد. محدودیت‌های ۱۷ و ۱۸، این الزام را به وجود می‌آورند که در صورتی یک عملیات می‌تواند شروع شود که هم محدودیت پیش‌نیازی و هم محدودیت ماشین رعایت شده باشد. محدودیت ۱۹، نمایانگر این است که ماشین موردنظر، در هر زمان تنها باید مشغول موتناژ یک محصول باشد. محدودیت ۲۰، زمان تکمیل هر محصول را نشان می‌دهد. محدودیت ۲۱، حجم محموله را با توجه به میزان تقاضا و مقدار موردنیاز از هر قطعه در محصول نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۲۲ و ۲۳، وجود زیرانباشته‌ها و نحوه تشکیل آن‌ها را نشان می‌دهند. محدودیت ۲۴، دیرکرد و زودکرد قطعات را نشان می‌دهد. عبارت ۲۵، ماهیت متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد.

مدل ارائه‌شده با توجه به محدودیت ۹ که در آن یک متغیر باینری در یک متغیر پیوسته ضرب شده است، غیرخطی است؛ بنابراین برای خطی‌سازی آن می‌توان محدودیت‌های زیر را به کار گرفت.

$$Tm_{i,k} + V_{i,s,j,p,h,k} \leq Tm_{i,k+1} \quad (26)$$

$$\forall p, j, s, h, i; k = 1, 2, \dots, k_i - 1$$

$$V_{i,s,j,p,h,k} \leq pt_{p,j,h} \cdot Q_{p,j,s} \quad (27)$$

$$\forall p, j, s, h, k, i$$

$$V_{i,s,j,p,h,k} \leq L \cdot X_{i,p,j,s,h,k} \quad \forall p, j, s, h, k, i \quad (28)$$

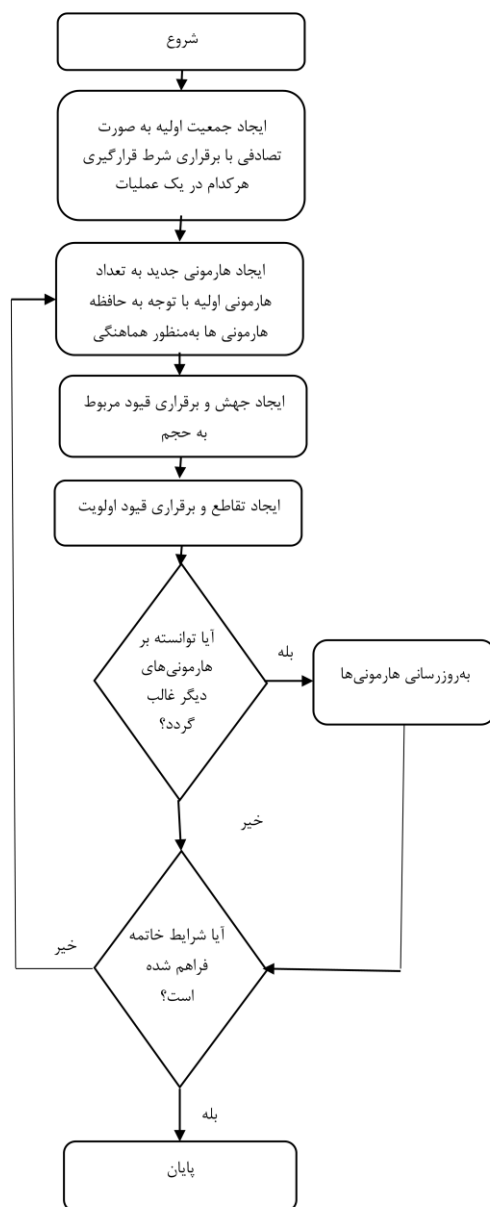
$$V_{i,s,j,p,h,k} \geq pt_{p,j,h} \cdot Q_{p,j,s} - L \cdot (1 - X_{i,p,j,s,h,k}) \quad (29)$$

$$\forall p, j, s, h, k, i$$

$$V_{i,s,j,p,h,k} \in \{0, 1\} \quad \forall p, j, s, h, k, i \quad (30)$$

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی یا جست‌وجوی هماهنگ، با الهام از روند بداهه‌نوازی نوازندگان موسیقی ایجاد شده است که نخستین بار توسط گیم و همکاران (۲۰۰۱) ارائه شد [۵]. این الگوریتم شامل پنج مرحله است که در شکل ۱، ارائه شده است [۶]:



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم هارمونی

مقداردهی اولیه: در گام نخست الگوریتم، مسئله بهینه‌سازی به صورت رابطه ۳۱، مشخص می‌شود:

$$\text{Min } f(x) \text{ s.t. } x_i \in X_i = 1, 2, \dots, N \quad (31)$$

در رابطه ۳۱،  $f(x)$  تابع هدف،  $X$  مجموعه هر متغیر تصمیم  $x_i$  است.  $N$  تعداد متغیرهای تصمیم و  $X_i$  مجموعه سطوح ممکن مقادیر هر متغیر تصمیم است؛ به‌طوریکه  $L_{x_i} \leq X_i \leq U_{x_i}$  که  $L_{x_i}$  و  $U_{x_i}$  حد بالا و پایین هر متغیر تصمیم هستند. اندازه حافظه هارمونی<sup>۱</sup> (HMS) یک محل حافظه محدود است که بردارهای راه‌حل (مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم) در آن ذخیره می‌شوند. این حافظه مشابه استخر ژنتیکی در الگوریتم ژنتیک است. نرخ لحاظ‌شده برای حافظه هارمونی<sup>۲</sup> (HMCR) بین صفر و یک متغیر است و نرخ انتخاب یک مقدار برای بردار هارمونی جدید از بین مقادیر موجود در حافظه هارمونی است [۱۵].

مقداردهی حافظه اولیه: در گام دوم ماتریس حافظه هارمونی با تعدادی از بردارهای راه‌حل که به‌صورت تصادفی تولید شده‌اند، پر می‌شود.

ایجاد یک هارمونی جدید: در این گام، یک بردار هارمونی جدید  $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$  ایجاد می‌شود. به تولید یک هارمونی جدید، «بداهه‌نوازی» گفته می‌شود [۱۶].

به‌روزرسانی حافظه هارمونی: در این گام چنانچه بردار هارمونی جدید بر اساس مقدار تابع هدف، بهتر از بدترین بردار موجود در حافظه هارمونی باشد، بدترین بردار حذف شده و بردار جدید در حافظه گنجانده می‌شود.

بررسی معیار توقف: اگر معیار توقف ارضا شود، محاسبات متوقف می‌شود.

