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

برنامه‌ریزی ترکیبي توالي قطعات و تعویض ابزار بر اساس قابلیت اطمینان ابزار به کمک الگوریتم‌هاي تکاملی

فرهاد کلاهان[i]; احمد شریفي نیا[ii];

چکیده

در این تحقیق، مدل تعیین همزمان توالي بهینه قطعات و برنامه تعویض ابزارها، به منظور کمینه کردن هزینه‌هاي تولیدي ارائه و حل شده است. هزینه‌هاي در نظر گرفته شده شامل هزینه ماشینکاري، هزینه آماده‌سازي ابزار و قطعات، هزینه عدول از تحویل بموقع سفارش ها و نیز هزینه خرابي ابزار و قطعه ناشي از شکست احتمالي ابزار میباشند. قابلیت اطمینان ابزارها، ظرفیت محدود خشاب ابزار و زمان‌هاي آماده‌سازي (setup) و پردازش وابسته به توالي قطعات، از پارامترهاي مهمي است که در برنامه‌ریزي همزمان ابزارها و قطعات به آن توجه شده است. با توجه به اینکه مسائل توالي و زمانبندي، با زمان هاي آماده‌سازي وابسته به توالي، از نظر پیچیدگي جزء مسائل NP-hard به شمار مي‌روند، مدل پیشنهادي در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌هاي جستجوگر تبرید تدریجي و جستجوگر ممنوعه حل شده است. نتایج محاسباتي مبین کارآیي این الگوریتم‌ها در حل چنین مسائلي مي‌باشد.

کلمات کلیدي

توالي قطعات، تعویض ابزار، قابلیت اطمینان، الگوریتم تبرید تدریجي ، جستجوگر ممنوعه

Combinatorial Part sequencing and tool replacement based reliability by heuristic 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 فردوسي مشهد: kolahan@um.ac.ir

[ii] دانشجوي کارشناسي ارشد مکانیک; دانشگاه فردوسي مشهد

۱- مقدمه

مراكـز ماشـينكاري اتومـات در سـال هـاي اخيـر بـه طـور گسترده‌اي مورد استفاده قرار گرفته است. رواج اين گونه مراكز بيشتر ناشي از انعطاف‌پـذيري و كـارآيي آنهـا در انجـام طيـف وسيعي از عمليات بر روي قطعات مختلف است. با اين حال، یک مركز ماشينكاري اتومات به سرمايه‌گذاري زيـادي نيـاز دارد و تنها هنگامي مي‌تواند توجيه اقتصادي داشته باشد كه به صورت مؤثري بكار گرفته شود. براي اطمينان از بازگشت سـرمايه، بـه قابليت اطمينان بالايي در اين سيستم‌ها نياز است. در اين ميـان، برنامه‌ريزي براي توليد از قبيل توالي قطعات و جايگزيني ابـزار تأثيرات مستقيمي روي عملكرد سيستم دارد[۱].

به طور كلي، منظور از برنامه‌ريزي توليد، تعيين بهينه نـوع، تعداد، توالي و زمان هاي پردازش محصولات با توجه به منـابع مورد نياز و تعهدات توليـد اسـت. ايـن امـر معمـولاً بـه منظـور كاهش هزينه‌هاي توليـد و هزينـه‌هـاي عـدول از تحويـل بموقـع (Just-in-Time) سفارش ها صورت مي‌گيرد[۲]. به عبارت ديگر، تعيين برنامه‌هاي توليد (شامل، تعداد و نـوع محـصولات، زمـان تكميل آنها، تجهيزات مورد استفاده و غيره) بر اساس هزينه‌هـا، تقاضاها و امكانات موجود، از اهداف مورد نظر در برنامه‌ريزي توليد مي‌باشد.

در مسائل برنامه‌ريزي توليد و زمانبندي قطعات معيارهـاي عملكرد مختلفي وجود دارد كه پژوهشگران يكـي يـا تركيبـي از آنهـا را بـه عنـوان تـابع هـدف در نظـر گرفتـه‌انـد. از آن جملـه مي‌توان به زمان‌هاي تكميل[۱] [۳]، گستره كلـي زمـان توليـد[۲] [٤]، تعداد كارهاي داراي تأخير[۵]، حداكثر ديركـرد يـا زودكـرد[٦]، تعـداد تعـويض ابـزار[۷] اشـاره كـرد. فرضـيات و ملاحظـات گوناگوني همچون نوع زمانهاي آماده‌سازي، ملاحظـات مربـوط به تحويل بموقع، عمر ابزار و تعداد يدكي ابزار وجود دارد كه از آنها در برنامه‌ريزي استفاده شده است.

در اين ميان، دو مقوله زمانبندي قطعات و مـديريت ابزارهـا در سيستم توليد از اهميت بالايي برخـوردار اسـت كـه تـأثيرات مشخصي روي هزينه توليد كل دارد. اگر چه مقالات متعددي در اين خصوص منتشر شده است؛ اما در نظر گرفتن اين مسائل به طور همزمان كمتر صورت گرفته است. اين در حـالي اسـت كـه در بسياري از تحقيقات انجام شده در زمينه زمانبنـدي ماشـين، معمولاً فرض مي‌شود كه عمر ابـزار يـک مقـدار قطعـي اسـت و ابزار همواره براي انجام عمليـات در ايـن مـدت، در دسـترس و كاملاً قابل اعتماد مي‌باشد [۹]. اين فرضيات مي‌توانـد كارآمـدي بسياري از نتايج به دست آمده در ايـن زمينـه را بـه علـت عـدم وجود ملاحظات مناسب در مورد اثر تدارک ابزار در زمان هاي آماده‌سازي زير سؤال ببرد [۸].

