مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال چهاردهم، شماره دوم (پیاپی ۵۳)، تابستان ۹۶، ص ص ۷۹-۶۷
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

ارایه یک روش ابتکاری برای زمانبندی مساله فلوشاپ ترکیبی دو مرحله‌ای چند معیاره

کامران‌مهردوست‌شهرستانی*[۱]، مریم‌حامدی[۲]
۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه پیام‌نور، گروه مهندسی‌صنایع، تهران، ایران
۲- استادیار، دانشگاه پیام‌نور، گروه مهندسی‌صنایع، تهران ، ایران

رسید مقاله: ۲۸ آذر ۱۳۹۵
پذیرش مقاله: ۱ خرداد ۱۳۹۶

چکیده
مسایل فلوشاپ ترکیبی دو مرحله‌ای را می‌توان به‌عنوان بخشی از مسایل بزرگ‌تر درنظرگرفت و با حل جزیی آن‌ها در مسایل بزرگ‌تر اقدام به حل مساله اصلی نمود. در این تحقیق، زمانبندی یک مساله فلوشاپ ترکیبی دو مرحله‌ای دارای یک ماشین در مرحله نخست و دو ماشین در مرحله دوم با سه معیار حداکثر زمان ساخت، متوسط زمان ساخت و مجموع زمان‌های بیکاری ماشین‌های مرحله دوم مدنظر می‌باشد. همچنین یک روش ابتکاری معرفی و با روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید (SA) در هر سه معیار ارزیابی مقایسه و در نهایت جواب‌های حاصل به‌صورت یک مساله تصمیم‌گیری چند معیاره و با استفاده از روش مجموع وزنی ساده (SAW) حل شده است. نتایج حاصل از مقایسه روش ابتکاری با روش‌های مبتنی بر SA، بیانگر برتری جواب‌های حاصل از روش ابتکاری در ۷۱/۵٪ از مسایل حل شده است. ضمن اینکه زمان حل مسایل با روش ابتکاری حدود ۴۸/۶ برابر کم‌تر از روش‌های مبتنی بر الگوریتم SA می‌باشد. همچنین در حل مسایل چند معیاره زمانبندی فلوشاپ ترکیبی مورد بررسی براساس شاخص SAW، روش ابتکاری در بیش از ۹۳/۴٪ مسایل به جواب‌هایی به‌طور متوسط ۳۰/۵٪ بهتر، دست یافته است.

کلمات کلیدی: فلوشاپ ترکیبی، شبیه‌سازی تبرید، فلوشاپ ترکیبی دو مرحله‌ای چند معیاره، SAW .

۱ مقدمه
مساله زمانبندی فلوشاپ ترکیبی (HFS)، از پرکاربردترین مسایل زمانبندی تولید است و به اواخر دهه ۷۰ میلادی برمی‌گردد. یک سیستم فلوشاپ ترکیبی مشتمل بر یک‌سری مراحل یا کارگاه‌های تولید است که در هر کدام از آن‌ها چند ماشین (منبع) وجود دارد. بعضی از مراحل ممکن است فقط یک ماشین داشته باشند. اما برای اینکه به چنین سیستمی فلوشاپ ترکیبی گفته شود، باید در حداقل یک مرحله، چند ماشین موازی وجود داشته باشد [۱].

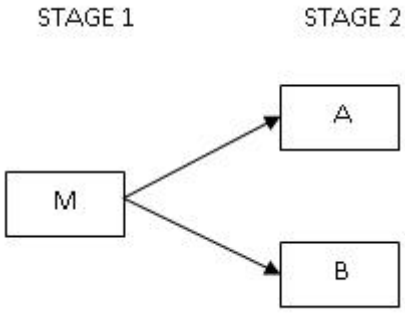
* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: kamranmehrdoost@pnu.ac.ir

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

مساله فلوشاپ ترکیبی، حالت تعمیم یافته‌ای از دو نوع خاص از مسایل زمانبندی، موسوم به زمانبندی فلوشاپ و مساله ماشین‌های موازی است؛ لذا شامل مجموعه‌ای از مراحل تولیدی است که هر کدام چندین ماشین موازی عملیاتی دارند. جریان محصولات در سیستم تولید یکسان و تک‌جهت است. هر کار توسط یک ماشین در هر مرحله پردازش می‌شود و ماشین‌های هر مرحله می‌توانند سرعت پردازش متفاوت داشته باشند. ازاین رو هدف تنها تعیین یک ترتیب و توالی جهت پردازش کارها در سیستم نیست. بلکه علاوه بر تعیین اولویت و ترتیب پردازش کارها، تخصیص مناسب کارها به هر یک از ماشین‌های موازی نیز با هدف دست‌یابی به یک معیار کارایی، مورد توجه است[۲]. درشکل۱، یک سیستم فلوشاپ ترکیبی با یک ماشین در مرحله اول و دو ماشین در مرحله دوم نشان داده شده است.

مساله مورد بررسی در این تحقیق عبارت از زمانبندی یک مساله فلوشاپ ترکیبی دو مرحله‌ای دارای یک ماشین در مرحله نخست و دو ماشین موازی با زمان‌های پردازش متفاوت در مرحله دوم می‌باشد. (شکل ۱) از موارد کاربرد این مساله می‌توان به سیستم‌های تولید دومرحله‌ای شامل کارخانجات بافندگی، تزریق پلاستیک و برخی از فرآیندهای تولید صنعتی مانند آهنگری، ریخته‌گری و ماشین‌کاری اشاره نمود.

هدف از این تحقیق، انتخاب یک ترتیب مناسب برای پردازش کارها بدون محدودیت در تعداد کار، بر روی ماشین مرحله اول و تخصیص هر کار پردازش شده مرحله نخست به یکی از ماشین‌های مرحله دوم می‌باشد. به‌طوری‌که معیارهای تعریف شده جهت ارزیابی کارایی زمانبندی، بهینه گردد.



