برنامه‌ریزی ترکیبی توالی قطعات و تعویض ابزار بر اساس قابلیت اطمینان ابزار به کمک الگوریتم‌های تکاملی

فرهاد کلاهان[i]؛ احمد شریفی نیا[ii]؛

چکیده

در این تحقیق، مدل تعیین همزمان توالی بهینه قطعات و برنامه تعویض ابزارها، به منظور کمینه کردن هزینه‌های تولیدی ارائه و حل شده است. هزینه‌های در نظر گرفته شده شامل هزینه ماشینکاری، هزینه آماده‌سازی ابزار و قطعات، هزینه عدول از تحویل بموقع سفارش ها و نیز هزینه خرابی ابزار و قطعه ناشی از شکست احتمالی ابزار میباشند. قابلیت اطمینان ابزارها، ظرفیت محدود خشاب ابزار و زمان‌های آماده‌سازی (setup) و پردازش وابسته به توالی قطعات، از پارامترهای مهمی است که در برنامه‌ریزی همزمان ابزارها و قطعات به آن توجه شده است. با توجه به اینکه مسائل توالی و زمانبندی، با زمان های آماده‌سازی وابسته به توالی، از نظر پیچیدگی جزء مسائل NP-hard به شمار می‌روند، مدل پیشنهادی در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های جستجوگر تبرید تدریجی و جستجوگر ممنوعه حل شده است. نتایج محاسباتی مبین کارآیی این الگوریتم‌ها در حل چنین مسائلی می‌باشد.

کلمات کلیدی

توالی قطعات، تعویض ابزار، قابلیت اطمینان، الگوریتم تبرید تدریجی ، جستجوگر ممنوعه

Combinatorial Part Sequencing and Tool Replacement Based Reliability byH euristic Algorithms

F. Kolahan; A. Sharifinya

ABSTRACT

In this paper, a multi-objective optimization problem in a single machine for simultaneous part sequencing and tool replacement schedule, with respect to tool reliability and sequence–dependent set up times, has been addressed. The main objectives include determining optimal part sequence, tool selection for operations, tool replacement schedule, and number of spares for each tool type, in such a way that total expected production cost is minimized. Considering the defective cost by using tool reliability instead of tool life, processing operations with tool alternatives and tool loading by considering the limited tool magazine capacity, are the main originalities of this research.

Since the problem under consideration is NP-hard, we propose a Simulated Annealing and Tabu Search heuristic algorithms to, simultaneously, provide part sequencing, tool replacement intervals and number of spare tools required. The proposed algorithms are examined and the results are compared by solving a real-sized example problem. The computational results demonstrate the effectiveness of these methods towards solving large-sized, multi-objective planning problems.

KEYWORDS

Part sequence, Tool replacement, Reliability, Simulated annealing, Tabu search

[i] استادیار گروه مکانیک؛ دانشگاه فردوسی مشهد: kolahan@um.ac.ir

[ii] دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک؛ دانشگاه فردوسی مشهد

۱- مقدمه

مراکز ماشینکاری اتومات در سال‌های اخیر به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. رواج این گونه مراکز بیشتر ناشی از انعطاف‌پذیری و کارآیی آنها در انجام طیف وسیعی از عملیات بر روی قطعات مختلف است. با این حال، یک مرکز ماشینکاری اتومات به سرمایه‌گذاری زیادی نیاز دارد و تنها هنگامی می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد که به صورت مؤثری بکار گرفته شود. برای اطمینان از بازگشت سرمایه، به قابلیت اطمینان بالایی در این سیستم‌ها نیاز است. در این میان، برنامه‌ریزی برای تولید از قبیل توالی قطعات و جایگزینی ابزار تأثیرات مستقیمی روی عملکرد سیستم دارد[۱].

به طور کلی، منظور از برنامه‌ریزی تولید، تعیین بهینه نوع، تعداد، توالی و زمان های پردازش محصولات با توجه به منابع مورد نیاز و تعهدات تولید است. این امر معمولاً به منظور کاهش هزینه‌های تولید و هزینه‌های عدول از تحویل بموقع (Just-in-Time) سفارش ها صورت می‌گیرد[۲]. به عبارت دیگر، تعیین برنامه‌های تولید (شامل، تعداد و نوع محصولات، زمان تکمیل آنها، تجهیزات مورد استفاده و غیره) بر اساس هزینه‌ها، تقاضاها و امکانات موجود، از اهداف مورد نظر در برنامه‌ریزی تولید می‌باشد.

در مسائل برنامه‌ریزی تولید و زمانبندی قطعات معیارهای عملکرد مختلفی وجود دارد که پژوهشگران یکی یا ترکیبی از آنها را به عنوان تابع هدف در نظر گرفته‌اند. از آن جمله می‌توان به زمان‌های تکمیل[۱] [۳]، گستره کلی زمان تولید[۲] [٤]، تعداد کارهای دارای تأخیر[٥]، حداکثر دیرکرد یا زودکرد[۶]، تعداد تعویض ابزار[۷] اشاره کرد. فرضیات و ملاحظات گوناگونی همچون نوع زمانهای آماده‌سازی، ملاحظات مربوط به تحویل بموقع، عمر ابزار و تعداد یدکی ابزار وجود دارد که از آنها در برنامه‌ریزی استفاده شده است.

در این میان، دو مقوله زمانبندی قطعات و مدیریت ابزارها در سیستم تولید از اهمیت بالایی برخوردار است که تأثیرات مشخصی روی هزینه تولید کل دارد. اگر چه مقالات متعددی در این خصوص منتشر شده است؛ اما در نظر گرفتن این مسائل به طور همزمان کمتر صورت گرفته است. این در حالی است که در بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه زمانبندی ماشین، معمولاً فرض می‌شود که عمر ابزار یک مقدار قطعی است و ابزار همواره برای انجام عملیات در این مدت، در دسترس و کاملاً قابل اعتماد می‌باشد [۹]. این فرضیات می‌تواند کارآمدی بسیاری از نتایج به دست آمده در این زمینه را به علت عدم وجود ملاحظات مناسب در مورد اثر تدارک ابزار در زمان های آماده‌سازی زیر سؤال ببرد [۸].