به علاوه، مطالعه در زمينه سياست هـاي ابزاردهـي بـا ايـن فرض انجام شده است كه توالي كارها ثابت و از قبـل در مـورد آنها تصميم‌گيري شده است. در حالي كه تصميم‌گيري در مورد توالي كارها و تدارک ابزار به صورت دوطرفه بر يكـديگر تـأثير مي‌گذارنـد. بـه عنـوان مثـال، اينكـه ابـزار بـراي عمليـات بعـدي تعويض شود يا خير، به اين بستگي دارد كـه چـه نـوع عمليـاتي براي مرحله بعد در برنامه زمانبندي وجـود داشـته باشـد. اگـر عمر باقيمانده ابزار بيشتر از زمان پردازش عمليات بعدي باشد، ممكن است به تعويض ابزار نيازي نباشد، در غير ايـن صـورت ابزار بايستي تعويض شود.

با اين وجود در اين تحقيقات، عمر مفيد ابزار، به عنوان يـک پارامتر مهم در مـديريت ابـزار، غالبـا كميتـي قطعـي و از پـيش تعيين شده در نظر گرفته شده است؛ ولـي در واقـع، عمـر ابـزار ماهيتي تصادفي و احتمالي دارد. به عبارت ديگـر، يـك ابـزار در هر زماني در حين كار ممكن است خراب شود و احتمال خرابـي آن، با افزايش زمان كاركرد، افزايش مي‌يابد كه اين امر، استفاده از مفهوم قابليت اطمينان را به منظور ارزيابي وضـعيت ابزارهـا در فرآيندهاي ماشينكاري توجيه مي‌كند. بنابراين يكي از اهداف مهم اين مقاله، منظور كردن قابليت اطمينـان بـه عنـوان يكـي از معيارهای عملكردی در تـدوين برنامـه ريـزی توليـد اسـت؛ بـه عبـارت ديگـر اسـتفاده از مفهـوم قابليـت اطمينـان در برنامـه تعويض ابزار را مي توان به عنوان يكي از اصـلي تـرين وجـوه تمايز اين مقاله دانست.

مدل هاي زمانبندي قطعات همراه بـا ملاحظات مربـوط بـه ابزار با در نظر گرفتن زمان‌هاي آماده‌سازي وابسته بـه تـوالي، جزء مسائل NP-Hard به شمار مي‌روند[٦]. ماهيت پيچيـده ايـن مدل‌ها و بزرگـي مـسائل واقعـي در صـنعت باعـث شـده اسـت روش‌هاي حل استاندارد عموماً از كارآيي و سـرعت عمـل لازم براي حل اين گونه مسائل برخوردار نباشند. امروزه، با توسـعه امكانات محاسباتي و كامپيوتري، روش‌هاي تكاملي بهينه سازي از قبيل جستجوگر ممنوعه، الگوريتم ژنتيـک و تبريـد تـدريجي كاربرد وسيعي در حل مسايل پيچيده يافته‌اند. اصـول كـار ايـن الگـوريتم‌هـا ايجـاد و ارزيـابي مرحلـه‌اي تعـداد محـدودي از جواب‌هاي قابل قبول، براي رسيدن به جواب بهينه در زمان‌هاي قابل قبول است.

با توجه به آنچـه اشـاره شـد، در ايـن تحقيـق، مـدل تعيـين همزمان توالي قطعات و برنامه بهينه تعويض ابزارها با ملاحظه قابليت اطمينان ابزارها به منظور كمينه كردن مجموع هزينه‌هـاي توليدي در یک سيستم توليد اتومات ارائه و بررسي شده اسـت. در ايـن مـساله از الگـوريتم‌هـاي جـستجوگر تبريـد تـدريجي

(Simulated Annealing- SA) و جستجوگر ممنوعه (Tabu Search- TS) به منظور حل مدل هاي برنامه ريزي توليد استفاده شده و نقاط ضعف و قوت آنها در حل اين گونه مسائل تحليل و ارزيابي شده است. الگوريتم‌هاي پيشنهادي به گونه‌اي طراحي شده‌اند که قادر خواهند بود به طور همزمان توالي کارها و زمان‌هاي تعويض ابزار را تعيين کنند.