شکل ۱. مساله فلوشاپ ترکیبی دومرحله‌ای

تابع هدف در اغلب مسایل زمانبندی کمینه‌سازی کل زمان انجام کار[1] ($C_{\max}$) یا بیش‌ترین زمان جریان ($F_{\max}$) می‌باشد و علی‌رغم اهمیت مسایل زمانبندی فلوشاپ ترکیبی بصورت مدل‌های چند معیاره، مطالعات انجام شده در این زمینه به نسبت سایر حوزه‌های زمانبندی از تعدد کم‌تری برخوردار است[۳]. ازاین‌رو در این تحقیق سه معیار ارزیابی بیش‌ترین زمان جریان ($F_{\max}$)، میانگین مدت زمان در جریان ساخت ($\overline{F}$) و مجموع زمان‌های بیکاری ماشین‌های مرحله دوم ($Idle$) مد نظر می‌باشد.

[1] Makespan

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

۲ پیشینه تحقیق

زمانبندی HFS دو مرحله‌ای به حالتی از فلوشاپ گفته می‌شود که در آن حداقل در یک مرحله بیش از یک ماشین جهت پردازش کارها وجود دارد. گوپتا[۴]، نشان داد که مساله HFS با دو مرحله پردازش، حتی در صورتی که یک مرحله شامل دو ماشین و مرحله دیگر شامل فقط یک ماشین باشد، یک مساله $NP-hard$ است. ریان و همکاران[۵]، نیز نشان دادند که این مساله $NP-hard$ است و الگوریتم‌های ابتکاری را برای حل این مساله ارایه کردند. یانگ [۶] نیز این مساله را بررسی و دشواری آن‌را به اثبات رسانده است. مسایل فلوشاپ ترکیبی را می‌توان از جهات مختلف دسته‌بندی و بررسی نمود. لین و ژانگ[۷]، وانگ[۸] و رویز ورودریگز[۹]، مسایل فلوشاپ ترکیبی را به سه دسته دو مرحله‌ای، سه مرحله‌ای و k مرحله‌ای تقسیم کردند. ریباس و همکاران[۱۰] به بررسی و دسته بندی مسایل فلوشاپ ترکیبی بر اساس نوع ماشین مورد استفاده پرداخته و مسایل فلوشاپ ترکیبی را به سه دسته دارای ماشین‌های موازی یکسان، یکنواخت ونامرتبط تقسیم بندی نمودند. رویز و رودریگز[۹]، همچنین به بررسی تعداد قابل توجهی از مقالات زمانبندی فلوشاپ ترکیبی پرداخته و براساس روش استفاده شده در حل مساله، آن‌ها را در سه دسته ۱) استفاده از الگوریتم دقیق، ۲) استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و قوانین ارسال[1] و ۳) استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری قرار دادند.

الگوریتم‌های دقیق عمدتاً بر پایه برنامه ریزی خطی و عدد صحیح مختلط و روش شاخه و کران هستند. از آنجاکه الگوریتم‌های دقیق، به دلیل پیچیدگی و زمان بر بودن مسایل قادر به حل همه انواع مسایل فلوشاپ ترکیبی نیستند، لذا به‌کارگیری الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری در این حوزه توسعه داده شد. چونگ و همکاران[۱۱] نیز روش‌های فراابتکاری قابل استفاده در مسایل فلوشاپ ترکیبی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که الگوریتم‌های[2] SA و[3] TS از جمله پرکاربردترین الگوریتم‌های فراابتکاری در حوزه مسایل فلوشاپ ترکیبی هستند.

در مسایل HFS ساده‌ترین سناریو، در نظر گرفتن فقط دو مرحله می‌باشد، به گونه ای که یک ماشین در یک مرحله و دو ماشین در مرحله دیگر در نظر گرفته شود. هرمان و لی [۱۲]، مدل زمان‌بندی فلوشاپ ترکیبی دو مرحله‌ای، با یک ماشین در مرحله اول و دو ماشین اختصاصی در مرحله دوم را بررسی نموده و دشواری مساله باهدف زمان تکمیل آخرین کار و تعداد کارهای دارای تاخیر را نشان دادند. توجه به مقوله سیستم‌های تولید ترکیبی، در محیط کارگاهی نیز با معرفی ماشین‌های موازی گسترش یافته است. فتاحی و دانش آموز[۱۳]، مدلی را برای زمانبندی خط تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاژ موازی ارایه کردند و جهت بررسی صحت عملکرد مدل، چند نمونه مساله با اندازه کوچک توسط $GAMS$ حل کردند. نعمتی، شیخانی و کردرستمی [۱۴]، نیز بهینه‌سازی زمان‌بندی الگوریتم‌های موازی در سیستم‌های چند پردازنده یا کامپیوتری که شامل تعدادی پردازنده همسان بوده و در هر زمان، تنها یک وظیفه روی پردازنده اجرا می‌شود، را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی نمودند.

[1] Dispatching rules
[2] Simulated annealing
[3] Tabu Search

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

وانگ و لیو [۱۵]، مجموعه ای از n کار مستقل را با هدف کمینه‌کردن حداکثر زمان ساخت در محیط فلوشاپ ترکیبی با یک ماشین در مرحله نخست و دو یا چند ماشین اختصاصی[1] در مرحله دوم بررسی کردند. به‌طوری‌که عملیات مربوط به هر کار ابتدا روی ماشین مرحله ۱ و سپس روی ماشین اختصاصی آن در مرحله ۲ انجام گردد. آن‌ها یک روش ابتکاری بر مبنای شاخه و کران و دو الگوریتم TS و SA را پیشنهاد دادند. رضائیان و همکاران [۱۶]، مساله وانگ و لیو [۱۵] را به محیط فلوشاپ ترکیبی نوع مونتاژ تعمیم داده و یک مدل مبتنی بر برنامه ریزی خطی، با هدف کمینه کردن ماکزیمم زمان تکمیل ارایه دادند.