الگوریتم جست‌وجوی هارمونی پیشنهادی. با توجه به دودهدفه‌بودن مسئله، الگوریتم پیشنهادی موردنظر با استفاده از ایده رتبه‌بندی نامغلوب به حالت چندهدفه تبدیل شد. در توضیح مفهوم رتبه‌بندی نامغلوب باید توجه داشت که چنانچه مسئله موردنظر مسئله‌ای تک‌هدفه باشد، پیدا کردن بهترین جواب کار ساده‌ای است و نقاط بر روی محور  $x$  تعیین و بهترین جواب (جواب نامغلوب در مقایسه با سایر جواب‌ها) حاصل می‌شود؛ اما با توجه به دودهدفه‌بودن مسئله بررسی شده، در الگوریتم پیشنهادی از ایده رتبه‌بندی نامغلوب (Non-Dominate Sorting) که در NSGA II صورت گرفته، استفاده شده است. الگوریتم NSGA II یکی از کاراترین روش‌های حل گزارش شده است که از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک و مفهوم پارتو به‌طور هم‌زمان بهره می‌برد [۸]. نقاط نامغلوب در فضای دو بُعدی که هیچ نقطه دیگری بر آن‌ها غلبه ندارد، به‌عنوان جبهه‌ی پارتو برترین برگزیده می‌شوند؛ همچنین در الگوریتم هارمونی پیشنهادی برای افزایش کارایی الگوریتم و رسیدن به جواب‌های شذنی از عملگرهای جهش و تقاطع، منطبق بر مسئله موردبررسی استفاده شده است.

1. Harmony Memory Size (HMS)

2. Harmony Memory Consideration Rate (HMCR)

نحوه نمایش جواب‌ها. نحوه نمایش جواب نقش حیاتی در عملکرد الگوریتم برای یافتن نقاط مختلف فضای جواب‌های مسئله دارد. در این پژوهش در روش نمایش مسئله، سه موضوع مدنظر است: تعیین توالی عملیات‌ها؛ تعیین حجم زیرمحموله‌ها؛ تعیین ترتیب مونتاژ محصولات. از این رو در روش نمایش پیشنهادی نیز هر سه مورد نمایش داده می‌شود. در این روش برای نمایش توالی عملیات‌های زیرمحموله‌ها، با هر عملیات از هر زیرمحموله مانند یک کار جداگانه رفتار شده است و حجم هر زیرمحموله نیز برای هر عملیات معین می‌شود؛ از این رو هر جواب مرحله تولید در الگوریتم پیشنهادی با برداری مطابق شکل ۲، نمایش داده می‌شود. برای مثال در شکل ۲، قطعه ۱ از محصول ۱ دارای ۲ عملیات و هر عملیات دارای دو زیرمحموله است که به ترتیب در اولویت‌های ۱، ۳، ۶ و ۹ پردازش هستند؛ همچنین در بخش مونتاژ، محصول ۲ در اولویت ۱ و محصول ۱ در اولویت ۲ است.

(P,j,s,h)	( $\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 2 \\ 2 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 3 \\ 1 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 3 \\ 2 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 4 \\ 1 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 4 \\ 2 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 5 \\ 1 \end{matrix}$ )	( $\begin{matrix} 5 \\ 2 \end{matrix}$ )
اولویت	۱	۷	۲	۵	۹	۳	۱۰	۶	۴	۸
حجم	۳۰	۷۰	۸۰	۴۰	۹۰	۳۰	۲۰	۷۰	۸۰	۴۰

تولید کارگاهی

مرحله ۲	۲	۱
---------	---	---

مونتاژ

شکل ۲. نحوه نمایش جواب‌ها

**ایجاد جمعیت اولیه.** جمعیت اولیه مربوط به توالی عملیات‌ها به صورت تصادفی و با برقراری شرط قرارگیری هر یک در یک عملیات صورت می‌گیرد. به منظور عدم قرارگیری اولویت یکسان برای چند عملیات، راهکار زیر ارائه شده است:

اعدادی به صورت ترتیب تصادفی از ۱ تا بیشترین اولویت ایجاد می‌شود؛ سپس به همان ترتیب برای اولویت‌ها قرار می‌گیرد. از آنجاکه امکان ایجاد جواب‌های نشدنی در این نحوه تولید زیاد است، برای جلوگیری از نشدنی بودن جواب‌ها نوعی فرآیند اصلاحی به کار برده شده است. در این فرآیند اصلاحی نحوه چیدمان شماره فعالیت‌ها بررسی می‌شود که قوانین پیشنهادی عملیات‌ها و زیرمحموله‌ها در مورد هر کار رعایت شده باشد؛ بنابراین اولویت‌ها از چپ به راست مطابق با اصول پیشنهادی تعیین می‌شوند. با اعمال این فرآیندها در بدنه جواب از تولید هر گونه

جواب نشدنی جلوگیری می‌شود. جواب‌های تولیدی سپس از نظر تابع هدف ارزیابی و در حافظه تخصیص یافته مرتب می‌شوند.

**رمزگشایی جواب‌ها.** در این مسئله برای رمزگشایی جواب‌ها دو زیرمسئله تولید کارگاهی و مونتاژ وجود دارد. در این الگوریتم، در زیرمسئله تولید کارگاهی از برنامه زمان‌بندی فعال برای رمزگشایی راه‌حل استفاده می‌شود. در برنامه فعال نمی‌توان عملیاتی را پیش از عملیات دیگری آغاز کرد؛ مگر با ایجاد تأخیر در عملیات‌های دیگر و یا نقض محدودیت‌های مسئله. رویه کار به صورت زیر است:

۱. با شروع از زمان صفر، در هر لحظه، با در نظرگیری ماشین مربوطه، از میان عملیات‌های موجود که امکان شروع دارند، زودترین زمان شروع ممکن به عنوان زمان اولیه انتخاب می‌شود؛
  ۲. چنانچه در زمان شروع عملیات طبق رعایت محدودیت‌های پیش‌نیازی زیرمحموله‌ها، کارهای قبلی روی ماشین مربوطه تمام شده باشد، زمان شروع عملیات تعیین می‌شود؛
  ۳. در غیر این صورت، زمان شروع عملیات برابر با زمان تکمیل عملیات قبلی روی ماشین است؛
  ۴. زمان شروع و اتمام عملیات‌ها به روزرسانی می‌شود؛
  ۵. این روند تا مشخص شدن وضعیت تمام عملیات‌ها ادامه می‌یابد؛
- در زیرمسئله مونتاژ نیز رویه به این صورت است که چنانچه قطعات مورد نیاز محصولی زودتر به مرحله مونتاژ رسید کار مونتاژ آن محصول زودتر شروع می‌شود.