به علاوه، مطالعه در زمینه سیاست‌های ابزاردهی با این فرض انجام شده است که توالی کارها ثابت و از قبل در مورد آنها تصمیم‌گیری شده است. در حالی که تصمیم‌گیری در مورد توالی کارها و تدارک ابزار به صورت دوطرفه بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، اینکه ابزار برای عملیات بعدی تعویض شود یا خیر، به این بستگی دارد که چه نوع عملیاتی برای مرحله بعد در برنامه زمانبندی وجود داشته باشد. اگر عمر باقیمانده ابزار بیشتر از زمان پردازش عملیات بعدی باشد، ممکن است به تعویض ابزار نیازی نباشد، در غیر این صورت ابزار بایستی تعویض شود.

با این وجود در این تحقیقات، عمر مفید ابزار، به عنوان یک پارامتر مهم در مدیریت ابزار، غالبا کمیتی قطعی و از پیش تعیین شده در نظر گرفته شده است؛ ولی در واقع، عمر ابزار ماهیتی تصادفی و احتمالی دارد. به عبارت دیگر، یک ابزار در هر زمانی در حین کار ممکن است خراب شود و احتمال خرابی آن، با افزایش زمان کارکرد، افزایش می‌یابد که این امر، استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان را به منظور ارزیابی وضعیت ابزارها در فرآیندهای ماشینکاری توجیه می‌کند. بنابراین یکی از اهداف مهم این مقاله، منظور کردن قابلیت اطمینان به عنوان یکی از معیارهای عملکردی در تدوین برنامه ریزی تولید است؛ به عبارت دیگر استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان در برنامه تعویض ابزار را می‌توان به عنوان یکی از اصلی ترین وجوه تمایز این مقاله دانست.

مدل‌های زمانبندی قطعات همراه با ملاحظات مربوط به ابزار با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی، جزء مسائل NP-Hard به شمار می‌روند[۶]. ماهیت پیچیده این مدل‌ها و بزرگی مسائل واقعی در صنعت باعث شده است روش‌های حل استاندارد عموماً از کارآیی و سرعت عمل لازم برای حل این گونه مسائل برخوردار نباشند. امروزه، با توسعه امکانات محاسباتی و کامپیوتری، روش‌های تکاملی بهینه سازی از قبیل جستجوگر ممنوعه، الگوریتم ژنتیک و تبرید تدریجی کاربرد وسیعی در حل مسایل پیچیده یافته‌اند. اصول کار این الگوریتم‌ها ایجاد و ارزیابی مرحله‌ای تعداد محدودی از جواب‌های قابل قبول، برای رسیدن به جواب بهینه در زمان‌های قابل قبول است.

با توجه به آنچه اشاره شد، در این تحقیق، مدل تعیین همزمان توالی قطعات و برنامه بهینه تعویض ابزارها با ملاحظه قابلیت اطمینان ابزارها به منظور کمینه کردن مجموع هزینه‌های تولیدی در یک سیستم تولید اتومات ارائه و بررسی شده است. در این مساله از الگوریتم‌های جستجوگر تبرید تدریجی

(Simulated Annealing- SA) و جستجوگر ممنوعه (Tabu Search- TS) به منظور حل مدل های برنامه ریزی تولید استفاده شده و نقاط ضعف و قوت آنها در حل این گونه مسائل تحلیل و ارزیابی شده است. الگوریتم‌های پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که قادر خواهند بود به طور همزمان توالی کارها و زمان‌های تعویض ابزار را تعیین کنند.

بنابراین اهداف کلی مورد نظر در این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱. یکپارچه کردن چندین معیار مهم برنامه‌ریزی به منظور اجتناب از تصمیمات عملیاتی غیربهینه یا نا سازگار
۲. طراحی و ارائه مدل ریاضی جامع برنامه‌ریزی، مبتنی بر قابلیت اطمینان ابزار، برای یک سلول تولید اتومات
۳. بسط و انطباق روش های بهینه سازی کارا و مؤثر برای حل مدل پیشنهادی در زمان های قابل قبول محاسباتی
۴. تحلیل و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر عملکرد روش های حل پیشنهادی و بررسی نقاط ضعف و قوت آنها در مسائل برنامه‌ریزی تولید
۵. حل مثال با اندازه واقعی برای صحه‌گذاری مدل ارائه شده و نمایش قابلیت های روش های حل پیشنهادی

در ادامه، ابتدا ساختار و ویژگی‌های سیستم تولیدی به همراه اهداف مورد نظر تشریح می‌شود، در بخش بعد، مدل ریاضی مساله ارائه شده، سپس الگوریتم‌های به کار گرفته شده و چگونگی عملکرد آنها به صورت خلاصه بیان می‌شود. در انتها نیز یک مثال عددی از مساله تشریح شده ارائه و نتایج محاسباتی آن بحث می‌شود.

۲- تعریف مساله

سیستم مورد نظر شامل یک سلول تولیدی انعطاف‌پذیر با قابلیت انجام پروسه‌های ماشینکاری مختلف است که یک خشاب ابزار با ظرفیت محدود و تعویض کننده ابزار اتومات دارد. در هر دوره برنامه‌ریزی، تعدادی قطعه می بایست بر روی سلول مزبور تولید شوند. تمام عملیات تولیدی این قطعات به وسیله این سلول قابل انجام است. هر قطعه به چندین پروسه تولیدی نیاز دارد که مدت زمان انجام آنها معین است. با این حال، زمان های آماده‌سازی (باز و بست و تنظیم ماشین و ....) بین قطعات وابسته به توالی[۳] آنها در فرآیند تولید می‌باشد. این بدین معنی است که بر طبق موقعیت قطعه در نوبت تولید، زمان‌های آماده‌سازی و تعویض آن با قطعه قبلی متغیر خواهند بود. همچنین در راستای تفکر تولید بموقع، هر قطعه می بایست در موعد خاصی تولید و تحویل شود. هرگونه عدول از این موعد موجب تحمیل جریمه دیرکرد یا زودکرد می‌گردد. جریمه عدول از تحویل بموقع، بر حسب زمان، برای هر قطعه به طور جداگانه محاسبه و منظور می‌شود.

هر پروسه به وسیله یک ابزار انجام می شود، اگر چه برخی از ابزارها قادر به انجام چندین عملیات تولیدی می‌باشند. با توجه به خصوصیت این ابزارها، در پاره‌ای از شرایط (همچون عدم دسترسی به ابزار مورد نیاز، کمبود تعداد یدکی از یک نوع ابزار خاص، ملاحظات مربوط به هزینه ابزارها و ...) و با توجه به منابع و محدودیت‌های موجود، می‌توان از میان ابزارهای در دسترس برای انجام یک پروسه استفاده کرد. بنا به نوع عملیات ماشینکاری و ابزار مورد استفاده، زمان و هزینه ماشینکاری با ابزارهای مختلف متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال، با توجه به جدول (۱)، تعداد ۵ پروسه ماشینکاری بایستی به وسیله ۳ نوع ابزار مختلف انجام شود. در برنامه تولید، برای انجام اولین پروسه یکی از دو ابزار I و II اختصاص داده شده است، پروسه دوم تنها با ابزار نوع I قابل انجام است در حالی که پروسه چهارم را می‌توان با هر یک از ابزارهای I و II و III به اتمام رساند.