یانگ [۱۷]، نیز این مساله را با دو ماشین اختصاصی در مرحله نخست و یک ماشین در مرحله دوم بررسی کرد و ضمن نشان دادن پیچیدگی مساله، دو روش ابتکاری ساده و حسی را برای حل این مساله توسعه داده و بدترین حالت[2] جواب آن‌ها را مقایسه کرد. به کارگیری ترکیبی الگوریتم‌های فراابتکاری نیز مورد توجه محققین واقع شده است. بهشتی نیا و بیدگلی [۱۸]، مساله زمانبندی فلوشاپ ترکیبی را با دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید و یک الگوریتم ترکیبی از آن‌ها حل نموده و نشان دادند که الگوریتم ترکیبی از کارایی بهتری برخوردار است.

۳ مساله و روش تحقیق

در این تحقیق سعی شده است تا مساله دو مرحله‌ای وانگ و لیو[۱۵]، در محیط فلوشاپ ترکیبی با یک ماشین در مرحله نخست و دو ماشین مشابه[3] در مرحله دوم و با هدف دستیابی به سه معیار، کمینه‌سازی حداکثر زمان ساخت، کمینه‌سازی متوسط زمان ساخت و کمینه‌سازی مجموع زمان‌های بیکاری ماشین‌های مرحله دوم بررسی شود. ازاین‌رو نخست مساله با هر یک از معیارهای ارزیابی، به صورت تک هدفه بررسی شده و سپس مناسب‌ترین جواب‌ها، به صورت یک مساله تصمیم‌گیری چند معیاره با استفاده از روش مجموع وزنی ساده (SAW[4]) مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ لذا می‌توان نوآوری‌های این تحقیق را بررسی مساله به صورت چند معیاره و به کارگیری ماشین‌های مشابه در مرحله دوم دانست.

۳-۱ فرضیات مساله

در این مساله، تمامی کارها در زمان صفر در دسترس هستند. هر کار باید ابتدا در مرحله اول و سپس در مرحله دوم پردازش شود. زمان‌های آماده‌سازی و زمان‌های حمل و نقل ناچیز بوده و یا در زمان انجام کار لحاظ شده اند. ماشین‌ها همواره در دسترس هستند و توقف ناشی از خرابی یا نگهداری و تعمیرات تعریف نشده است. قطع کار مجاز نیست و هیچ‌کاری نمی‌تواند بصورت همزمان روی چند ماشین پردازش شود.

[1] Dedicated machine
[2] Worst case
[3] Uniform machine
[4] Simple Additive Weighting

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

۳-۲ رویکرد حل مساله

رویکرد حل این مساله دارای دو مرحله می‌باشد.

۱) تعیین جواب‌های قابل پذیرش و ۲) انتخاب مناسب‌ترین جواب

در مرحله نخست یک روش ابتکاری برای حل این مساله توسعه داده شده است و نتیجه به‌دست آمده از روش ابتکاری با سه کد نوشته شده با نرم‌افزار $MATLAB$ ، مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) که هر یک از آن‌ها، یکی از معیارهای ارزیابی را کمینه می‌کنند، مقایسه شده است. در مرحله دوم، داده‌های چهار الگوریتم مورد استفاده (H , SA۱, SA۲, SA۳) با سه معیار ارزیابی ($Idle, \overline{F}, F_{\max}$)یک ماتریس تصمیم را تشکیل داده و سرانجام با استفاده از روش SAW مناسب‌ترین جواب انتخاب می‌گردد.

۳-۳ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) طراحی شده

الگوریتم SA ابتدا از یک جواب اولیه شروع می‌کند و سپس در یک حلقه تکرار به سمت جواب‌های همسایگی میل می‌کند. اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، الگوریتم آن‌را به عنوان جواب فعلی قرار می‌دهد و در غیر این صورت، الگوریتم آن‌را با احتمال $e^{\frac{-\Delta E}{T}}$ به عنوان جواب فعلی می‌پذیرد. در این رابطه ΔE تفاوت بین تابع هدف جواب فعلی و جواب همسایه است و T پارامتر دما است. در هر دما، چندین تکرار اجرا می‌شود و سپس دما به آرامی کاهش داده می‌شود. در گام‌های اولیه که دما بالا قرار داده می‌شود، احتمال بیشتری برای پذیرش جواب‌های بدتر وجود داشته و با کاهش تدریجی دما، در گام‌های پایانی احتمال کم‌تری برای پذیرش جواب‌های بدتر وجود خواهد داشت و بنابراین الگوریتم به سمت یک جواب خوب همگرا می‌شود [۱۹].

الگوریتم SAطراحی‌شده برای این مقاله دارای دو حلقه تکرار شونده داخلی و بیرونی می‌باشد. به‌طوری‌که نخست کارها با یک ترتیب تصادفی جهت پردازش بر روی ماشین مرحله نخست انتخاب می‌شوند. سپس هر کار به‌طور تصادفی به یکی از ماشین‌های مرحله دوم تخصیص می‌یابد. حلقه داخلی با تغییر ماشین پردازنده مرحله دوم با ایجاد یک جواب همسایگی تکرار خواهد شد. تکرارها از یک دمای اولیه شروع و با کاهش دما ادامه یافته و پس از رسیدن به دمای محیط اتمام می‌یابد. سپس حلقه بیرونی با تغییر ترتیب پردازش کارها به یک جواب همسایگی رسیده و مجدداً حلقه داخلی تکرار خواهد شد.