**ایجاد هارمونی جدید.** بردار هارمونی جدید با توجه به حافظه هارمونی‌ها ایجاد می‌شود و سپس عملگرهایی به منظور بهبود مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این مرحله، یک عدد تصادفی تولید می‌شود و اگر کوچک‌تر از HMCR باشد، یکی از مقادیر موجود در حافظه انتخاب و جایگزین می‌شود. ساختارهای همسایگی به کارگرفته در این الگوریتم، برای سه بخش تعریف می‌گردد. برای ایجاد ساختارهای همسایگی مربوط به توالی از ساختارهای همسایگی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی استفاده می‌شود: دو عملیات به تصادف انتخاب و با هم جابه‌جا می‌شوند. دو عملیات به تصادف انتخاب و عمل معکوس‌سازی بین آن‌ها صورت می‌گیرد. دو عملیات به تصادف انتخاب و عمل حذف و انتقال بر آن‌ها اعمال می‌شود. در ساختار همسایگی مربوط به زیرمحموله‌ها، دو مقدار تخصیص یافته به حجم زیرمحموله‌ها به تصادف انتخاب شده و با هم جابه‌جا می‌شود. در بخش مونتاژ نیز برای ایجاد همسایگی مربوط به این بخش، دو مورد از محصولات انتخاب شده و با هم جابه‌جا می‌گردند.

ایجاد جهش و تقاطع به منظور بهبود الگوریتم. در الگوریتم پیشنهادی برای برآوردن محدودیت‌های مربوط به اولویت عملیات، حجم زیرمحموله‌ها برای انتقال به عملیات بعدی، اولویت مونتاژ و برابر بودن مجموع حجم زیرمحموله‌های هر محموله با حجم اولیه همان محموله، عملگرهای جهش و تقاطع صورت گرفته است که باعث می‌شود تا محدودیت‌های مربوط به حجم و اولویت برآورده شود و جواب‌های حاصل شدنی باشند.

یکی از محدودیت‌های مسئله، برابری اندازه زیرمحموله‌ها در عملیات‌های مختلف با حجم اولیه در نظر گرفته شده است؛ به طوری که مجموع حجم زیرمحموله‌های هر محموله باید با حجم کل محموله برابر باشد. عملگری که برای کمک به برقراری این قید استفاده می‌شود، به صورت جهش روی هارمونی‌ها عمل می‌کند؛ به طوری که چنانچه حجم زیرمحموله‌ها در یک عملیات خاص از حجم تعیین شده کمتر باشد، به حجم زیرمحموله در یکی از آن عملیات‌ها به میزان اختلاف حجم‌ها، حجم افزوده می‌شود. (شکل ۳). در صورتی که مجموع حجم زیرمحموله‌ها از حجم کل انتخاب شده بیشتر باشد، دو مورد از زیرمحموله‌ها به تصادف انتخاب و میزان اضافه به صورت درصدی از آن کم می‌شود (شکل ۴).

$p,j,s,h$	۱,۱,۱,۱	۲,۲,۱,۱	۱,۱,۲,۱	۲,۲,۲,۱
حجم	۳۰	۹۰	۷۰	۲۰



$p,j,s,h$	۱,۱,۱,۱	۲,۲,۱,۱	۱,۱,۲,۱	۲,۲,۲,۱
حجم	۳۰	۹۰	۸۰	۲۰

شکل ۳. جهش مربوط به برقراری محدودیت حجم محموله‌ها در صورت کم‌تر بودن حجم

$p,j,s,h$	۱,۱,۱,۱	۲,۲,۱,۱	۱,۱,۲,۱	۲,۲,۲,۱
حجم	۴۰	۹۰	۹۰	۲۰



$p,j,s,h$	۱,۱,۱,۱	۲,۲,۱,۱	۱,۱,۲,۱	۲,۲,۲,۱
حجم	۳۰	۴۰	۸۰	۶۰

شکل ۴. جهش مربوط به برقراری محدودیت حجم محموله‌ها در صورت بیشتر بودن حجم

قید دیگری که مورد توجه قرار گرفته و با روش تقاطع بر یک هارمونی برقرار می‌شود، قید پیش‌نیازی در عملیات‌های مربوط به هر زیرمحموله است. برای مثال، عملیات اول از زیرمحموله اول باید قبل از عملیات دوم مربوط به همان زیرمحموله انجام شود؛ در صورتی که این محدودیت برقرار نباشد، با اعمال عملگر تقاطع روی یک هارمونی این قید برآورده می‌شود (شکل ۵).

$p,j,s,h$	۱,۱,۱,۱	۱,۱,۱,۲	۱,۱,۲,۱	۱,۱,۲,۲
اولویت	۴	۲	۵	۹

$p,j,s,h$	۱,۱,۱,۱	۱,۱,۱,۲	۱,۱,۲,۱	۱,۱,۲,۲
اولویت	۲	۴	۵	۹

شکل ۵. تقاطع مربوط به محدودیت پیش‌نیازی عملیات‌ها

برای بررسی قید مونتاژ محصولات نیز، با توجه به اینکه تنها یک ماشین در بخش مونتاژ موجود است، باید این شرط برقرار باشد که محصولات به‌صورت هم‌زمان وارد مرحله مونتاژ نشوند؛ از این‌رو عملگر جهشی مطابق شکل ۶، اعمال می‌شود.

توالی محصولات	۱	۱
---------------	---	---

توالی محصولات	۱	۲
---------------	---	---

شکل ۶. جهش مربوط به محدودیت مرحله مونتاژ

**به‌روزرسانی.** بعد از اعمال ساختار همسایگی و ایجاد جهش و تقاطع به‌منظور برآورده‌سازی قیدهای مسئله، بردارهای هارمونی جدید به بردارهای موجود در حافظه هارمونی اضافه شده و همه بردارهای موجود در حافظه از نو، طبق ایده غلبه اشاره‌شده، رتبه‌بندی می‌شوند.

**شرط توقف.** شرط توقف در این الگوریتم رسیدن به حد معینی از تعداد تکرارها است. تا زمانی که این شرط برقرار شود، گام‌های بالایی الگوریتم تکرار می‌شود.

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌ها

در این بخش به حل مثال‌های عددی با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و ژنتیک مرتب‌شده‌ی نامغلوب پرداخته می‌شود. هرچند مسئله مطرح‌شده در پژوهش فعلی برای نخستین بار بررسی شده است، اما با مراجعه به مبانی نظری موضوع ملاحظه می‌شود که مسائل مشابه در زمینه تولید کارگاهی با مرحله مونتاژ، پیش‌تر توسط چان و همکاران (۲۰۰۸)، مورد مطالعه قرار گرفته است؛ از این‌رو برای هماهنگی با پژوهش‌های قبلی و فراهم کردن امکان مقایسه با پژوهش‌های آتی، تولید مسائل نمونه طبق مقاله چان و همکاران (۲۰۰۸) انجام شده و مسائلی متناسب با مدل و موضوع مورد نظر طراحی شده است.