جدول(۱): آلترناتیو ابزارهای قابل استفاده برای یک قطعه نمونه

پروسه۵	پروسه۴	پروسه۳	پروسه۲	پروسه۱
II	III	I	I	II
--	II	III	--	I
--	I	--	--	--

همچنین با توجه به اینکه ابزارها در حین ماشینکاری مستهلک می‌شوند، با افزایش زمان ماشینکاری امکان شکست و خرابی ابزار در حین کار افزایش می‌یابد. شکست ابزار در حین کار عموما باعث خرابی قطعه نیز می‌شود؛ لذا استفاده از ابزار مستهلک موجب افزایش ریسک (و هزینه) خرابی در حین کار خواهد شد. از طرفی تعویض ابزار مستهلک با ابزار جدید، اگرچه ریسک خرابی در حین کار را کاهش می دهد، مستلزم صرف هزینه ابزار جدید است. بنابراین تصمیم‌گیری مناسبی، در خصوص برنامه زمانبندی تعویض ابزارهای مستهلک با ابزارهای جدید و تعداد یدکی‌های مورد نیاز، می‌بایست صورت گیرد. همچنین برای عملیاتی که با چند نوع ابزار مختلف قابل انجام می‌باشند، انتخاب ابزار می‌بایست با توجه قابلیت اطمینان و قیمت ابزارهای موجود صورت گیرد. در نظر گرفتن هزینه ناشی از ریسک خرابی در حین کار در راستای استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان (به جای عمر مفید ابزار) در ارزیابی وضعیت ابزار است.

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، در سیستم تولیدی مورد نظر فرض شده است که ظرفیت خشاب محدود است. اگر ظرفیت خشاب ابزار کمتر از تعداد ابزارهای لازم برای

ماشینکاری همه قطعات باشد، می‌بایست تعدادی از ابزارهای خشاب را با ابزارهای مورد نیاز، که از انبار ابزار گرفته می‌شوند، جایگزین کرد. برای چنین حالاتی، در ادبیات موضوع سیاست های مختلف تعویض ابزار پیشنهاد شده است. در این میان جایگزینی ابزارها بر طبق سیاست "نگهداری ابزاری؛ که زودتر مورد نیاز است،"[۴] کاربرد بیشتری در تحقیقات جاری دارد. این روش را اولین بار Tang and Denardo [۱۰] ارائه کرد و بعد از آن، محققان دیگر آن را به صورت مؤثرتری بسط دادند که مورد استفاده قرار گرفته است[۱۱]. در این تحقیق ابزاردهی دستگاه بر مبنای این سیاست انجام می‌شود. در استراتژی KTNS، خشاب دستگاه ابتدا از ابزارهایی که زودتر عمل پردازش را انجام می‌دهند، پر می‌شود. در طی عملیات ماشینکاری اگر ابزار مورد نیاز در خشاب موجود نباشد، ابزاری که دیرتر از سایرین به کار گرفته خواهد شد، از خشاب برداشته شده و ابزار لازم جایگزین آن می‌شود. ذکر این نکته لازم است که انتقال و جایگزینی ابزار از انبار به خشاب دستگاه، مستلزم پرداخت هزینه انتقال و احتمالا راه‌اندازی مجدد ماشین خواهد بود.

با توجه به آنچه اشاره شد، در این مدل بسیاری از مشخصه‌های مهم یک سیستم تولید اتومات به طور همزمان در نظر گرفته شده است، اگر چه پیاده سازی مدل پیشنهادی در سیستم‌های واقعی نیازمند انطباق مدل بر سیستم واقعی و وجود داده‌های مورد نیاز است. ویژگی‌های در نظر گرفته شده عبارتند از: توالی قطعات همراه با زمانبندی تعویض ابزار، بکار بردن قابلیت‌اطمینان ابزار به جای پارامتر عمر ابزار، در نظر گرفتن هزینه ریسک خرابی ابزار و قطعه در حین کار، استفاده از آلترناتیوهای ابزار برای پردازش قطعات و نیز بررسی جایگزینی ابزارها بر اساس سیاست KTNS با توجه به ظرفیت خشاب ابزار. اهداف اصلی مورد نظر در مدل برنامه‌ریزی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱. تعیین بهترین توالی از قطعات برای تولید با در نظر گرفتن نوع عملیات هر قطعه، زمان‌های آماده‌سازی بین قطعات و زمانهای تحویل آنها؛

۲. تعیین برنامه زمانبندی تعویض ابزارها با توجه به قابلیت اطمینان، توالی قطعات و نیز ظرفیت خشاب ابزار؛

۳. تعیین تعداد یدکی‌های مورد نیاز برای هر ابزار؛

موارد فوق به گونه‌ای تعیین می‌گردند تا مجموع هزینه‌های تولید کمینه شود. هزینه‌های تولیدی در این مدل، شامل هزینه‌های ماشینکاری، ابزارهای یدکی، آماده‌سازی یا تعویض ابزار، آماده‌سازی و تعویض قطعات، احتمال خرابی ابزار و قطعه در حین کار و هزینه عدول از تحویل به موقع سفارش‌ها (دیرکرد و زودکرد) است.

۳- مدل ریاضی ارائه شده

در این بخش، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، که در برگیرنده ویژگی های مسئله و ارضا کننده اهداف و قیود آن است ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی از نوع مدل های چند هدفه است، که در آن معادله هدف از مجموع وزنی مؤلفه‌های مختلف تشکیل می‌شود. وزن ها در مدل های چند هدفه نقش همسنگ‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری و همچنین تعیین اهمیت نسبی اهداف (در مقایسه با یکدیگر) را دارند.