الگوریتم دارای دو حلقه خارجی و داخلی می‌باشد. که حلقه داخلی یک SA همگن و حلقه خارجی یک SA ناهمگن را شامل می‌شود. وظیفه حلقه خارجی تعیین ترتیب پردازش کارها بر روی ماشین مرحله نخست و وظیفه حلقه داخلی تخصیص هر کار به یکی از ماشین‌های مرحله دوم می‌باشد. ابتدا دمای اولیه حلقه خارجی را تعیین نموده، سپس یک ترتیب تصادفی برای پردازش کارها روی ماشین مرحله نخست انتخاب می‌گردد. پس از آن دمای اولیه حلقه داخلی تعیین و ضمن انتخاب یک ترتیب تصادفی برای پردازش کارها روی ماشین‌های مرحله دوم، تابع هدف مساله را نیز محاسبه می‌شود. حال مطابق الگوریتم SA، یک جواب همسایگی با تغییر تخصیص ماشین مربوط به یک کار انتخاب شده، به‌دست می‌آید. چنانچه جواب به‌دست آمده بهتر از

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

جواب قبلی باشد، آن را می‌پذیریم. در غیر این صورت تابع پذیرش جواب را از رابطه $e^{\frac{-\Delta E}{T}}$ محاسبه نموده و درصورتی‌که از عدد تصادفی تولید شده بزرگ‌تر باشد، جواب به‌دست آمده را می‌پذیریم. در ادامه چنانچه شرط تعادل برقرار باشد، دما را کاهش داده و در غیر این صورت تا رسیدن به تعادل حلقه را تکرار می‌کنیم. تکرارهای حلقه خارجی تا رسیدن به دمای محیط ادامه می‌یابد. تکرارهای حلقه داخلی نیز تا رسیدن به دمای محیط، به ازای هر دمای حلقه خارجی انجام شده و جستجوی جواب مساله تا رسیدن دمای حلقه خارجی به دمای محیط ادامه خواهد یافت.

۳-٤ الگوریتم ابتکاری

الگوریتم ابتکاری ارایه شده در این تحقیق برگرفته از دو الگوریتم زودترین زمان پردازش (SPT [1])و اولین ماشین در دسترس (FAM [2])است که با هدف تخصیص هر کار آماده پردازش، به ماشین دارای کم‌ترین زمان پردازش از بین ماشین‌های در دسترس انجام می‌شود و شامل مراحل زیر است.

۱- کارها را به ترتیب کوچک‌ترین زمان پردازش روی ماشین مرحله نخست مرتب کنید.
۲- اولین کار را به ماشین با کم‌ترین زمان پردازش در مرحله دوم تخصیص دهید.
۳- کار بعد را به ماشین دارای زودترین زمان دسترسی در مرحله دوم تخصیص دهید.
۴- چنانچه بیش از یک ماشین جهت پردازش کار دردسترس باشد، کار را به ماشین با کم‌ترین زمان پردازش از بین ماشین‌های دردسترس تخصیص دهید.
۵- به مرحله ۴ برگردید.

٤ اعتبار سنجی

در اعتبار سنجی حل مساله به تنظیم پارامترهای الگوریتم فراابتکاری طراحی شده برای این مساله، تعریف معیارهای ارزیابی و تولید مسایل تصادفی و نتایج حل مساله تصمیم‌گیری چند معیاره توجه شده است.

٤-۱ پارامترهای SA طراحی شده

SA یک الگوریتم جستجوی فراابتکاری است که به بررسی فضای جواب با تولید جواب‌های همسایگی می‌پردازد و بدیهی است که هر چه دمای اولیه بیش‌تر و هر چه ضریب هندسی کاهش دما به عدد یک نزدیک تر باشد، تعداد تکرارهای بیشتری انجام شده و در نتیجه احتمال دست یافتن به جواب بهتر افزایش خواهد یافت؛ لکن این واقعیت که افزایش تعداد تکرار متناسب با افزایش زمان حل مساله خواهد بود نیز انکار ناپذیر است. لذا برآورد صحیح پارامترهای SA یک امر اجتناب ناپذیر خواهد بود. در این تحقیق برای پرهیز از تعریف یک دمای اولیه ثابت، برای تمام انواع مسایل مورد بررسی، دمای اولیه حلقه‌های خارجی و داخلی تابعی از تعداد

[1] Shortest process time
[2] First available machine

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]
[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