جدول ۱. نحوه تولید داده

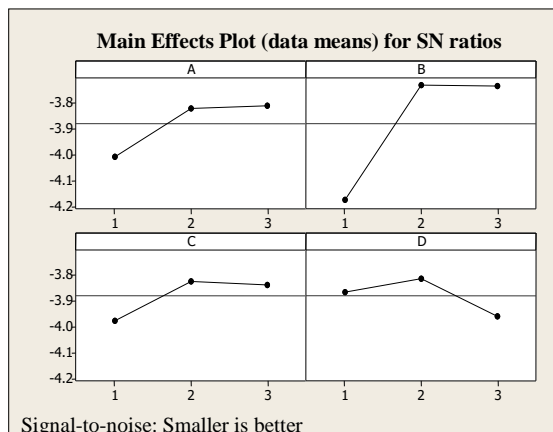
پارامترها	دامنه تغییر مقادیر
تعداد ماشین‌ها	$m = \{3, 5, 7\}$
تعداد محصولات	$p = \{3, 5, 7, 10\}$
تعداد محموله‌ها	$n = \{3, 6, 8, 12\}$
حداکثر تعداد عملیات‌های کار	$h = \{2, \dots, 7\}$
P تقاضای محصول	$DM_p = [1, 50]$
P موعده تحویل محصول	$D_p = [P(1-T-R/2), P(1-T+R/2)],$ $P = \sum Pt_{p,j,h} / m, T = [0.1, 0.5], R = [0.8, 1.8]$
زمان پردازش	$Pt_{p,j,h} = [1, 20]$
زمان مونتاژ	$At_p = [1, 10]$
جریمه تأخیر	$t_p = [0.1, 1]$
جریمه نگهداری	$e_p = [0.01, 0.1]$

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم از روش تاگوچی استفاده شده است. جدول ۲، عوامل و سطوح عوامل الگوریتم را نشان می‌دهد.

جدول ۲. سطوح پارامترهای الگوریتم هارمونی پیشنهادی

پارامترها	کمینه	متوسط	بیشینه
اندازه حافظه هارمونی	۲۰	۵۰	۱۰۰
بیشترین تکرار	۵۰	۱۰۰	۳۰۰
نرخ مراجعه به حافظه هارمونی	۰.۸۵	۰.۹۰	۰.۹۵
نرخ تنظیم	۰.۲۰	۰.۳۵	۰.۵۰

آرائه متعامد مناسب برای تنظیم پارامترهای این الگوریتم به روش تاگوچی، و  $L$  است که به منظور افزایش دقت، هر آزمایش سه بار تکرار شده و میانگین نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به چندهدفه بودن مسئله، در هر بار تکرار، مقدار دو تابع هدف حاصل از تمام نقاط پارتوی برتر استخراج و بی‌مقیاس شده است. برای بی‌مقیاس‌سازی مقادیر، بیشترین مقدار به دست آمده از تکرارهای مختلف برای هر هدف در نظر گرفته شده و همه مقادیر بر مقدار آن تقسیم شده است؛ سپس مقادیر هر دو تابع هدف با هم جمع شده و کمترین مقدار در هر اجرا مورد استفاده قرار گرفته است. پس از اجرای روش تاگوچی و بررسی نمودار به دست آمده که در شکل ۷، مشاهده می‌شود، بهترین مقدار برای اندازه حافظه هارمونی ۱۰۰، بهترین تعداد تکرار الگوریتم ۱۰۰ مرتبه، نرخ توجه به حافظه هارمونی ۰/۹ و نرخ تنظیم ۰/۳۵ است.



شکل ۷. نمودار اثرات اصلی در مقابل نسبت SN تابع هدف برای هر سطح از عوامل در الگوریتم هارمونی پیشنهادی

با توجه به اینکه مقایسه تقریب‌های پارتوی به دست آمده از دو الگوریتم، کار ساده‌ای نیست، برای مقایسه نتایج حاصل از دو الگوریتم پیشنهادی مورد نظر از سه معیار زیر استفاده شده است:

**شاخص متوسط فاصله ایده‌آل MID.** این شاخص برای سنجش میزان نزدیکی بین جواب به دست آمده از الگوریتم و نقطه ایده‌آل ( صفر و صفر) به کار برده می‌شود. هر چه این مقدار کمتر باشد، کیفیت الگوریتم مورد نظر بیشتر است. این شاخص از طریق رابطه ۳۲، محاسبه می‌شود.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (32)$$

$$C_i = \sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2} \quad (33)$$

$f_{1i}$  و  $f_{2i}$  مقادیر توابع هدف اول و دوم در هر جواب بوده و  $n$  تعداد مجموعه‌های نامغلوب است.

**شاخص گستردگی SNS:** این شاخص، میزان دور بودن جواب‌های پارتو نامغلوب تولیدی از هم را نشان می‌دهد. هر چه تعداد جواب‌های نامغلوب تولید شده بیشتر باشد یا اعداد از هم دورتر باشند، این شاخص مقدار بزرگ‌تری به خود می‌گیرد. هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم است. مقدار این شاخص با استفاده از رابطه ۳۴، محاسبه می‌شود.

$$SNS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MID - C_i)^2}{n-1}} \quad (34)$$

شاخص نرخ دستیابی همزمان به دو تابع هدف RAS: این شاخص، میزان نرخ دستیابی الگوریتم به دو تابع هدف موردنظر را نشان می‌دهد. مقدار کمتر این شاخص نشان‌دهنده کیفیت بالاتر الگوریتم است.

$$RAS = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{1i} - F_i}{F_i} \right) + \left( \frac{f_{2i} - F_i}{F_i} \right)}{n} \quad (35)$$

$$F_i = \text{Min}\{f_{1i}, f_{2i}\} \quad (36)$$

با توجه به NP-hard بودن مسئله و پیچیدگی آن، انتظار می‌رود که تنها در ابعاد کوچک مسئله بتوان به جواب دقیق دست یافت؛ از این رو برای بررسی کارایی و اعتبار الگوریتم موردنظر، با استفاده از نرم‌افزار گمز که قابلیت یافتن جواب دقیق را دارد، به حل مدل در ابعاد کوچک پرداخته شده است. برای حل از روش مقید به محدودیت  $\epsilon$  استفاده شده که یکی از رویکردها برای مواجهه با مسائل چندهدفه است. جدول ۳، نتایج حاصل از حل مسئله توسط نرم‌افزار و الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر حاصل از حل مسائل توسط نرم‌افزار گمز و الگوریتم پیشنهادی نزدیک بوده است.