علائم و اختصارات

j, h, k	اندیس شماره قطعه $j, k, h=1,..., J$
i	اندیس ابزار برای پردازش قطعه j $i=1,..., I_j$
I_j	مجموع ابزار مورد نیاز برای ماشینکاری قطعه j
l	اندیس عملیات از قطعه j $l=1,..., L_j$
P_j	جریمه دیرکرد قطعه jدر واحد زمان
P_j^*	جریمه زودکرد قطعه jدر واحد زمان
C^m	هزینه ماشینکاری در واحد زمان
C^s	هزینه آماده‌سازی ابزار و قطعه در واحد زمان
T_j	مدت زمان دیرکرد قطعه j
E_j	مدت زمان زودکرد قطعه j
t_{kj}^s	زمان آماده‌سازی برای قطعه jاگر بلافاصله بعد از قطعه k ماشینکاری شود
t_i^*	زمان تعویض ابزار i (اگر ابزار مورد نظر در خشاب وجود داشته باشد)
t_i^{**}	زمان انتقال ابزار i از انبار ابزار به دستگاه (اگر ابزار مورد نظر درون خشاب وجود نداشته باشد)
τ_{ijl}	زمان ماشینکاری عملیات l قطعه jبه وسیله ابزار i
C_i	هزینه ابزار i
C_j^*	قیمت (ارزش) قطعه j
R_i^{min}	حداقل قابلیت اطمینان لازم برای ابزار i
R_{ijl}	قابلیت اطمینان ابزار i در پایان عملیات l قطعه j اگر ابزار در شروع ماشینکاری قطعه jتعویض شده باشد
r_{ijl}	قابلیت اطمینان ابزار i در پایان عملیات l قطعه j اگر ابزار در شروع ماشینکاری قطعه jتعویض نشده باشد

با توجه به نمادهای فوق، مدل ریاضی تعیین همزمان توالی قطعات و تعویض ابزارها به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$\text{Min } Z = \left\{ \sum_{j=1}^{J} \sum_{l=1}^{L_j} \sum_{i \in I_j} \min\left(zr_{ijl}, zR_{ijl}\right) + \sum_{j=1}^{J} \left[w_j C^s t^s_{kj} \ (\forall k \notin j) \right] + \sum_{i \in I_j} \left[C^s \left(y_i t^*_{i-1,i} + (1-y_i) t^{**}_{i-1,i} \right) \ (\forall j) \right] + \sum_{j=1}^{J} \left[abs\left(x_j P_j T_j + (1-x_j) P^*_j E_j \right) \right] \right\} \quad (1)$$

محدود به:

$$\left[\sum_{k=1}^{j} \sum_{l=1}^{L_k} \sum_{i \in I_k} \left(\tau_{ikl} + y_i t^*_{i-1,i} + (1-y_i)\, t^{**}_{i-1,i} \right) + t^s_{hk} \right] - d_j \le T_j \quad (2)$$

$$d_j - \left[\sum_{k=1}^{j} \sum_{l=1}^{L_k} \sum_{i \in I_k} \left(\tau_{ikl} + y_i t^*_{i-1,i} + (1-y_i) t^{**}_{i-1,i} \right) + t^s_{hk} \right] \le E_j \quad (3)$$

$$E_j \ge 0 \quad (4)$$

$$T_j \ge 0 \quad (5)$$

$$R_{ijl} \left(\text{OR } r_{ijl}\right) \ge R_i^{\min} \quad (6)$$

که در آن:

$$zr_{ijl} = \left(C_i + C^*_j \right)\left(1 - r_{ijl}\right) + \left(C^m \tau_{ijl} r_{ijl} \right) \quad (7)$$

$$zR_{ijl} = \left(C_i + C^*_j \right)\left(1 - R_{ijl}\right) + \left(C^m \tau_{ijl} R_{ijl} \right) + C_i \quad (8)$$

$$x_j = \begin{cases} ۱ & \text{اگر قطعه دارای دیرکرد باشد} \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (9)$$

$$w_j = \begin{cases} ۱ & \text{اگر قطعه } j \text{ بعد از قطعه } k \text{ ماشینکاری شود} \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (10)$$

$$y_i = \begin{cases} ۱ & \text{اگر ابزار مورد نیاز در خشاب موجود نباشد} \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (11)$$

در این مدل، تابع هدف شامل سه مؤلفه کلی هزینه است که برای هر توالی مشخص، مجموع هزینه‌ها را محاسبه می کند. اولین جمله تابع هدف، $\min\left(zr_{ijl}, zR_{ijl}\right)$، به هزینه‌های ماشینکاری و ریسک خرابی ابزار و قطعه در حین ماشینکاری مربوط است که ماهیتی احتمالی دارد و به قابلیت اطمینان ابزار وابسته است. سایر جملات شامل هزینه‌های آماده‌سازی ابزار و قطعات و نیز هزینه عدول از تحویل بموقع می‌باشند که از نوع هزینه‌های قطعی تولید هستند.

تصمیم‌گیری در مورد تعویض یا نگهداری ابزار مستعمل در ابتدای شروع هر عملیات بر اساس هزینه‌های محاسبه شده به وسیله روابط (۷) و (۸) صورت می‌گیرد. این روابط مجموع هزینه‌های ماشینکاری و احتمال خرابی ابزار را در هنگام استفاده از ابزار مستعمل یا ابزار نو ارائه می‌دهند. هزینه ماشینکاری بر اساس احتمال اتمام موفقیت آمیز عملیات ماشینکاری (r_{ijl}) محاسبه شده و با هزینه احتمال خرابی ابزار در حین کار ($1-r_{ijl}$) جمع می‌شود. اگر احتمال خرابی ابزار صفر باشد، به عبارت دیگر هیچگونه خرابی در ابزار رخ ندهد، تنها هزینه‌ای که احتساب می‌شود، هزینه ماشینکاری خواهد بود.

از آنجا که همواره قابلیت اطمینان یک ابزار مستعمل از یک ابزار کاملاً نو کمتر است، $r_i < R_i$، استفاده از ابزار کارکرده هزینه خرابی در حین کار بزرگ تری را باعث می‌شود. در مقابل اگر ابزار تعویض شود (رابطه ۸)، هزینه احتمال خرابی در حین کار کاهش می یابد؛ ولی هزینه قطعی تعویض ابزار به مجموع هزینه‌ها اضافه خواهد شد. یکی دیگر از پارامترهای تصمیم‌گیری در مورد جایگزینی یا عدم جایگزینی یک ابزار، (رابطه ۶)، حداقل قابلیت اطمینان هر ابزار است. در ابتدای هر عملیات اگر قابلیت اطمینان ابزار مورد نظر کمتر از حد لازم باشد، ابزار مزبور می بایست با ابزار نو جایگزین شود.