کارهای هر مساله تعریف شده اند. حداکثر تکرارهای ممکن در حلقه خارجی از رابطه $n!$ به‌دست می‌آید و حداکثر تکرارهای ممکن در حلقه داخلی نیز از رابطه ۲^n به‌دست خواهد آمد. از آنجا که به ازای تعداد کارهای بیش از ۴ کار، حداکثر تکرارهای ممکن در حلقه خارجی بیش‌تر از حداکثر تکرارهای ممکن در حلقه داخلی می‌باشد، لذا دمای اولیه حلقه خارجی بزرگ‌تر از دمای اولیه حلقه داخلی در نظر گرفته شده است. تکرار در حلقه‌های خارجی و داخلی تا رسیدن به دمای محیط ادامه خواهد یافت. دمای محیط برای هردو حلقه داخلی و خارجی برابر ۲۵ درجه سانتی گراد تعریف شده است. شرط تعادل در حلقه داخلی به صورت استاتیک برابر با ۱۰ تکرار در هر دمای حلقه داخلی تعریف شده است. در این مرحله سه دمای اولیه براساس سه تابع وابسته به تعداد کار به شرح جدول ۱ برای هر دو حلقه خارجی و داخلی مورد بررسی قرار گرفتند. واضح است که هرچه دمای اولیه SA بالاتر باشد، تکرارهای بیشتری انجام شده و زمان حل مساله افزایش خواهد یافت. نتایج بررسی‌های انجام شده روی یکصد مساله تصافی با دارای ۲۰ کار، نشان دادند که افزایش بسیار زیاد تعداد تکرارها در دمای $۱۰۰۰n$ برای هر دو حلقه، تاثیر محسوسی بر جواب نهایی مساله مورد بررسی نداشته و تنها زمان حل مساله را به شدت افزایش داده است و چنانچه دمای اولیه از رابطه $۱۰۰n$ به‌دست آید در مسایل با تعداد کار کم، جواب‌های مناسبی به‌دست نخواهد آمد. از این‌رو مقادیر دمای اولیه حلقه خارجی از رابطه $۱۰۰۰\times ۲^{\ln(n)}$ و دمای اولیه حلقه داخلی از رابطه $۱۰۰۰\times ۲^{\log(n)}$ تعریف شده است ؛زیرا در این دما تعداد تکرار حلقه‌های خارجی و داخلی و طبعاً زمان حل مساله کاهش می‌یابد. ضمن اینکه در بسیاری از مسایل بررسی شده مناسب‌ترین جواب‌ها نیز به‌دست آمده است.

جدول۱. تعریف دمای اولیه حلقه‌های داخلی و خارجی در الگوریتم‌های مبتنی بر SA

حلقه	تابع ۱	تابع ۲	تابع ۳
حلقه خارجی	$۱۰۰n$	$۱۰۰۰\times ۲^{\ln(n)}$	$۱۰۰۰n$
حلقه داخلی	$۱۰۰n$	$۱۰۰۰\times ۲^{\log(n)}$	$۱۰۰۰n$

در ادامه و برای تعیین ضریب کاهش دما در هر تکرار الگوریتم SA، تعدادی از مسایل تعریف شده با سه ضریب کاهش دمای ۹۸٪ ، ۹۵٪ و ۹۰٪ برای هر دو حلقه، حل شده و بادرنظر گرفتن نسبت بین زمان حل مساله و کیفیت جواب‌های به‌دست آمده، ضریب کاهش دمای ۹۵٪ برای حلقه داخلی و ۹۰٪ برای حلقه خارجی در نظر گرفته شد.

در خصوص شرط تعادل استاتیک ۱۰ تکرار در هر دمای حلقه داخلی نیز، یکصد مساله تصادفی دارای ۲۰ کار تولیدشد و جواب‌های حاصل با تعداد تکرارهای ۵، ۱۰ و ۲۰ در حلقه داخلی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بررسی نشان دادند که در بیش از ۸۷٪ مسایل تولید شده جواب‌های حاصل از ۱۰ تکرار با ۲۰ تکرار برابر بودند. در حالی که زمان حل مساله تقریباً ۱۶۰٪ افزایش داشته و ۲/۶ برابر شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

٤-٢ یافته‌های تحقیق

در این تحقیق سه معیار ارزیابی ($Idle, \overline{F}, F_{\max}$) مورد نظر هستند که هر یک جداگانه مورد بررسی واقع شدند. در ارزیابی هر یک از معیارهای کارایی زمانبندی، تعداد پانصد مساله تصادفی تولید شده با الگوریتم ابتکاری و الگوریتم مبتنی بر SA حل شده و نتایج حاصل مقایسه شده اند. زمان پردازش کارها در ماشین مرحله نخست به صورت تصادفی از اعداد بین ۱۰ تا ۲۰ ساعت و زمان‌های پردازش کارها در ماشین‌های مرحله دوم نیز به صورت تصادفی از اعداد بین ۲۰ تا ۴۰ ساعت تولید شده اند. جداول ۲، ۳و ۴ مقایسه نتایج حاصل از حل تعداد ۵۰۰ مساله تصادفی با استفاده از روش ابتکاری و روش‌های مبتنی بر الگوریتم SA در هر تابع هدف را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه روش ابتکاری و روش مبتنی بر الگوریتم SA در تابع هدف $F_{\max}$

تعداد مساله (۱)	تعداد کار(۲)	تعداد بهتر بودن روش ابتکاری(۳)	میزان بهتر بودن روش ابتکاری(۴)	نسبت زمان SA به روش ابتکاری(۵)
	۱۰	۲۴	٪۰	۴۶
	۲۰	۴۹	٪۰	۵۱
۱۰۰	۳۰	۵۵	٪۰/۳۲	۶۴
	۵۰	۸۳	٪۱/۳۳	۷۳
	۱۰۰	۸۸	٪۱/۴۸	۸۰
متوسط		۵۹/۸	٪۰/۶۲۶	۶۲/۸

ستون ۱ جدول فوق بیانگر تعداد مساله تصادفی تولید شده و ستون ۲ بیانگر تعداد کار با زمان‌های تصادفی در هر مساله می‌باشد. ستون ۳ معرف تعداد مسایلی است که روش ابتکاری جواب‌های بهتر یا هم‌ارز با الگوریتم SA تولید می‌کند و ستون ۴ درصد بهبود مجموعه جواب‌های روش ابتکاری نسبت به جواب‌های الگوریتم SA در کل یکصد مساله مورد بررسی با هر تعداد کار را نشان می‌دهد و ستون ۵ نیز نسبت زمان حل یکصد مساله تصادفی را با استفاده از الگوریتم SA به زمان حل همان مسایل با روش ابتکاری نشان می‌دهد. همان طور که از جدول فوق مشاهده می‌شود روش ابتکاری به‌طور متوسط در ٪۵۹/۸ مسایل جواب‌هایی بهتر و یا دست کم هم‌ارز روش مبتنی بر الگوریتم SA ارایه می‌دهد و مجموعه جواب‌های روش ابتکاری در کل ۵۰۰ مساله تولید شده ٪۰/۶۲۶ بهتر از جواب‌های روش مبتنی بر الگوریتم SA است. ضمن آنکه روش ابتکاری به‌طور متوسط ۶۲/۸ بار سریع‌تر از روش مبتنی بر SA به جواب خواهد رسید.