جدول ۳. مقادیر MID حاصل از گمز و الگوریتم پیشنهادی

شماره مسئله	۱	۲	۳	۴
GAMS	۳۵۰۰	۲۷۳۵/۹	۳۰۸۶/۵	۳۱۰۰/۲
NSHS	۳۵۰۰/۴	۲۸۱۵/۷	۳۱۴۸	۳۰۹۹/۱

در ادامه مسئله، توسط دو الگوریتم حل شده و الگوریتم‌های موردنظر با استفاده از شاخص‌های بیان شده، مقایسه می‌شود. در جدول ۴، شاخص‌های بیان شده، برای جواب‌های پارتو نامغلوب حاصل از دو الگوریتم، در حالت عدم به‌کارگیری جریان محموله محاسبه و مقایسه شده‌اند. جدول ۵، مقدار شاخص‌های موردنظر را در حالتی که جریان محموله مجاز است، نشان می‌دهد.

شکل ۸، حساسیت مسئله نسبت به پارامترهای اصلی و گسسته مسئله در بخش تولید را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، میزان تغییرات مقدار MID نسبت به پارامتر تعداد ماشین‌ها

زمانی که سایر پارامترها تغییر می‌کنند، تقریباً روند ثابتی را طی می‌کند و در همه‌ی موارد، این مقدار با بیشتر شدن تعداد ماشین‌ها که به افزایش پیچیدگی مسئله منجر می‌شود، دارای روندی افزایشی بوده است.

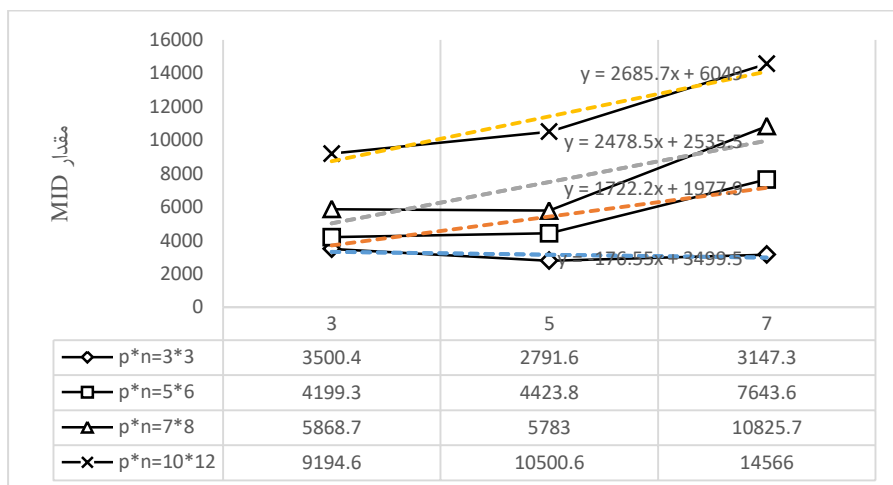
با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، زمان اجرا در الگوریتم پیشنهادی بیشتر از الگوریتم دیگر است؛ اما همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، مقدار شاخص متوسط فاصله از میانگین در الگوریتم پیشنهادی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهتر از الگوریتم دیگر است؛ به عبارت دیگر، مقدار توابع هدف به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی بسیار بهتر از الگوریتم ژنتیک مرتب‌شده نامغلوب است؛ از این‌رو تصمیم‌گیری در این زمینه بر عهده سازمان یا مرکز تولیدی است که زمان استفاده بر مقدار تابع هدف ارجحیت داشته باشد یا برعکس. همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، مشاهده می‌شود در هر دو نوع مسئله، مقدار شاخص گستردگی در الگوریتم پیشنهادی برابر یا بهتر از الگوریتم دیگر است. با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله، مقدار این شاخص در الگوریتم پیشنهادی افزایش بیشتری دارد. این مطلب نشان‌دهنده گستردگی بیشتر جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی است. نمودارهای ۱۳ و ۱۴، نیز مقدار نرخ دستیابی هم‌زمان به دو تابع هدف را نشان می‌دهند. مقدار کمتر این شاخص نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم است. با توجه به این نمودارها مقدار این شاخص در هر دو نوع مسئله در الگوریتم پیشنهادی بهتر از الگوریتم دیگر است.

جدول ۴. نتایج شاخص‌های عملکرد دو الگوریتم در حالت عدم‌به‌کارگیری جریان محموله

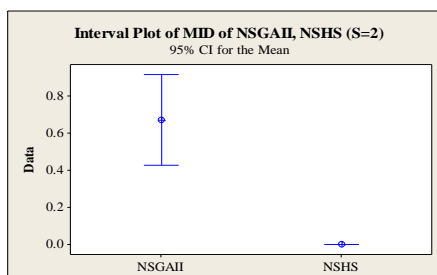
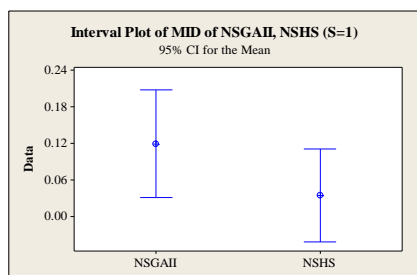
مسئله	Run Time		MID		SNS		RAS	
	NSHS	NSGAI	NSHS	NSGAI	NSHS	NSGAI	NSHS	NSGAI
(۳*۳) * ۳	۲۶۹/۳	۷۸	۵۲۵۷	۵۲۵۷/۷	.	.	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳
(۳*۳) * ۵	۲۵۰	۷۹/۱	۵۰۲۵/۱	۵۰۲۵/۱	.	.	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶
(۳*۳) * ۷	۲۵۵/۷	۶۴/۸	۷۶۹۶/۲	۷۶۹۷/۳	.	.	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳
(۵*۶) * ۳	۲۵۵/۹۲	۶۶/۴	۴۹۰۸	۵۹۷۴/۸	.	.	۰/۴۸۶	۰/۹۳۸
(۵*۶) * ۵	۲۸۰/۳	۷۱/۲	۵۲۸۸/۲	۵۶۷۱/۲	.	.	۰/۱۷۹	۰/۳۰۹
(۵*۶) * ۷	۲۶۳	۶۵/۱	۹۲۶۶/۲	۹۵۶۱/۲	.	.	۰/۱۳۹	۰/۳۰۳
(۷*۸) * ۳	۲۵۸/۶	۶۳	۵۹۰۹/۷	۷۱۱۷	.	.	۰/۵۷۳	۱/۳۱۲
(۷*۸) * ۵	۲۷۰	۷۳/۷	۸۵۴۸/۵	۹۲۲۱/۶	۱۰۳/۱	.	۰/۲۳۷	۰/۴۵۶
(۷*۸) * ۷	۲۷۰/۶	۶۴/۱	۱۱۱۹۱	۱۳۴۰۰/۹	۱۱/۵	.	۰/۴۵۳	۰/۹۵
(۱۰*۱۲) * ۳	۳۰۰/۵	۷۱	۹۰۰۹	۶۳۶۳/۷۱	۲۸۰/۲	۱۵۰/۶	۱/۱۳۷	۳/۱۹
(۱۰*۱۲) * ۵	۲۵۸/۹	۷۹	۹۶۶۲/۱	۱۴۱۲۵	.	.	۰/۵۵۸	۱/۵۱
(۱۰*۱۲) * ۷	۲۸۴/۷	۸۵/۵	۱۰۹۶۱	۱۲۸۲۹/۵	.	.	۰/۴۸۸	۰/۸۴۵