حل این مدل شامل تصمیم‌گیری در مورد دو مساله مؤثر بر یکدیگر می‌باشد: ۱) توالی قطعات و ۲) جایگزینی ابزارها. مساله جایگزینی ابزار؛ که به صورت یک لایه داخلی در مدل قرار گرفته است، به توالی قطعات در نوبت تولید وابسته است. تصمیم‌گیری در مورد توالی قطعات؛ که به عنوان یک لایه خارجی در مدل منظور شده است، عمدتا با زمانهای آماده‌سازی، وابسته به توالی و موعدهای تحویل قطعات تعیین می‌شود.

هزینه‌های عدول از تحویل بموقع سفارش ها با توجه به مقدار دیرکرد یا زودکرد هر قطعه و براساس زمان پردازش قطعه مزبور و زمان‌های تکمیل قطعات قبلی (روابط ۲ و ۳) محاسبه می شود. این دو معادله به همراه روابط (۴) و (۵) این مهم را تضمین می‌کنند که برای هر قطعه، دیرکرد و زودکرد با هم به وقوع نخواهند پیوست.

٤- روش حل

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید، همچون مسائل توالی و زمانبندی سیستم های تولیدی، به طور ذاتی بسیار پیچیده و جزء مسائل NP-hard به شمار می‌روند؛ بنابراین حل آنها به کمک روش‌های بهینه‌سازی استاندارد

بسیار مشکل است و به زمان محاسباتی زیادی نیازمند است. با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها و مسائل بهینه‌سازی آنها از یک طرف و پیشرفت کامپیوتر و قابلیت‌های محاسباتی از طرف دیگر، امروزه استفاده از جستجوگرهای هوشمند کاملاً متداول شده است.

الگوریتم‌های جستجوگر همسایگی همچون SA و TS به طور گسترده‌ای برای حل این چنین مسائلی بکار می‌روند. اصول کار این الگوریتم‌ها ایجاد و ارزیابی مرحله‌ای تعداد محدودی جواب‌های (همسایگی) قابل قبول، برای رسیدن به جواب بهینه در زمان‌های قابل قبول می‌باشد.

٤-١- الگوریتم جستجوگر SA

روش جستجوگر " *تبرید تدریجی*" SA یک جستجوگر همسایگی است که در بهینه‌سازی مسائل گسسته کاربرد دارد[٤] [١٢]. طبیعت تصمیم‌گیری این الگوریتم به این صورت است که برای هر حرکت، یک همسایگی جدید به صورت تصادفی تولید و ارزیابی می‌شود. حرکت به این جواب در هر یک از دو وضعیت زیر انجام خواهد یافت: ١) جواب جدید از جواب فعلی بهتر باشد و ٢) مقدار تابع احتمال حرکت[٥] از یک عدد تصادفی از دامنه [0,1] بزرگ‌تر باشد؛ در غیر این صورت جستجوگر جواب جدیدی را تولید و ارزیابی خواهد کرد. این حرکت گام‌به‌گام تا ارضای شرط توقف الگوریتم (تعداد تکرارها، زمان محاسبات، و ....) ادامه می‌یابد.

مقدار تابع احتمال حرکت در هر بار از رابطه $P_r = \exp(-\Delta Z / c_k)$ محاسبه می‌شود. در این رابطه ΔZ اختلاف مقدار تابع هدف بین جواب فعلی و جواب جدید است. اندیس k تعداد تکرارها، c_k پارامتر کنترلی موسوم به دما است. معمولاً در ابتدای جستجو، مقدار دمای اولیه، c_o، بزرگ انتخاب می‌شود، به طوری که الگوریتم شانس بیشتری برای حرکت به جواب‌های غیر بهبود دهنده داشته باشد؛ اما با افزایش تعداد این حرکت ها، این دما طبق یک تابع زمانبندی سرمایش[٦] به تدریج کم می‌شود ($c_{k+1} = \alpha c_k$)؛ در نتیجه احتمال انتخاب جواب‌های بدتر با افزایش تعداد حرکت‌ها کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، در ابتدای جستجو، نقش طبیعت تصادفی الگوریتم در پذیرش همسایگی جدید بیشتر از نقش طبیعت قطعی آن است. ولی با پیشرفت جستجو، حرکت‌ها غالبا بر اساس بهبود تابع هدف انجام شده و نقش طبیعت تصادفی الگوریتم در پذیرش جواب جدید کاهش می‌یابد.

٤-٢- الگوریتم جستجوگر TS

جستجوگر Tabu Search اولین بار در سال ١٩٨۶ برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شد[١٣]. روند جستجو به این ترتیب است که جستجو گر از یک جواب قابل قبول مسأله شروع به حرکت می‌کند و پس از تشکیل و ارزیابی جواب های قابل قبول در همسایگی جواب فعلی به بهترین آنها حرکت می‌کند. این حرکت قدم به قدم جستجوگر را به سمت جواب بهینه یا نزدیک به بهینه هدایت می‌کند. مشخصه بارز الگوریتم TS که آن را از دیگر جستجوگرها متمایز می‌کند، توانایی آن در گریز از بهینه‌های محلی است. این توانایی از دو ویژگی ناشی می‌شود؛ اول اینکه در هر حرکت TS بهترین جواب را در همسایگی جواب جاری می‌پذیرد؛ چنین جوابی ممکن است بهتر و یا بدتر از جواب فعلی باشد. همچنین این جستجوگر، مجهز به یک حافظه کوتاه مدت است، که به لیست تابو[٧] معروف است. این لیست شامل تعدادی از حرکت های اخیر جستجوگر است که اجازه رجوع به آنها در حرکت فعلی وجود ندارد. این دنباله از جوابهای ممنوعه به همراه قابلیت قبول جواب‌های بدتر، جستجوگر را تا حد زیادی از دور زدن و حبس شدن در بهینه‌های محلی حفاظت می‌کند.