جدول شماره ۳ نشان می‌دهد که در معیار ارزیابی متوسط زمان تکمیل کارها ($\overline{F}$)، روش ابتکاری به‌طور متوسط در ٪۹۵/۲ مسایل، جواب‌های بهتر و یا دست کم هم‌ارز روش مبتنی بر الگوریتم SA ارایه می‌دهد و مجموعه جواب‌های روش ابتکاری در کل ۵۰۰ مساله تولید شده ٪۵/۳ بهتر از جواب‌های روش مبتنی بر

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

الگوریتم SA است. ضمن آنکه زمان حل هر مساله در روش ابتکاری به‌طور متوسط ۵۶ بار کم‌تر از روش مبتنی بر SA می‌باشد.

جدول ۳. مقایسه روش ابتکاری با روش مبتنی بر الگوریتم SA در تابع هدف $\overline{F}$

تعداد مساله	تعداد کار	تعداد بهتر بودن روش ابتکاری	میزان بهتر بودن روش ابتکاری	نسبت زمان SA به روش ابتکاری
	۱۰	۸۷	٪۳/۱۸	۵۱
	۲۰	۹۴	٪۵/۵۹	۵۲
۱۰۰	۳۰	۹۷	٪۶/۱۲	۵۳
	۵۰	۹۸	٪۶/۳۷	۶۰
	۱۰۰	۱۰۰	٪۵/۲۳	۶۴
	متوسط	۹۵/۲	٪۵/۳	۵۶

در بررسی و مقایسه جواب‌های حاصل از روش ابتکاری و روش مبتنی بر الگوریتم SA در معیار مجموع زمان‌های بیکاری ماشین‌های مرحله دوم $(Idle)$، نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد. از بررسی جدول ۴ مشاهده می‌شود که روش ابتکاری به‌طور متوسط در ٪۵۹/۶ مسایل، جواب‌هایی بهتر و یا دست کم هم‌ارز روش مبتنی بر الگوریتم SA ارایه می‌دهد و مجموعه جواب‌های روش ابتکاری در کل ۵۰۰ مساله تولید شده ٪۱۱/۶۲ بهتر از جواب‌های روش مبتنی بر الگوریتم SA است. ضمن آنکه روش ابتکاری به‌طور متوسط ۲۷/۲ بار سریعتر از روش مبتنی بر SA به حل هر مساله دست خواهد یافت.

جدول ٤. مقایسه روش ابتکاری با روش مبتنی بر الگوریتم SA در تابع هدف $Idle$

تعداد مساله	تعداد کار	تعداد بهتر بودن روش ابتکاری	میزان بهتر بودن روش ابتکاری	نسبت زمان SA به روش ابتکاری
	۱۰	۲۴	٪۰	۲۴
	۲۰	۵۴	٪۰/۶۳۲	۲۵
۱۰۰	۳۰	۶۸	٪۹/۰۳	۲۸
	۵۰	۷۲	٪۱۸/۹۴	۲۹
	۱۰۰	۸۰	٪۲۹/۴۵	۳۰
	متوسط	۵۹/۶	٪۱۱/۶۲	۲۷/۲

از بررسی جداول ۲، ۳ و ۴، دو نتیجه منطقی به‌دست خواهد آمد. نخست اینکه زمان حل روش‌های مبتنی بر الگوریتم SA با افزایش تعداد کارها افزایش می‌یابد که این مساله به دلیل افزایش تعداد تکرارها در حلقه‌های داخلی و خارجی است؛ زیرا دمای اولیه هر دو حلقه داخلی و خارجی تابعی از تعداد کارهای هر مساله می‌باشد و

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

بدیهی که با افزایش تعداد کارها، تعداد تکرارهای هر حلقه و طبیعتاً زمان حل مسایل نیز افزایش خواهد یافت. دوم اینکه کیفیت جواب روش‌های مبتنی بر SA با افزایش تعداد کارها کاهش می‌یابد ؛زیرا هر چه تعداد کارها افزایش می‌یابد، تعداد جایگشت‌های ممکن تخصیص کار به ماشین به مراتب بیش‌تر خواهد شد و طبیعتاً تکرارهای انجام شده قادر به پوشش تمام حالت‌های ممکن نخواهند بود و بدیهی است که احتمال دستیابی به بهترین جواب ممکن کاهش خواهد یافت. اما این هر دو نافی ارزش‌های روش ابتکاری نیستند زیرا روش ابتکاری در بسیاری از مسایل هر سه معیار ارزیابی، تنها در یک تکرار با زمانی بسیار کوتاه به جوابی بهتر از روش‌های مبتنی بر SA دست می‌یابد. این موضوع حتی در مسایل با ۱۰ کار در دسترس، که بخش قابل توجهی از جایگشت‌های ممکن در تکرارهای SA مورد بررسی قرار می‌گیرند نیز صحت دارد.