جدول ۵. نتایج شاخص‌های عملکرد دو الگوریتم در حالت به کارگیری جریان محموله

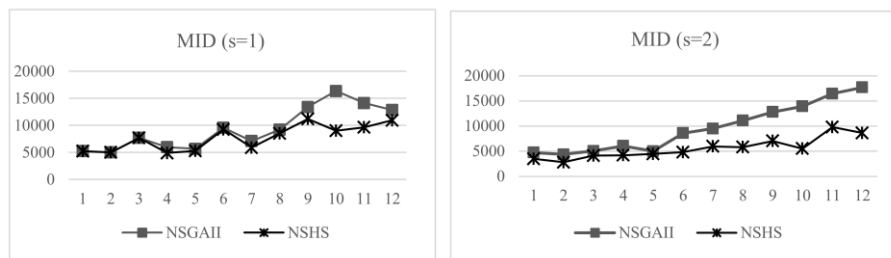
مسئله	Run Time		MID		SNS		RAS	
	NSHS	NSGAI	NSHS	NSGAI	NSHS	NSGAI	NSHS	NSGAI
(۳*۳) * ۳	۲۶۳/۳	۷۴/۷	۳۵۰۰/۴	۴۷۳۳/۶	.	.	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳
(۳*۳) * ۵	۲۵۳/۵	۷۴/۱	۲۸۱۵/۷	۴۳۶۷/۱	۴۳/۵	.	۰/۰۸۷	۰/۵۶۰
(۳*۳) * ۷	۲۴۵/۲	۷۶	۴۱۳۴/۱	۵۰۵۸/۱	.	.	۰/۲۲۴	۰/۲۵۶
(۵*۶) * ۳	۲۶۲/۸	۶۳/۴	۴۱۹۹/۳	۶۰۵۰/۲	.	.	۰/۷۸۱	۰/۹۸۵
(۵*۶) * ۵	۲۸۵/۴	۶۴/۸	۴۴۷۷/۸	۵۰۰۷/۷	.	.	۰/۱۷۴	۰/۳۴۲
(۵*۶) * ۷	۲۶۷/۷	۷۳/۴	۴۸۰۴/۷	۸۵۹۳/۱	۱۶/۴	.	۰/۷۵۱	۰/۸۴۴
(۷*۸) * ۳	۲۸۱/۴	۶۵/۶	۵۹۶۸/۸	۹۵۱۳/۶	۱۴۱/۷	.	۰/۶۴۷	۱/۷۰۴
(۷*۸) * ۵	۲۸۱	۶۹	۵۸۱۹/۵	۱۱۰۸۵/۳	۷۱۴/۸	۶۳۸/۴	۰/۹۵۰	۱/۹۵۲
(۷*۸) * ۷	۲۸۵/۲	۷۱/۶	۷۰۴۳/۴	۱۲۸۰۴	۱۵۴/۴	۶۶/۵	۱/۷۷۳	۱/۸۱۸
(۱۰*۱۲) * ۳	۳۰۲/۲	۸۳/۶	۵۵۲۳/۵	۱۳۹۲۷/۶	۳۲۹	.	۱/۳۹۵	۲/۵۲۹
(۱۰*۱۲) * ۵	۳۰۶/۳	۷۴/۱	۹۷۹۹/۲	۱۶۴۵۴/۸	۷۹۹/۲	۳۵۷/۷	۲/۱۶۱	۳/۲۴۱
(۱۰*۱۲) * ۷	۳۱۷/۵	۷۵/۵	۸۶۲۹/۸	۱۷۶۹۲/۷	۹۰۹/۴	۷۷۰/۵	۱/۶۳۰	۲/۴۵۱



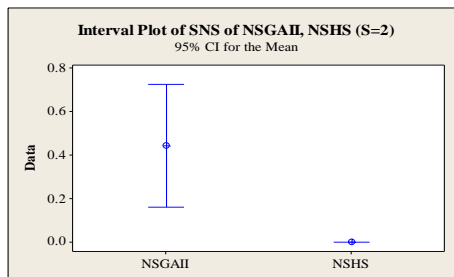
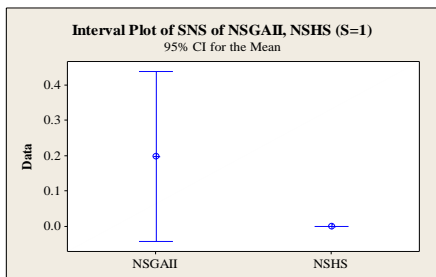
شکل ۸. حساسیت مسئله نسبت به پارامترهای اصلی



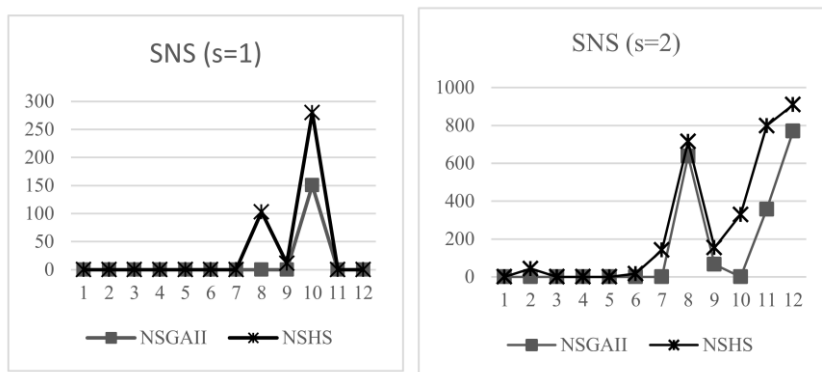
شکل ۹. میانگین و بازه حداقل اختلاف معنادار (با اطمینان ۹۵٪) الگوریتم‌ها در شاخص MID