۵- ارائه مثال و نتایج محاسباتی

در این بخش، یک مثال عددی به منظور درک بهتر مدل و تشریح عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی ارائه شده است و نتایج محاسباتی آن بحث می‌شود. یک دستگاه انعطاف‌پذیر را در نظر بگیرید که تعداد ٣٠ قطعه بایستی بر روی آن پردازش شوند. برای انجام این پروسه‌ها، ١۵ نوع ابزار مختلف لازم است. این در حالی است که خشاب دستگاه تنها ظرفیت نگهداری ١٠ ابزار را دارد؛ بنابراین بایستی خشاب را در هر مرحله به گونه‌ای بارگذاری کرد تا تعداد انتقال ابزار از خارج خشاب و در نتیجه تعداد راه‌اندازی مجدد دستگاه حداقل شود. قابلیت اطمینان لازم برای کلیه ابزارها ٩۵٪ در نظر گرفته شده است. در تحقیقات جاری، از توابع مختلفی (نمایی، لگاریتمی، وایبال، و ....) برای ارزیابی قابلیت اطمینان ابزارها استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد تابع توزیع وایبال از جامعیت و انطباق خوبی در پیش بینی قابلیت اطمینان ابزارها و عملیات ماشینکاری برخوردار است [١۴]. بنابراین، در تحقیق حاضر از این تابع به منظور تعیین قابلیت اطمینان ابزارها استفاده می‌شود. بازه سایر اطلاعات مربوط به هزینه‌های مختلف و زمان‌های تحویل، به صورت زیر است:

موعد تحویل	:	دقیقه ۴٠ تا ٨٢٠
جریمه دیرکرد	:	(ساعت/هزینه) ٢/۵
جریمه زودکرد	:	(ساعت/هزینه) ١/۵

(دقیقه/هزینه) ۳ : هزینه ماشینکاری

(دقیقه/هزینه) ۲ : هزینه آماده‌سازی

۱۰۰ تا ۶۰۰ : هزینه قطعه خام

۱۵ تا ۲۰ : قیمت ابزار

این مساله با استفاده از الگوریتم‌های جستجوگر SA و TS برای مقادیر مختلف پارامترهای تنظیمی حل شد. بهترین پارامترهای به دست آمده برای این الگوریتم‌ها در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است. نتایج محاسباتی نیز بر مبنای این پارامترها ارائه شده‌اند:

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم SA در حل مسأله

دمای اولیه (C_0)	۸۰۰۰
ثابت کاهش دما (α)	۰/۹۹
مکانیزم انتخاب همسایگی	جابجایی دو به دو بصورت تصادفی
معیار توقف جستجو	رسیدن به زمان ۱۲۰۰ ثانیه

جدول (۳): پارامترهای الگوریتم TS در حل مسأله

اندازه لیست ممنوعه	۳۰
مکانیزم انتخاب همسایگی	جابجایی دو به دو
تعداد همسایگی‌های ارزیابی شده در هر حرکت جستجوگر	تمامی همسایگی‌ها
معیار توقف جستجو	رسیدن به زمان ۱۲۰۰ ثانیه

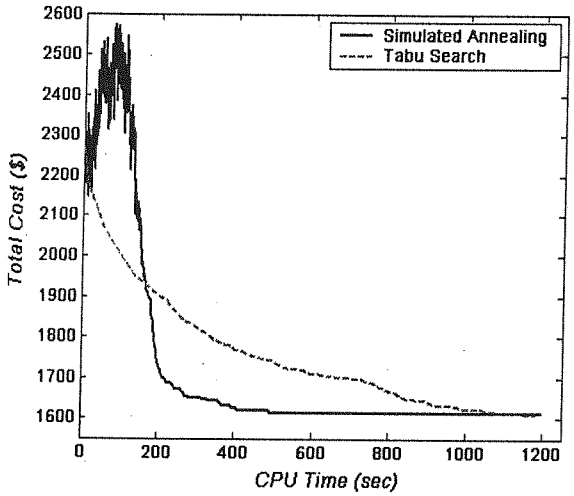
۵-۱- نتایج محاسباتی

برنامه الگوریتم‌های TS و SA در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و با یک کامپیوتر P1800 اجرا شده‌اند. نتایج محاسباتی بر اساس بهترین پارامترهای هر روش ارائه می‌شود. معیار توقف هر دو الگوریتم زمان محاسباتی آن و معادل ۱۲۰۰ ثانیه است.

جدول (۴): هزینه‌های بدست آمده از الگوریتم‌های SA و TS

	Simulated Annealing			Tabu Search		
هزینه ها	برنامه تولید اولیه	برنامه تولید نهایی	درصد بهبود	برنامه تولید اولیه	برنامه تولید نهایی	درصد بهبود
هزینه آماده سازی	۲۵۲	۲۲۲	۱۱/۹	۲۵۲	۲۰۵	۱۸/۶۵
عدول از تحویل به موقع	۲۹۷/۵	۲۰۳/۸	۳۱/۵	۲۹۷/۵	۲۲۷/۰۴	۲۳/۶۹
احتمال خرابی و ماشینکاری	۱۷۲۰/۲	۱۱۸۵/۸	۳۱/۰۷	۱۷۲۰/۲	۱۱۷۶/۶	۳۱/۶
هزینه کل	۲۲۶۹/۷	۱۶۱۱/۶۴	۲۸/۹۹	۲۲۶۹/۷	۱۶۰۸/۷	۲۹/۱۲
مجموع یدکی مورد نیاز از ابزارها	۲۱	۱۵	۲۸/۵۷	۲۱	۱۴	۳۳/۳۳
تعداد انتقال ابزار از انبار به خشاب	۲۱	۱۱	۴۷/۶	۲۱	۱۰	۵۲/۳
زمان همگرایی الگوریتم (ثانیه)	کمتر از ۶۰۰			بیشتر از ۱۲۰۰		

جزئیات و مجموع هزینه‌های مورد انتظار تولید در جدول (۴) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در طی مدت جستجو با الگوریتم SA، مجموع هزینه‌های تولید از حدود ۲۲۶۹/۷ واحد به ۱۶۱۱/۶ واحد کاهش یافته است که این مقدار مبین حدود ۲۹٪ بهبود در مجموع هزینه‌هاست. الگوریتم در طی زمانی کمتر از ۶۰۰ ثانیه همگرا می‌شود. الگوریتم TS نیز عملکردی مشابه داشته و در زمان ۱۲۰۰ ثانیه بهبود بیش از ۲۹٪ را باعث شده است. نمودارهای همگرایی الگوریتم های SA و TS در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): مقایسه عملکرد جستجوگرهای TS و SA

جزییات سایر پارامترهای بهبود یافته نیز در جدول (۴) نشان داده شده است. به عنوان مثال، تعداد دفعاتی که بایستی ابزار از انبار به خشاب دستگاه انتقال داده شود، در

برنامه اولیه تولید ۲۱ مرتبه است که این مقدار در برنامه نهایی با الگوریتم TS به ۱۰ و در SA به ۱۱ مرتبه کاهش یافته است.