بنابراين اهداف کلي مورد نظر در اين تحقيق را مي‌توان به صورت زير بيان کرد:

1. يکپارچه کردن چندين معيار مهم برنامه‌ريزي به منظور اجتناب از تصميمات عملياتي غيربهينه يا نا سازگار
2. طراحي و ارائه مدل رياضي جامع برنامه‌ريزي، مبتني بر قابليت اطمينان ابزار، براي يک سلول توليد اتومات
3. بسط و انطباق روش هاي بهينه سازي کارا و مؤثر براي حل مدل پيشنهادي در زمان هاي قابل قبول محاسباتي
4. تحليل و ارزيابي پارامترهاي مؤثر بر عملکرد روش هاي حل پيشنهادي و بررسي نقاط ضعف و قوت آنها در مسائل برنامه‌ريزي توليد
5. حل مثال با اندازه واقعي برای صحه‌گذاري مدل ارائه شده و نمايش قابليت هاي روش هاي حل پيشنهادي

در ادامه، ابتدا ساختار و ويژگي هاي سيستم توليدي به همراه اهداف مورد نظر تشريح مي‌شود، در بخش بعد، مدل رياضي مساله ارائه شده، سپس الگوريتم‌هاي به کار گرفته شده و چگونگي عملکرد آنها به صورت خلاصه بيان مي‌شود. در انتها نيز يک مثال عددي از مساله تشريح شده ارائه و نتايج محاسباتي آن بحث مي‌شود.

۲- تعريف مساله

سيستم مورد نظر شامل يک سلول توليدي انعطاف‌پذير با قابليت انجام پروسه‌هاي ماشينکاري مختلف است که يک خشاب ابزار با ظرفيت محدود و تعويض کننده ابزار اتومات دارد. در هر دوره برنامه‌ريزي، تعدادي قطعه مي بايست بر روي سلول مزبور توليد شوند. تمام عمليات توليدي اين قطعات به وسيله اين سلول قابل انجام است. هر قطعه به چندين پروسه توليدي نياز دارد که مدت زمان انجام آنها معين است. با اين حال، زمان هاي آماده‌سازي (باز و بست و تنظيم ماشين و ....) بين قطعات وابسته به توالي[۳] آنها در فرآيند توليد مي‌باشد. اين بدين معني است که بر طبق موقعيت قطعه در نوبت توليد، زمان هاي آماده‌سازي و تعويض آن با قطعه قبلي متغير خواهند بود. همچنين در راستاي تفکر توليد بموقع، هر قطعه مي بايست در موعد خاصي توليد و تحويل شود. هرگونه عدول از اين موعد موجب تحميل جريمه ديرکرد يا زودکرد مي گردد. جريمه عدول از تحويل بموقع، بر حسب زمان، براي هر قطعه به طور جداگانه محاسبه و منظور مي‌شود.

هر پروسه به وسيله يک ابزار انجام مي شود، اگر چه برخي از ابزارها قادر به انجام چندين عمليات توليدي مي‌باشند. با توجه به خصوصيت اين ابزارها، در پاره‌اي از شرايط (همچون عدم دسترسي به ابزار مورد نياز، کمبود تعداد يدکي از يک نوع ابزار خاص، ملاحظات مربوط به هزينه ابزارها و ...) و با توجه به منابع و محدوديت‌هاي موجود، مي‌توان از ميان ابزارهاي در دسترس براي انجام يک پروسه استفاده کرد. بنا به نوع عمليات ماشينکاري و ابزار مورد استفاده، زمان و هزينه ماشينکاري با ابزارهاي مختلف متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال، با توجه به جدول (۱)، تعداد ۵ پروسه ماشينکاري بايستي به وسيله ۳ نوع ابزار مختلف انجام شود. در برنامه توليد، براي انجام اولين پروسه يکي از دو ابزار I و II اختصاص داده شده است، پروسه دوم تنها با ابزار نوع I قابل انجام است در حالي که پروسه چهارم را مي‌توان با هر يک از ابزارهاي I و II و III به اتمام رساند.

جدول(۱): آلترناتيو ابزارهاي قابل استفاده براي يک قطعه نمونه

پروسه۱	پروسه۲	پروسه۳	پروسه٤	پروسه۵
II	I	I	III	II
I	--	III	II	--
--	--	--	I	--

همچنين با توجه به اينکه ابزارها در حين ماشينکاري مستهلک مي‌شوند، با افزايش زمان ماشينکاري امکان شکست و خرابي ابزار در حين کار افزايش مي‌يابد. شکست ابزار در حين کار عموما باعث خرابي قطعه نيز مي‌شود؛ لذا استفاده از ابزار مستهلک موجب افزايش ريسک (و هزينه) خرابي در حين کار خواهد شد. از طرفي تعويض ابزار مستهلک با ابزار جديد، اگرچه ريسک خرابي در حين کار را کاهش مي دهد، مستلزم صرف هزينه ابزار جديد است. بنابراين تصميم‌گيري مناسبي، در خصوص برنامه زمانبندي تعويض ابزارهاي مستهلک با ابزارهاي جديد و تعداد يدکي‌هاي مورد نياز، مي‌بايست صورت گيرد. همچنين براي عملياتي که با چند نوع ابزار مختلف قابل انجام مي‌باشند، انتخاب ابزار مي بايست با توجه قابليت اطمينان و قيمت ابزارهاي موجود صورت گيرد. در نظر گرفتن هزينه ناشي از ريسک خرابي در حين کار در راستاي استفاده از مفهوم قابليت اطمينان (به جاي عمر مفيد ابزار) در ارزيابي وضعيت ابزار است.