٤-۳ نتایج حل مساله تصمیم‌گیری چند معیاره

نتایج حاصل از مقایسه جواب‌های روش ابتکاری و روش‌های مبتنی بر الگوریتم SA در ۱۵۰۰ مساله، نشان از برتری نسبی روش ابتکاری در کیفیت جواب و برتری قاطع این روش در زمان حل مسایل دارد. اما اکنون این سوال مطرح می‌شود که آیا این برتری در مجموع سه شاخص نیز برقرار است؟ از این‌رو با تلفیق کدهای نوشته شده در سه شاخص مورد نظر، تعداد ۵۰۰ مساله جدید مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که برای هر مساله، نخست بر اساس یکی از شاخص‌ها، بهترین مقدار تابع هدف تعیین شده و سپس ارزش دو معیار دیگر نیز محاسبه می‌گردد. از این‌رو جواب نهایی به صورت یک ماتریس رتبه ۳، ارایه می‌گردد. به‌طوری‌که هر سطر بیانگر یک الگوریتم و هر ستون بیانگر یکی از معیارهای ارزیابی است. داده‌های سطر چهارم این ماتریس نیز از نتایج حاصل از روش ابتکاری استخراج می‌گردد. سپس مناسب‌ترین جواب، با استفاده از روش SAW انتخاب می‌گردد. ضمن اینکه وزن معیارها در این مساله برابر در نظر گرفته شده است. نمونه ای از یک مساله حل شده با ۱۰ کار بر اساس روش‌ها و معیارهای فوق در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. یک نمونه ماتریس تصمیم به‌دست آمده از حل یک مساله با روش ابتکاری و سه روش مبتنی بر SA

$Metod$	$F_{\max}$	$\overline{F}$	$Idle$
SA_Idle	۴۴۴	۲۴۶/۵	۸۲
$SA_\overline{F}$	۴۲۷	۱۸۷/۹۵	۲۴۴
SA_F_{max}	۳۲۷	۲۰۱/۳۵	۱۵۷
$Heuristic$	۳۴۲	۱۷۵/۳۵	۱۱۷

پس از حل این مساله با استفاده از روش SAW با معیارهای هم ارزش (دارای وزن برابر) نتایج به‌صورت جدول ۶ به‌دست خواهد آمد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

جدول ٦. SAW به‌دست آمده از حل مساله نمونه با روش ابتکاری و سه روش مبتنی بر SA

Method	SA_Idle	$SA_\overline{F}$	SA_F_{max}	*Heuristic*
SAW	۰/۸۱۵۹	۰/۶۷۸۲	۰/۷۹۷۶	۰/۸۸۵۶

ملاحظه می‌شود که شاخص SAWروش ابتکاری، بهتر از سه روش دیگر و جواب نهایی این شاخص در روش ابتکاری ۱۵/۹۳٪ بهتر از میانگین سه روش دیگر است. در حل این مساله تصمیم‌گیری چند معیاره وزن شاخص‌ها که همان درجه اهمیت هر یک از معیارهای ارزیابی باشد، مساوی در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که جداول ۲، ۳ و ۴، نشان از برتری غیر قابل انکار روش ابتکاری در زمان حل مسایل دارند، لذا معیار زمان در ارزیابی مسایل چند معیاره لحاظ نشد و تنها معیارهای ($Idle, \overline{F}, F_{\max}$) در حل این مسایل درنظر گرفته شده است. نکته مهم بررسی مساله به‌صورت چند معیاره این است که پاسخ روش ابتکاری الزاماً در هر سه معیار ارزیابی بهتر از روش‌های دیگر نیست. بلکه بر اساس ارزیابی توسط روش SAW نتیجه بهتری حاصل شده است. نتایج حاصل از حل ۵۰۰ مساله تصادفی چند معیاره، با استفاده از سه روش مبتنی بر SA و روش ابتکاری در جدول۷، آمده است. نتایج ، نشان می‌دهد که روش ابتکاری در بیش از ۹۳/۴٪ مسایل حل شده جواب بهتری ارایه نموده است ضمن اینکه SAW جواب‌های روش ابتکاری به‌طور متوسط ۳۰/۵٪ بهتر از میانگین SAW حاصل از سه روش دیگر است.

جدول ۷. مقایسه روش ابتکاری با روش‌های مبتنی بر الگوریتم SA بر اساس روش SAW

تعداد مساله	تعداد کار	تعداد بهتر بودن روش ابتکاری	میزان بهتر بودن روش ابتکاری
۱۰۰	۱۰	۸۵	٪۲۳/۰۸۴
	۲۰	۹۴	٪۲۷/۲۲۳
	۳۰	۹۵	٪۳۰/۰۳۷
	۵۰	۹۵	٪۳۴/۹۷۵
	۱۰۰	۹۸	٪۳۷/۱۵۳
	متوسط	۹۳/۴	٪۳۰/۵

۵ نتیجه‌گیری

جدول ۸ مقایسه‌ای بین جواب‌های روش ابتکاری با روش‌های مبتنی بر الگوریتم SA را در معیارهای ارزیابی تعریف شده نشان می‌دهد. به‌طوری‌که از جدول ۸ برمی‌آید روش ابتکاری قادر است در ۷۱/۵٪ مسایل و در زمان ۴۸/۶ برابر کوچک تر، به جواب‌هایی با کیفیت ۵/۸۵٪ بهتر دست یابد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

جدول ۸. مقایسه روش ابتکاری با روش‌های مبتنی بر الگوریتم SA در معیارهای ارزیابی

معیار ارزیابی	درصد بهتر بودن روش ابتکاری	میزان بهتر بودن جواب روش ابتکاری	نسبت زمان حل SA به روش ابتکاری
حداکثر زمان ساخت	٪۵۹/۸	٪۰/۶۲۶	۶۲/۸
متوسط زمان ساخت	٪۹۵/۲	٪۵/۳	۵۶
بیکاری ماشین‌های مرحله ۲	٪۵۹/۶	٪۱۱/۶۲	۲۷/۲
متوسط	٪۷۱/۵	٪۵/۸۵	۴۸/۶