توالی قطعات و برنامه تعویض ابزار به دست آمده از الگوریتم جستجوگر TS در جدول (۵) ارائه شده است. اولین ستون از این جدول، توالی بهینه قطعات را نشان می‌دهد. در سطر مربوط به هر قطعه، تخصیص ابزار به پروسه‌های ماشینکاری و نیز زمان مناسب تعویض ابزار، مشخص شده است.

جدول (۵): توالی قطعات و برنامه تعویض ابزارها به دست آمده از الگوریتم TS

	ابزار														
قطعه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
۲۹	0	--	--	--	--	--	--	--	0	--	--	0	--	--	0
۱	--	0	--	--	--	--	--	--	0	--	0	--	--	0	--
۳۰	--	--	--	--	--	0	--	--	--	--	0	--	0	--	--
۵	--	--	--	0	--	--	0	0	--	--	--	--	--	--	--
۲۷	--	--	0	--	--	--	--	--	--	0	0	--	--	--	--
۶	0	0	0	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
۲	--	--	0	0	--	0	--	--	--	0	--	--	--	--	--
۹	--	--	--	0	0	--	--	--	0	--	--	--	--	--	0
۱۸	--	--	--	--	--	--	0	--	--	--	--	0	0	--	--
۱۰	1	1	--	--	--	0	--	0	--	--	--	--	--	--	--
۱۱	--	--	1	0	0	--	--	--	--	--	--	0	--	--	--
۲۵	--	0	0	1	--	--	0	--	--	--	--	--	--	0	--
۱۳	--	0	--	--	0	--	0	--	--	--	--	--	--	--	--
۱۴	0	--	--	--	--	--	0	1	--	0	--	--	--	--	--
۱۵	0	--	--	0	--	--	1	--	--	--	--	--	--	--	--
۱۶	0	0	--	--	--	0	0	--	--	--	--	--	--	--	--
۱۷	0	--	0	--	1	--	--	--	--	--	1	--	--	--	--
۷	0	--	0	--	--	--	--	--	--	--	--	0	--	--	--
۸	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0	--	0	0	--	--
۲۰	1	--	--	--	0	--	0	0	--	--	0	--	--	--	--
۲۱	--	1	--	0	0	--	--	0	--	--	--	--	--	--	--
۴	0	0	--	--	--	--	0	--	--	--	--	--	0	0	--
۲۳	0	0	--	0	--	--	1	--	--	--	--	--	--	--	0
۲۴	0	--	--	--	--	--	--	1	--	--	0	--	--	--	--
۱۲	0	--	1	--	--	--	--	--	--	--	0	--	--	0	--
۱۹	0	--	--	--	0	--	--	--	0	--	0	--	--	--	0
۲۲	0	--	--	--	0	0	0	--	--	--	--	--	--	--	--
۲۸	--	0	--	--	0	--	0	0	--	--	--	--	--	--	--
۲۶	1	--	0	--	--	--	--	--	--	0	--	--	--	--	--
۳	0	--	0	--	--	--	--	--	--	--	0	--	--	0	--
تعداد یدکی	۳	۲	۲	۱	۱	۰	۲	۲	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰

"--" عدم تخصیص عملیات، "0" انجام عملیات بدون تعویض ابزار، "1" تعویض ابزار

در آخرین سطر از جدول، تعداد یدکی‌های مورد نیاز از هر ابزار آورده شده است. به عنوان مثال، برای ماشینکاری قطعه شماره ۱۱، به ابزارهای ۳، ۴، ۵ و ۱۲ نیاز است. این در حالی است که ابزار ۳ با توجه به اینکه در پردازش قطعات قبلی دچار فرسایش شده است، بایستی قبل از شروع ماشینکاری قطعه ۱۱ با یک ابزار جدید جایگزین شود.

یکی از نکاتی که در جدول تعویض ابزارها وجود دارد، عدم توازن در توالی تعویض ابزارهاست. به عنوان نمونه،

ابزار شماره ۱ پس از دو عملیات با یک ابزار جدید جایگزین می‌شود؛ در حالی که این ابزار جایگزین شده پس از انجام ۶ عملیات بعدی باید تعویض شود؛ بنابراین جایگزینی ابزار را نمی‌توان تنها بر اساس تعداد عملیات یا زمان ماشینکاری پیش بینی کرد. دلیل این امر این است که زمان جایگزینی ابزار وابسته به پارامترهای مختلفی از جمله زمان ماشینکاری، قیمت ابزار، ارزش قطعه و نرخ خرابی ابزار در هر پروسه ماشینکاری می‌باشد.

۵-۲- مقایسه عملکرد TS و SA

الگوریتم SA در مدت زمان کمتر از۶۰۰ ثانیه به سمت جواب مطلوب همگرا می‌شود که تقریباً برابر با نصف زمان جستجو با الگوریتم TS است. علت اختلاف سرعت همگرایی الگوریتم‌های SA و TS را می‌توان بر اساس مکانیزم حرکت آنها در فضای جواب های قابل قبول تفسیر کرد. الگوریتم SA، در هر مرحله جستجو تنها یکی از جواب های همسایه جواب فعلی را بررسی می کند و چنانچه شرایط پذیرش این جواب برقرار باشد جستجوگر به آن حرکت می‌کند.

در مقابل، الگوریتم TS، در هر مرحله از جستجو تمام (یا تعدادی از) همسایه‌های جواب فعلی را بررسی و به بهترینِ آنها حرکت می‌کند. این روند قانونمند و آرامِ جستجو، همراه با پوشش فضای بیشتری از مجموعه جواب های موجه، باعث می‌شود که زمان رسیدن به جواب بهینه (یا نزدیک به بهینه) با الگوریتم TS طولانی‌تر از SA باشد. در عین حال، یکی از نقاط قوت الگوریتم TS، مجهز شدن آن به لیست ممنوعه است که مانع از بازگشت به جواب هایی می‌شود که قبلاً بررسی شده‌اند.

با توجه به نرخ همگرایی این دو الگوریتم (شکل ۳)، مشاهده می‌شود که الگوریتم SA از سرعت همگرایی بسیار بالایی برخوردار است و در مدت زمان کمتری نسبت به الگوریتم TS به سمت جواب نهایی همگرا می‌شود. این در حالی است که میزان بهبود جواب در دو الگوریتم، تا زمان ۱۲۰۰ ثانیه اختلاف چندانی با هم ندارد. اما با گذشت زمان، با توجه به ویژگی‌های الگوریتم TS، می‌توان انتظار داشت این الگوریتم مقادیر هزینه‌ها را تا سطح مطلوب تری بهبود دهد.