همان طور که قبلاً نيز اشاره شد، در سيستم توليدي مورد نظر فرض شده است که ظرفيت خشاب محدود است. اگر ظرفيت خشاب ابزار کمتر از تعداد ابزارهاي لازم براي

ماشينكاري همه قطعات باشد، مي بايست تعدادي از ابزارهاي خشاب را با ابزارهاي مورد نياز، كه از انبار ابزار گرفته مي‌شوند، جايگزين كرد. براي چنين حالاتي، در ادبيات موضوع سياست هاي مختلف تعويض ابزار پيشنهاد شده است. در اين ميان جايگزيني ابزارها بر طبق سياست "نگهداري ابزاري؛ كه زودتر مورد نياز است،"[٤] كاربرد بيشتري در تحقيقات جاري دارد. اين روش را اولين بار Tang and Denardo [١٠] ارائه كرد و بعد از آن، محققان ديگر آن را به صورت مؤثرتري بسط دادند كه مورد استفاده قرار گرفته است[١١]. در اين تحقيق ابزاردهي دستگاه بر مبناي اين سياست انجام مي‌شود. در استراتژي KTNS، خشاب دستگاه ابتدا از ابزارهايي كه زودتر عمل پردازش را انجام مي‌دهند، پر مي شود. در طي عمليات ماشينكاري اگر ابزار مورد نياز در خشاب موجود نباشد، ابزاري كه ديرتر از سايرين به كار گرفته خواهد شد، از خشاب برداشته شده و ابزار لازم جايگزين آن مي‌شود. ذكر اين نكته لازم است كه انتقال و جايگزيني ابزار از انبار به خشاب دستگاه، مستلزم پرداخت هزينه انتقال و احتمالا راه‌اندازي مجدد ماشين خواهد بود.

با توجه به آنچه اشاره شد، در اين مدل بسياري از مشخصه‌هاي مهم يک سيستم توليد اتومات به طور همزمان در نظر گرفته شده است، اگر چه پياده سازی مدل پيشنهادي در سيستم های واقعي نيازمند انطباق مدل بر سيستم واقعی و وجود داده‌هاي مورد نياز است. ويژگي های در نظر گرفته شده عبارتند از: توالي قطعات همراه با زمانبندي تعويض ابزار، بكار بردن قابليت‌اطمينان ابزار به جاي پارامتر عمر ابزار، در نظر گرفتن هزينه ريسک خرابي ابزار و قطعه در حين كار، استفاده از آلترناتيوهاي ابزار براي پردازش قطعات و نيز بررسي جايگزيني ابزارها بر اساس سياست KTNS با توجه به ظرفيت خشاب ابزار. اهداف اصلي مورد نظر در مدل برنامه‌ريزي را مي‌توان به صورت زير بيان كرد:

١. تعيين بهترين توالي از قطعات براي توليد با در نظر گرفتن نوع عمليات هر قطعه، زمان هاي آماده‌سازي بين قطعات و زمانهاي تحويل آنها؛
٢. تعيين برنامه زمانبندي تعويض ابزارها با توجه به قابليت اطمينان، توالي قطعات و نيز ظرفيت خشاب ابزار؛
٣. تعيين تعداد يدكي‌هاي مورد نياز براي هر ابزار؛

موارد فوق به گونه‌اي تعيين مي گردند تا مجموع هزينه‌هاي توليد كمينه شود. هزينه‌هاي توليدي در اين مدل، شامل هزينه‌هاي ماشينكاري، ابزارهاي يدكي، آماده‌سازي يا تعويض ابزار، آماده‌سازي و تعويض قطعات، احتمال خرابي ابزار و قطعه در حين كار و هزينه عدول از تحويل به موقع سفارش ها (ديركرد و زودكرد) است.

٣- مدل رياضي ارائه شده

در اين بخش، يك مدل برنامه‌ريزي رياضي، كه در برگيرنده ويژگي هاي مسئله و ارضا كننده اهداف و قيود آن است ارائه مي‌شود. مدل پيشنهادي از نوع مدل هاي چند هدفه است، كه در آن معادله هدف از مجموع وزني مؤلفه‌هاي مختلف تشكيل مي‌شود. وزن ها در مدل هاي چند هدفه نقش همسنگ‌سازي متغيرهاي تصميم‌گيري و همچنين تعيين اهميت نسبي اهداف (در مقايسه با يكديگر) را دارند.

علائم و اختصارات

j, h, k	انديس شماره قطعه $j, k, h=١,\dots, J$
i	انديس ابزار براي پردازش قطعه j $i=١,\dots, I_j$
I_j	مجموع ابزار مورد نياز براي ماشينكاري قطعه j
l	انديس عمليات از قطعه j $l=١,\dots, L_j$
P_j	جريمه ديركرد قطعه j در واحد زمان
P_j^*	جريمه زودكرد قطعه j در واحد زمان
C^m	هزينه ماشينكاري در واحد زمان
C^s	هزينه آماده‌سازي ابزار و قطعه در واحد زمان
T_j	مدت زمان ديركرد قطعه j
E_j	مدت زمان زودكرد قطعه j
t_{kj}^s	زمان آماده‌سازي براي قطعه j اگر بلافاصله بعد از قطعه k ماشينكاري شود
t_i^*	زمان تعويض 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 ماشينكاري عمليات l قطعه j به وسيله ابزار i
C_i	هزينه ابزار i
C_j^*	قيمت (ارزش) قطعه j
$R_i^{\min}$	حداقل قابليت اطمينان لازم براي ابزار i
R_{ijl}	قابليت اطمينان ابزار i در پايان عمليات l قطعه j، اگر ابزار در شروع ماشينكاري قطعه j تعويض شده باشد
r_{ijl}	قابليت اطمينان ابزار i در پايان عمليات l قطعه j، اگر ابزار در شروع ماشينكاري قطعه j تعويض نشده باشد