بررسی دقیق‌تر این جدول، بیانگر این واقعیت است که روش ابتکاری در ارزیابی معیار متوسط زمان ساخت ($\overline{F}$) به مراتب بهتر از دو معیار دیگر عمل نموده است. به‌طوری‌که در بیش از ٪۹۵ مسایل جواب بهتر و یا هم‌ارز روش مبتنی بر SA ارایه داده است. همچنین از بررسی جداول ۲، ۳ و ۴ بر می‌آید که کارایی روش ابتکاری، با افزایش تعداد کارها، در هر سه الگوریتم مبتنی بر SA، افزایش خواهد یافت. هر چند روش ابتکاری در کمینه‌سازی معیار میانگین زمان ساخت مناسب‌تر به نظر می رشد، لکن این واقعیت که روش ابتکاری در بیش از نیمی از مسایل، جواب‌های بهتری ارایه نموده است، غیر قابل انکار است. از بررسی جداول ۲، ۳و ۴ نیز به این واقعیت دست خواهیم یافت که روش ابتکاری در حل مسایل با تعداد کار بیش‌تر به مراتب بهتر از روش‌های مبتنی بر SA عمل نموده است. ضمن اینکه زمان حل مسایل با روش ابتکاری به‌مراتب کم‌تر از روش‌های مبتنی بر SA می‌باشد. همچنین در بررسی مساله به صورت چند معیاره نیز، روش ابتکاری در ٪۹۳/۴ مسایل حل شده جواب بهتری ارایه نموده است ضمن اینکه SAW مجموعه جواب‌های روش ابتکاری به‌طور متوسط ٪۳۰/۵ بهتر از میانگین SAW جواب‌های حاصل از سه روش دیگر بوده است.

منابع

[۱] فاطمی قمی، م .ت.، زندیه، م.، (۱۳۸۱). یک چارچوب و طرح طبقه بندی برای مدل‌سازی سیستم‌های تولیدی. دومین کنفرانس ملی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد.

[۲] غلامی، س.، موسی لو، و.، (۱۳۹۰). حل مساله زمانبندی جریان کارگاهی ترکیبی با ماشین‌های موازی غیر مرتبط، زمان‌های راه اندازی وابسته به توالی و محدودیت ظرفیت انبارهای میانی. ششمین کنفرانس ملی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

[۳] تقدسی، س.، خوش الحان، ف.، (۱۳۸۹). مروری بر مقالات و تحقیقات در زمینه زمانبندی کارگاه گردش کاری چند هدفه. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۳ (۲۱)، ۱۴-۲۲.

[۱۳] فتاحی، پ.، دانش‌آموز، ف.، (۱۳۹۵). ارایه مدلی برای زمانبندی خط تولید کارگاهی با در نظر گرفتن جریان محموله همراه با یک مرحله مونتاژ موازی. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۳ (۳)، ۵۳-۷۳.

[۱۴] نعمتی، خ.، رفاهی شیخانی، ا.ح.، کرد رستمی، س.، (۱۳۹۵). بهینه‌سازی زمان‌بندی الگوریتم‌های موازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۳ (۲)، ۳۵-۵۲.

[۱۶] رضائیان، ج.، مهدوی، ا.، نیکزاد، ف.، (۱۳۹۲). زمانبندی محصولات چند قطعه ای در یک سیستم جریان کارگاهی ترکیبی دو مرحله‌ای نوع مونتاژ. دهمین کنفرانس ملی مهندسی صنایع، دانشگاه تهران.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]

[۱۸] بهشتی‌نیا، م. ع.، حسنی بیدگلی، م.، (۱۳۹۵). ترکیبی جدید از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک وشبیه‌سازی تبرید برای حل مساله زمانبندی کارگاهی انعطاف پذیر. مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۳ (۴)، ۲۱-۳۷.

[۱۹] فتاحی، پ.، (۱۳۸۸). الگوریتم‌های فراابتکاری، همدان، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا.

[4] Gupta, J. N. D., (1988). Two-stage hybrid flow shop scheduling problem. Journal of the Operational Research Society, 39 (4), 359–364.

[5] Riane, F., Artiba, A., Elmaghraby, S. E., (2002). Sequencing a hybrid two-stage flowshop with dedicated machines. International Journal of Production Research, 40 (17),4353–4380.

[6] Yang, J., (2010). A new complexity proof for two-stage hybrid flow shop scheduling problem with dedicated machines. International Journal of Production Research, 48(5),1531-1538.

[7] Linn, R., Zhang, W., (1999). HYBRID FLOW SHOP SCHEDULING: A Survey .Computers & Industrial Engineering, 37, 57-61.

[8] Wang, W., (2011). Review on Hybrid Flow Shop Scheduling. International Conference of Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences.

[9] Ruiz, R., VázquezRodríguez, J. A., (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. European Journal of Operational Research, 205(1),1-18.

[10] Ribas, I., Leisten, R., Framinan, J. M., (2010). Review and classification of hybrid flowshop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. Computers & Operations Research, 37,1439–1454.

[11] Choong, F., Phon-Amnuaisuk, S., Alias, M. Y., (2011). Metaheuristic Methods in Hybrid flow-shop scheduling problem. Expert Systems with Applications, 38,10787-10793.

[12] Herrmann, J. W., Lee, C. Y., (1992). Three-machine look-ahead scheduling problems. Research Report, Department of Industrial Engineering, University of Florida, 92–93.

[15] Wang, S., Liu, M., (2013). A heuristic method for two-stage hybrid flowshop with dedicated machines. Computers & operations research, 40, 438-450.

[17] Yang, J., (2015). Minimizing total completion time in a two-stage hybrid flow shop with dedicated machines at the first stage. Computers & Operations Research, 58, 1–8.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-05-13]

[DOR: 20.1001.1.22517286.2017.14.2.6.3]