با توجه به آنچه اشاره شد، هر دو الگوریتم از سرعت و قابلیت بالایی برخوردار هستند؛ اما برای حل مسائل بزرگ و یا مواقعی که زمان محاسباتی اهمیت دارند (مانند برنامه-ریزی‌های روزانه و کوتاه مدت)، الگوریتم SA می‌تواند نسبت به الگوریتم TS ترجیح داده شود. در مقابل اگر کیفیت جواب به دست آمده در اولویت باشد (مانند طراحی محصول و برنامه‌ریزی‌های بلند مدت)، می‌توان از الگوریتم TS استفاده کرد.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

امروزه تنوع محصولات تولیدی و لزوم پاسخ سریع به نیاز بازار و مشتریان، باعث شده است که برنامه‌ریزی تولید در صنعت اهمیت خاصی پیدا کند. مطمئنا، عدم وجود برنامه تولید مدون و بهینه، باعث افزایش بی‌رویه هزینه ها و اتلافات در مراکز تولیدی خواهد شد.

در این تحقیق مدلی از برنامه‌ریزی تولید برای یک ماشین تولیدی انعطاف پذیر ارائه شد و با استفاده از روش‌های SA و TS حل گردید. اهداف اصلی مدل شامل تعیین همزمان توالی بهینه قطعات و تعداد ابزارهای یدکی به همراه برنامه زمانبندی تعویض ابزارها برای حداقل کردن تابع مجموع هزینه‌ها می‌باشد.

منظور کردن قابلیت اطمینان ابزارها، به صورت هزینه ریسک خرابی ناشی از شکست ابزار و بکارگیری آن در تعیین برنامه زمانبندی جایگزینی ابزارها، از نکات مهمی است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان، در بررسی وضعیت ابزار، ارائه دقیق‌تری از سیستم تولیدی به دست داده و موجب واقعی‌تر شدن مدل های برنامه ریزی می‌شود.

حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز تأثیر مستقیمی بر توالی تعویض ابزار دارد. بدیهی است با افزایش این مقدار(مثلا از ۹۵٪ بسمت ۱۰۰٪) ، کنترل ابزار سختگیرانه تر شده و ابزار میبایست در بازه‌های زمانی کوتاه تری تعویض شود.تا جایی که در صورت استفاده از معیار ۱۰۰٪، ابزارها می بایست قبل از هر عملیات با ابزار نو جایگزین شوند؛ بنابر این هر گونه تغییر در مقدار حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز، باعث تغییر در تصمیمات مربوط به تعویض ابزار خواهد شد.

نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم‌های پیشنهادی، به عنوان دو روش بهینه‌سازی، از قابلیت بالایی در حل سریع و مطلوب این گونه مسائل برخوردارند. در مقام مقایسه، الگوریتم SA دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتم TS می‌باشد در حالی که الگوریتم TS، با دارا بودن توانایی گریز از بهینه های محلی، از کیفیت جواب بهتری نسبت به الگوریتم SA برخوردار است. یکی از راهکارهای قابل بررسی، استفاده از قابلیت‌های این دو روش در قالب یک الگوریتم تلفیقی است. با تلفیق این دو روش جستجو و استفاده از نقاط قوت آنها، می‌توان الگوریتم‌های

جدیدی طراحی کرد که هم از سرعت بالایی برخوردار باشند و هم جواب‌هایی با کیفیت مطلوب ارائه کنند.

۷- مراجع

[۱] Mansour, A. G., Motavalli, S., "*A modeling technique for loading and scheduling problems in FMS*" Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 19 pp 455 2003

[۲] Jain, A. S, Meeran, S. "*Theory and application; Deterministic job-shop scheduling: past, present and future*" European journal of operational research , 113, pp 390-434, 1999

[۳] Sadfi, C., Penz, B., Rapine, C., "*An improved approximation algorithm for the single machine total completion time scheduling problem with availability constraints"* European Journal of Operational Research, 161, pp 3–10, 2005

[٤] Varadharajan, T.K., Chandrasekharan, R., "*A multi-objective simulated-annealing algorithm for scheduling in flowshops to minimize the makespan and total flowtime of jobs*" European Journal of Operational Research 167, pp 772–795, 2005

[٥] Teghem, J., Loukil, T., Tuyttens, D., "*Solving multi-objective production scheduling problems using metaheuristics*" European Journal of Operational Research 161, pp 42 61, 2005

[٦] Sourd, F., "*Earliness–tardiness scheduling with setup considerations*" Computers & Operations Research 32, pp 1849 1865 2005

[۷] Al-Fawzan, M.A., Al-Sultan, K.S., "*A tabu search based algorithm for minimizing the number of tool switches on a flexible machine*" Computers and Industrial Engineering, 44 pp 35 47 2002

[۸] Bard, J.F., "*A heuristic for minimizing the number of tool switches on a flexible machine*" IIE Transactions, 20 pp 382-391, 1988.

[۹] Kolahan, F. "*Modeling and analysis of integrated machine-level planning problems for automated manufacturing*" PhD thesis, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Ottawa, Canada, 1999.

[۱۰] Tang, C.S., Denardo, E.V., "*Models arising from a flexible manufacturing machine. Part I: Minimization of the number of tool switches*" European Journal of Operational Research, 36, pp 767-777, 1988

[۱۱] Hirvikorpi, M., Salonen, K., Knuutila, T. and Nevalainen, O. S., "*The general two-level storage management problem: A reconsideration of the KTNS-rule*" European Journal of Operational Research, 171, pp 189-207, 2006

[۱۲] Van Laarhoven, P. J. M., Aarts, E. H. L., *Simulated annealing: Theory and applications*, Kluwer Academic Publishers, 1998.

[۱۳] Glover, F., *Tabu search — Part I*, ORSA Journal of Computing, 1 (3), pp 190–206, 1989.

[۱٤] Ramalingam, S., Peng, Y., and Waston, J., " *Tool life distributions, Part 3: Mechanism of single injury tool failure and tool life distribution in interrupted cutting*" ASME, Journal of Engineering for Industry, 100, pp193-200, 1987

۸- زیرنویس ها

[1] Total completion time
[2] Makespan
[3] Sequence-dependent
[4] Keep Tools Need Soonest- KTNS
[5] Transition probability
[6] Cooling schedule