با توجه به نمادهاي فوق، مدل رياضي تعيين همزمان توالي قطعات و تعويض ابزارها به شكل زير ارائه مي شود:

$$\text{Min Z} = \left\{ \sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L_j}\sum_{i\in I_j}\min\left(zr_{ijl}, zR_{ijl}\right) + \sum_{j=1}^{J}\left[w_j C^s t^s_{kj}\ \ (\forall k \notin j)\right] + \sum_{i\in I_j}\left[C^s\left(y_i t^*_{i-1,i} + (1-y_i)t^{**}_{i-1,i}\right)\ \ (\forall j)\right] + \sum_{j=1}^{J}\left[abs\left(x_j P_j T_j + (1-x_j)P^*_j E_j\right)\right]\right\} \tag{۱}$$

محدود به:

$$\left[\sum_{k=1}^{j}\sum_{l=1}^{L_k}\sum_{i\in I_k}\left(\tau_{ikl} + y_i t^*_{i-1,i} + (1-y_i)\, t^{**}_{i-1,i}\right) + t^s_{hk}\right] - d_j \le T_j \tag{۲}$$

$$d_j - \left[\sum_{k=1}^{j}\sum_{l=1}^{L_k}\sum_{i\in I_k}\left(\tau_{ikl} + y_i t^*_{i-1,i} + (1-y_i) t^{**}_{i-1,i}\right) + t^s_{hk}\right] \le E_j \tag{۳}$$

$$E_j \ge 0 \tag{٤}$$

$$T_j \ge 0 \tag{٥}$$

$$R_{ijl}\ (\text{OR}\ \ r_{ijl}) \ge R_i^{\min} \tag{٦}$$

که در آن:

$$zr_{ijl} = \left(C_i + C^*_j\right)\left(1 - r_{ijl}\right) + \left(C^m \tau_{ijl} r_{ijl}\right) \tag{۷}$$

$$zR_{ijl} = \left(C_i + C^*_j\right)\left(1 - R_{ijl}\right) + \left(C^m \tau_{ijl} R_{ijl}\right) + C_i \tag{۸}$$

$$x_j = \begin{cases} ۱ & \text{اگر قطعه داراي ديرکرد باشد} \\ . & \text{در غير اين صورت} \end{cases} \tag{۹}$$

$$w_j = \begin{cases} ۱ & \text{اگر قطعه } j \text{ بعد از قطعه } k \text{ ماشينکاري شود} \\ . & \text{در غير اين صورت} \end{cases} \tag{۱۰}$$

$$y_i = \begin{cases} ۱ & \text{اگر ابزار مورد نياز در خشاب موجود نباشد} \\ . & \text{در غير اين صورت} \end{cases} \tag{۱۱}$$

در اين مدل، تابع هدف شامل سه مؤلفه کلي هزينه است که براي هر توالي مشخص، مجموع هزينه‌ها را محاسبه مي کند. اولين جمله تابع هدف، $\min\left(zr_{ijl}, zR_{ijl}\right)$، به هزينه‌هاى ماشينكارى و ريسک خرابي ابزار و قطعه در حين ماشينكارى مربوط است که ماهيتي احتمالي دارد و به قابليت اطمينان ابزار وابسته است. ساير جملات شامل هزينه‌هاي آماده‌سازي ابزار و قطعات و نيز هزينه عدول از تحويل بموقع مي‌باشند که از نوع هزينه‌هاي قطعي توليد هستند.

تصميم‌گيري در مورد تعويض يا نگهداري ابزار مستعمل در ابتداي شروع هر عمليات بر اساس هزينه‌هاي محاسبه شده به وسيله روابط (۷) و (۸) صورت مي‌گيرد. اين روابط مجموع هزينه‌هاي ماشينکاري و احتمال خرابي ابزار را در هنگام استفاده از ابزار مستعمل يا ابزار نو ارائه مي‌دهند. هزينه ماشينکاري بر اساس احتمال اتمام موفقيت آميز عمليات ماشينکاري (r_{ijl}) محاسبه شده و با هزينه احتمال خرابي ابزار در حين کار ($1 - r_{ijl}$) جمع مي‌شود. اگر احتمال خرابي ابزار صفر باشد، به عبارت ديگر هيچگونه خرابي در ابزار رخ ندهد، تنها هزينه‌اي که احتساب مي شود، هزينه ماشينکاري خواهد بود.

از آنجا که همواره قابليت اطمينان يک ابزار مستعمل از يک ابزار کاملاً نو کمتر است، $r_i < R_i$، استفاده از ابزار کارکرده هزينه خرابي در حين کار بزرگ تري را باعث مي‌شود. در مقابل اگر ابزار تعويض شود (رابطه ۸)، هزينه احتمال خرابي در حين کار کاهش مى يابد؛ ولي هزينه قطعي تعويض ابزار به مجموع هزينه‌ها اضافه خواهد شد. يکي ديگر از پارامترهاي تصميم‌گيري در مورد جايگزيني يا عدم جايگزيني يک ابزار، (رابطه ٦)، حداقل قابليت اطمينان هر ابزار است. در ابتداي هر عمليات اگر قابليت اطمينان ابزار مورد نظر کمتر از حد لازم باشد، ابزار مزبور مي بايست با ابزار نو جايگزين شود.