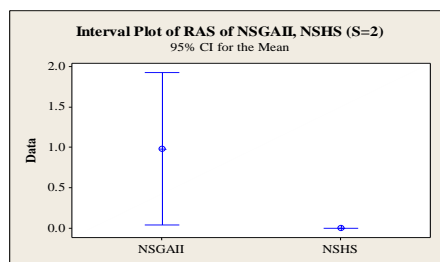
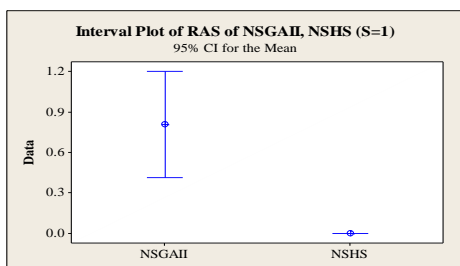
شکل ۱۰. نمودارهای خطی مقایسه شاخص MID



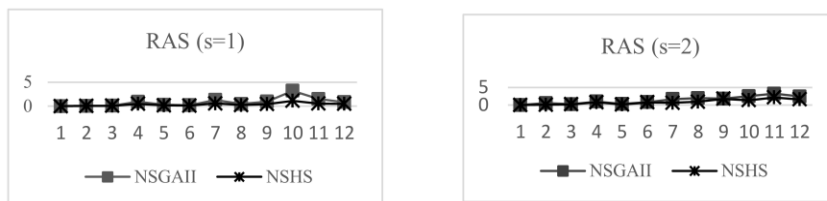
شکل ۱۱. میانگین و بازه حداقل اختلاف معنادار (با اطمینان ۹۵٪) الگوریتم‌ها در شاخص SNS



شکل ۱۲. نمودارهای خطی مقایسه در شاخص SNS

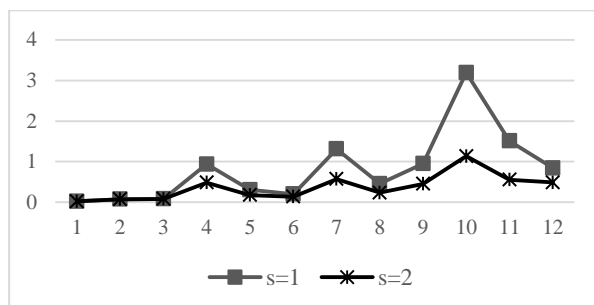


شکل ۱۳. میانگین و بازه حداقل اختلاف معنادار (با اطمینان ۹۵٪) الگوریتم‌ها در شاخص RAS



شکل ۱۴. نمودارهای خطی مقایسه در شاخص RAS

با توجه به اهمیت مفهوم جریان محموله در این مسئله، نتایج حاصل از به کارگیری و عدم به کارگیری جریان محموله در جدول ۶ آمده است. با توجه به جدول ۶، استفاده از تکنیک تقسیم محموله در مسئله، موجب کاهش قابل توجهی در دوره ساخت محصولات در همه نمونه‌ها می‌شود و در نمونه‌های بزرگ‌تر، این بهبود بیشتر است. شکل ۱۵، امکان مقایسه بهتر نتایج مسئله را فراهم کرده است.



شکل ۱۵. مقایسه تابع هدف دوره ساخت در حالت به کارگیری و عدم به کارگیری جریان محموله

جدول ۶. نتایج و درصد بهبود حاصل از به کارگیری جریان محموله

شماره مسئله	$S_i=1$	$S_i=2$	درصد بهبود
jsp1	۳۷۶۰	۲۴۹۸	۳۳/۶
jsp2	۳۴۲۰	۱۹۱۶/۲	۴۴
jsp3	۵۲۲۰	۲۶۱۵/۸	۵۰
jsp4	۲۷۴۰	۲۰۵۵/۵	۲۵
jsp5	۳۴۲۰	۲۹۰۴	۱۵/۱
jsp6	۶۱۱۲/۳	۲۳۱۴/۳	۶۲/۱
jsp7	۳۱۷۰/۴	۳۰۹۸/۴	۲/۳
jsp8	۵۲۲۰	۲۶۵۳/۴	۴۹/۲
jsp9	۶۱۱۲/۳	۲۳۹۶/۷	۶۰/۸
jsp10	۳۷۴۵/۹	۳۶۴۲/۲	۲/۸
jsp11	۵۲۲۰	۳۰۳۲/۶	۵۰
jsp12	۶۱۱۲/۳	۳۰۷۹/۱	۴۹/۶

**یافته‌های مدیریتی.** در عصر رقابتی، توجه به شرایط، زمان، کیفیت و مدیریت و زمان‌بندی از اهمیت بالایی برخوردار است. با به‌کارگیری ابعاد مختلف مدیریت شامل فنی، تکنیکی، مالی و رفتاری تلاش می‌گردد تا از طریق کاهش هزینه‌ها، افزایش کیفیت، کاهش زمان و ... سازمان‌ها و واحدهای صنعتی را از حذف شدن در مقابل رقبا حفظ نمود. مفهوم ارائه‌شده در این پژوهش و الگوریتم پیشنهادی، به واحدهای صنعتی کمک می‌کند تا ضمن کاهش زمان تولید و هزینه‌ی صرف شده در بخش‌های مختلف تولید و مونتاژ، تمرکز تکنیکی و مالی بیشتری را به افزایش کیفیت محصولات و افزایش کارایی تجهیزات معطوف نمایند.

### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاژ با در نظر گرفتن جریان محموله بررسی شد. توابع هدف موردنظر در این بررسی، بیشترین زمان تکمیل و مجموع هزینه وزنی دیرکردها و زودکردها بود. در این مسئله قطعات به‌صورت محموله‌هایی در نظر گرفته شد که به زیرمحموله‌هایی با حجم کمتر تقسیم می‌شوند. زیرمحموله‌ها وارد خط تولید می‌شوند و پس از انجام عملیات پردازش به انبار موجود پیش از مرحله مونتاژ منتقل می‌گردند. در این صورت عملیات مونتاژ قطعات برای تولید هر محصول، زمانی شروع می‌شود که عملیات ماشین‌کاری تمام قطعات موردنیاز در یک محصول به پایان رسیده باشد. به علت پیچیدگی بالای مسئله از الگوریتمی فراابتکاری مبتنی بر جست‌وجوی هارمونی استفاده شد. با توجه به چندهدفه‌بودن مسئله، با بهره‌گیری از مفهوم رتبه‌بندی نامغلوب الگوریتم موردنظر منطبق با شرایط چندهدفه ایجاد شد و به‌منظور برقراری برخی محدودیت‌های موجود در مسئله عملگرهای جهش و تقاطع در الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت که نتایج، کارایی الگوریتم پیشنهادی موردنظر را نشان داد. نتایج همچنین نشان داد که استفاده از جریان محموله تأثیر به‌سزایی در کاهش دوره ساخت محصولات دارد. اگرچه مدل ارائه‌شده در این پژوهش و به‌کارگیری مفهوم جریان محموله در این مسئله برای نخستین بار بررسی شده است، اما با مراجعه به پژوهش‌های مشابه ملاحظه می‌شود که استفاده از مفهوم جریان محموله همانند نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، باعث دستیابی به هزینه‌های کمتر می‌شود. نتایج پژوهش چنان و همکاران [۲]، نیز نشان داد که کمترین مقدار هزینه‌های زودکرد و دیرکرد محصولات در حالتی حاصل شده که مفهوم جریان محموله به‌کار گرفته شده است و معیارهای عملکرد مقادیر بهتری را نشان می‌دهند. محورهای متعددی برای پژوهش‌های آتی قابل‌پیشنهاد است که از آن جمله می‌توان به در نظر گرفتن عدم قطعیت و پارامترهای احتمالی برای پارامترهای مسئله و نیز در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی اشاره کرد؛ همچنین برای حل این مسئله می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر استفاده کرد.



## منابع

1. Chan, F.T.S., Wong, T.C. & Chan, L.Y. (2008). Lot streaming for product assembly in job shop environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3), 321–331.
2. Chan, F.T.S., Wong, T.C. & Chan, L.Y. (2009). An evolutionary algorithm for assembly job shop with part sharing. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 641–651.
3. Dileepal, J. (2012). *Multi-objective assembly job shop scheduling using genetic algorithm and tabu search*. Ph.D Theses, Cochin University of Science and Technology, Department of Ship Technology.
4. Fattahi, P., Hosseini, S.M.H., Jolai, F. & Safi samghabadi, A.D. (2014). Multi-objective scheduling problem in a three-stage production system. *International J. of Industrial Engineering & Production Research*, 25(1), 1-12.
5. Fattahi, P., Saidi, M. & Jolai, F. (2007). Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(3), 331–342.
6. Geem, Z. W., Kim, J. H. & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76(2), 60-68.
7. Gholami, H., Mehdizadeh, E., Naderi, B. (2018). A model and imperialist competitive algorithm for the two-stage assembly flow shop problem with setup times. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(29), 93-111. (In Persian)
8. Gholizadeh, E., Afshar-Nadjafi, B. (2018). Solving a Bi-objective Resource constrained Multi-mode Project Scheduling Problem with regard to Payment Planning using the NSGA-II algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(30), 39-63. (In Persian)
9. Han, H. Y. (2012). Minimizing the total flow time for lot streaming flow shop using an effective discrete harmony search algorithm. In *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence*, Springer, Berlin, Heidelberg, PP. 32-40.
10. Lee, K. S. & Geem, Z. W. (2005). A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194(36-38), 3902-3933.
11. Mahdavi, M., Fesanghary, M. & Damangir, E. (2007). An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied mathematics and computation*, 188(2), 1567-1579.
12. Midhun, P., Sridharan, R. & Radha Ramanan, T. (2013). Multi-Objective Assembly Job Shop Scheduling Problems: A Mixed Integer Model. Twelfth AIMS International Conference on Management.
13. Rahimi, H., Azar, A., Rezaei-Pandari, A. (2015). Designing a Multi Objective Job Shop Scheduling Model and Solving it by Simulated Annealing. *Journal of Industrial Management Perspective*, 5(3), 39-63. (In Persian)
14. Reiter, S. (1966). A system for managing job-shop production. *Journal of Business*, 39(3), 371–393.
15. Sarin, S.C. & Yao, L. (2011). Single-batch lot streaming in a two-stage assembly system. *International J. of Planning and Scheduling*, 1(1), 90-108.
16. Tajbakhsh, Z., Fattahi, P. & Behnamian, J. (2013). Multi-objective assembly permutation flow shop scheduling problem: a mathematical model and a

meta-heuristic algorithm. *J. of the Operational Research Society*, 65(10), 1580-1592.

17. Wong, T.C., Chan, F.T.S. & Chan, L.Y. (2009). A resource-constrained assembly job shop scheduling problem with Lot Streaming technique. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 983–995.

18. Wong, T.C. & Ngan, S.C. (2013). A comparison of hybrid genetic algorithm and hybrid particle swarm optimization to minimize makespan for assembly job shop. *Applied Soft Computing*, 13(3), 1391–1399.

19. Yao L. & Sarin, C.S. (2014). Multiple-Lot Lot Streaming in a Two-stage Assembly System. *Essays in Production, Project Planning and Scheduling*, 200, 357-388.

## **Providing a Harmony Search Algorithm for Solving Multi Objective Job Shop Scheduling Problem with Considering an Assembly Stage and Lot Streaming**

**Parviz Fattahi<sup>\*</sup>, Elham Mohammadi<sup>\*\*</sup>, Fatemeh Daneshamooz<sup>\*\*\*</sup>**

### **Abstract**

In this research a multi-objective job shop scheduling problem with an assembly stage and lot streaming is studied. Lot streaming (LS) technique is a process in which a job (lot) is splitted into smaller jobs (sub-lots) such that successive operations can be overlapped. The aim of this study is to schedule and sequence operations in order to meet constraints and minimize the makespan and total weighted earliness and tardiness penalties which, in turn, leads to decrease time and costs and achieve more effective management in industrial departments. First, a mixed integer linear programming model is presented. Since this problem is classified as NP-hard, a metaheuristic algorithm based on Harmony Search is proposed to solve the problem. In order to verify the effectiveness of the proposed algorithm, several performance measures are used. Computational results revealed that the proposed algorithm outperforms non-dominated sorting Genetic algorithm.

**Keywords: Scheduling; Job Shop; Assembly; Lot Streaming; Harmony Search.**

---

Received: August 14, 2018, Accepted: April 30, 2019.

\* Professor, Alzahra University (Corresponding Author).

E-mail: p.fattahi@alzahra.ac.ir

\*\* MSc., Bu-Ali Sina University, Hamedan.

\*\*\* Ph.D Student, Bu-Ali Sina University, Hamedan.