حل اين مدل شامل تصميم‌گيري در مورد دو مساله مؤثر بر يکديگر مي‌باشد: ۱) توالي قطعات و ۲) جايگزيني ابزارها. مساله جايگزيني ابزار؛ که به صورت يک لايه داخلي در مدل قرار گرفته است، به توالي قطعات در نوبت توليد وابسته است. تصميم‌گيري در مورد توالي قطعات؛ که به عنوان يک لايه خارجي در مدل منظور شده است، عمدتا با زمانهاي آماده‌سازي، وابسته به توالي و موعدهاي تحويل قطعات تعيين مي‌شود.

هزينه‌هاي عدول از تحويل بموقع سفارش ها با توجه به مقدار ديرکرد يا زودکرد هر قطعه و براساس زمان پردازش قطعه مزبور و زمان هاي تکميل قطعات قبلي (روابط ۲ و ۳) محاسبه مي شود. اين دو معادله به همراه روابط (٤) و (٥) اين مهم را تضمين مي کنند که برای هر قطعه، ديرکرد و زودکرد با هم به وقوع نخواهند پيوست.

٤- روش حل

بسياري از مسائل بهينه‌سازي برنامه‌ريزي توليد، همچون مسائل توالي و زمانبندي سيستم هاي توليدي، به طور ذاتي بسيار پيچيده و جزء مسائل NP-hard به شمار مي‌روند؛ بنابراين حل آنها به کمک روش هاي بهينه‌سازي استاندارد

بسيار مشکل است و به زمان محاسباتي زيادي نيازمند است. با پيچيده‌تر شدن سيستم ها و مسائل بهينه‌سازي آنها از يک طرف و پيشرفت کامپيوتر و قابليت‌هاي محاسباتي از طرف ديگر، امروزه استفاده از جستجوگرهاي هوشمند کاملاً متداول شده است.

الگوريتم‌هاي جستجوگر همسايگي همچون SA و TS به طور گسترده‌اي براي حل اين چنين مسائلي بکار مي روند. اصول کار اين الگوريتم‌ها ايجاد و ارزيابي مرحله‌اي تعداد محدودي جواب هاي (همسايگي) قابل قبول، براي رسيدن به جواب بهينه در زمان هاي قابل قبول مي‌باشد.

٤-١- الگوريتم جستجوگر SA

روش جستجوگر "*تبريد تدريجي*" SA يک جستجوگر همسايگي است که در بهينه‌سازي مسائل گسسته کاربرد دارد[٤] [١٢]. طبيعت تصميم‌گيري اين الگوريتم به اين صورت است که براي هر حرکت، يک همسايگي جديد به صورت تصادفي توليد و ارزيابي مي‌شود. حرکت به اين جواب در هر يک از دو وضعيت زير انجام خواهد يافت: ١) جواب جديد از جواب فعلي بهتر باشد و ٢) مقدار تابع احتمال حرکت[٥] از يک عدد تصادفي از دامنه (٠،١] بزرگ تر باشد؛ در غير اين صورت جستجوگر جواب جديدي را توليد و ارزيابي خواهد کرد. اين حرکت گام‌به‌گام تا ارضاي شرط توقف الگوريتم (تعداد تکرارها، زمان محاسبات، و ....) ادامه مي‌يابد.

مقدار تابع احتمال حرکت در هر بار از رابطه $P_r = \exp(-\Delta Z / c_k)$ محاسبه مي‌شود. در اين رابطه ΔZ اختلاف مقدار تابع هدف بين جواب فعلي و جواب جديد است. انديس k تعداد تکرارها، c_k پارامتر کنترلي موسوم به دما است. معمولاً در ابتداي جستجو، مقدار دماي اوليه، c_o، بزرگ انتخاب مي‌شود، به طوري که الگوريتم شانس بيشتري براي حرکت به جواب هاي غير بهبود دهنده داشته باشد؛ اما با افزايش تعداد اين حرکت ها، اين دما طبق يک تابع زمانبندي سرمايش[٦] به تدريج کم مي‌شود ($c_{k+1} = \alpha c_k$)؛ در نتيجه احتمال انتخاب جواب‌هاي بدتر با افزايش تعداد حرکت‌ها کاهش مي‌يابد؛ به عبارت ديگر، در ابتداي جستجو ، نقش طبيعت تصادفي الگوريتم در پذيرش همسايگي جديد بيشتر از نقش طبيعت قطعي آن است. ولي با پيشرفت جستجو، حرکت‌ها غالبا بر اساس بهبود تابع هدف انجام شده و نقش طبيعت تصادفي الگوريتم در پذيرش جواب جديد کاهش مي‌يابد.

٤-٢- الگوريتم جستجوگر TS

جستجوگر Tabu Search اولين بار در سال ١٩٨٦ براي حل مسائل بهينه‌سازي ترکيبي استفاده شد[١٣]. روند جستجو به اين ترتيب است که جستجو گر از يک جواب قابل قبول مسأله شروع به حرکت می کند و پس از تشکيل و ارزيابي جواب هاي قابل قبول در همسايگي جواب فعلي به بهترين آنها حرکت مي‌کند. اين حرکت قدم به قدم جستجوگر را به سمت جواب بهينه يا نزديک به بهينه هدايت مي‌کند. مشخصه بارز الگوريتم TS که آن را از ديگر جستجوگرها متمايز مي‌کند، توانايي آن در گريز از بهينه‌هاي محلي است. اين توانايي از دو ويژگي ناشي مي‌شود؛ اول اينکه در هر حرکت TS بهترين جواب را در همسايگي جواب جاري مي‌پذيرد؛ چنين جوابي ممکن است بهتر و يا بدتر از جواب فعلي باشد. همچنين اين جستجوگر، مجهز به يک حافظه کوتاه مدت است، که به ليست تابو[٧] معروف است. اين ليست شامل تعدادي از حرکت هاي اخير جستجوگر است که اجازه رجوع به آنها در حرکت فعلي وجود ندارد. اين دنباله از جوابهاي ممنوعه به همراه قابليت قبول جواب هاي بدتر، جستجوگر را تا حد زيادي از دور زدن و حبس شدن در بهينه‌هاي محلي حفاظت مي‌کند.

٥- ارائه مثال و نتايج محاسباتي

در اين بخش، يک مثال عددي به منظور درک بهتر مدل و تشريح عملکرد الگوريتم‌هاي پيشنهادي ارائه شده است و نتايج محاسباتي آن بحث مي‌شود. يک دستگاه انعطاف‌پذير را در نظر بگيريد که تعداد ٣٠ قطعه بايستي بر روي آن پردازش شوند. براي انجام اين پروسه‌ها، ١٥ نوع ابزار مختلف لازم است. اين در حالي است که خشاب دستگاه تنها ظرفيت نگهداري١٠ ابزار را دارد؛ بنابراين بايستي خشاب را در هر مرحله به گونه‌اي بارگذاري کرد تا تعداد انتقال ابزار از خارج خشاب و در نتيجه تعداد راه‌اندازي مجدد دستگاه حداقل شود. قابليت اطمينان لازم براي کليه ابزارها ٩٥% در نظر گرفته شده است. در تحقيقات جاري، از توابع مختلفي (نمايي، لگاريتمي، وايبال، و ....) براي ارزيابي قابليت اطمينان ابزارها استفاده شده است. بررسي هاي انجام شده نشان مي‌دهد تابع توزيع وايبال از جامعيت و انطباق خوبي در پيش بيني قابليت اطمينان ابزارها و عمليات ماشينکاري برخوردار است [١٤]. بنابراين، در تحقيق حاضر از اين تابع به منظور تعيين قابليت اطمينان ابزارها استفاده مي‌شود. بازه ساير اطلاعات مربوط به هزينه‌هاي مختلف و زمان‌هاي تحويل، به صورت زير است:

موعد تحويل : ٨٢٠ تا ٤٠ دقيقه
جريمه ديرکرد : ٢/٥ (ساعت/هزينه)

جريمه زودكرد : ۱/۵ (ساعت/هزينه)
هزينه ماشينكاري : ۳ (دقيقه/هزينه)
هزينه آماده‌سازي : ۲ (دقيقه/هزينه)
هزينه قطعه خام : ۱۰۰ تا ٦۰۰
قيمت ابزار : ۱۵ تا ۲۰

اين مساله با استفاده از الگوريتم‌هاي جستجوگر SA وTS بـراي مقـادير مختلـف پارامترهـاي تنظيمـي حـل شـد. بهتـرين پارامترهاي به دست آمده براي اين الگوريتم‌ها در جـداول (۲) و (۳) نشان داده شده است. نتايج محاسـباتي نيـز بـر مبنـاي ايـن پارامترها ارائه شده‌اند:

جدول (۲): پارامترهاي الگوريتم **SA** در حل مسأله

دماي اوليه (C.)	۸۰۰۰
ثابت كاهش دما (α)	۰/۹۹
مكانيزم انتخاب همسايگي	جابجايي دو به دو بصورت تصادفي
معيار توقف جستجو	رسيدن به زمان ۱۲۰۰ ثانيه

جدول (۳): پارامترهاي الگوريتم **TS** در حل مسأله

اندازه ليست ممنوعه	۳۰
مكانيزم انتخاب همسايگي	جابجايي دو به دو
تعداد همسايگي‌هاي ارزيابي شده در هر حركت جستجوگر	تمامي همسايگي‌ها
معيار توقف جستجو	رسيدن به زمان ۱۲۰۰ ثانيه

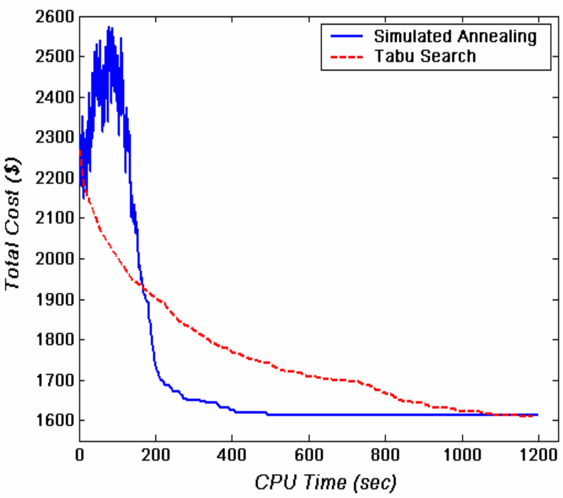
۵-۱- نتايج محاسباتي

برنامـه الگـوريتم‌هـاي TS و SA در نـرم‌افـزار MATLAB كدنويـسي و بـا يـك كـامپيوتر P۱۸۰۰ اجـرا شـده‌انـد. نتـايج محاسـباتي بـر اسـاس بهتـرين پارامترهـاي هـر روش ارائـه مي‌شود. معيار توقف هـر دو الگـوريتم زمـان محاسـباتي آن و معادل ۱۲۰۰ ثانيه است.

جدول (٤): هزينه‌هاي بدست آمده از الگوريتم‌هاي **SA** و **TS**

هزينه ها	Simulated Annealing: برنامه توليد اوليه	Simulated Annealing: برنامه توليد نهايي	Simulated Annealing: درصد بهبود	Tabu Search: برنامه توليد اوليه	Tabu Search: برنامه توليد نهايي	Tabu Search: درصد بهبود
هزينه آماده سازي	۲۵۲	۲۲۲	۱۱/۹	۲۵۲	۲۰۵	۱۸/٦٥
عدول از تحويل به موقع	۲۹۷/۵	۲۰۳/۸	۳۱/۵	۲۹۷/۵	۲۲۷/۰٤	۲۳/٦۹
احتمال خرابي و ماشينكاري	۱۷۲۰/۲	۱۱۸۵/۸	۳۱/۰۷	۱۷۲۰/۲	۱۱۷٦/٦	۳۱/٦
هزينه كل	۲۲٦۹/۷	۱٦۱۱/٦٤	۲۸/۹۹	۲۲٦۹/۷	۱٦۰۸/۷	۲۹/۱۲
مجموع يدكي مورد نياز از ابزارها	۲۱	۱۵	۲۸/۵۷	۲۱	۱٤	۳۳/۳۳
تعداد انتقال ابزار از انبار به خشاب	۲۱	۱۱	٤۷/٦	۲۱	۱۰	۵۲/۳
زمان همگرايي الگوريتم (ثانيه)	كمتر از ٦۰۰			بيشتر از ۱۲۰۰		

جزئيات و مجموع هزينه‌هاي مورد انتظار توليد در جدول (٤) ارائه شده است. همان طور كه مشاهده مي‌شـود، در طـي مدت جستجو با الگوريتم SA، مجمـوع هزينـه‌هـاي توليـد از حدود ۲۲٦۹/۷ واحد به ۱٦۱۱/٦ واحد كاهش يافتـه اسـت كـه اين مقدار مبين حـدود ۲۹% بهبـود در مجمـوع هزينـه‌هاسـت. الگوريتم در طي زماني كمتـر از ٦۰۰ ثانيـه همگـرا مـي‌شـود. الگوريتم TS نيز عملكردي مـشابه داشـته و در زمـان ۱۲۰۰ ثانيه بهبـود بـيش از ۲۹% را باعـث شـده اسـت. نمودارهـاي همگرايـي الگـوريتم هـاي SA و TS در شـكل (۳) نـشان داده شده است.



شكل (۳): مقايسه عملكرد جستجوگرهاي TS و SA

جزييات ساير پارامترهای بهبود يافته نيـز در جـدول (٤)

نشان داده شده است. به عنوان مثال، تعداد دفعاتي كه بايستي ابزار از انبار به خشاب دستگاه انتقال داده شود، در برنامه اوليه توليد ۲۱ مرتبه است كه اين مقدار در برنامه نهايي با الگوريتم TS به ۱۰ و در SA به ۱۱ مرتبه كاهش يافته است.

توالي قطعات و برنامه تعويض ابزار به دست آمده از الگوريتم جستجوگر TS در جدول (۵) ارائه شده است. اولين ستون از اين جدول، توالي بهينه قطعات را نشان مي دهد. در سطر مربوط به هر قطعه، تخصيص ابزار به پروسه‌هاي ماشينكاري و نيز زمان مناسب تعويض ابزار، مشخص شده است.

جدول (۵): توالي قطعات و برنامه تعويض ابزارها به دست آمده از الگوريتم **TS**

	ابزار														
قطعه	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠	١١	١٢	١٣	١٤	١٥
٢٩	٠	--	--	--	--	--	--	--	٠	--	--	٠	--	--	٠
١	--	٠	--	--	--	--	--	--	٠	--	٠	--	--	٠	--
٣٠	--	--	--	--	--	٠	--	--	--	--	٠	--	٠	--	--
٥	--	--	--	٠	--	--	٠	٠	--	--	--	--	--	--	--
٢٧	--	--	٠	--	--	--	--	--	--	٠	٠	--	--	--	--
٦	٠	٠	٠	٠	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
٢	--	--	٠	٠	--	٠	--	--	--	٠	--	--	--	--	--
٩	--	--	--	٠	٠	--	--	--	٠	--	--	--	--	--	٠
١٨	--	--	--	--	--	--	٠	--	--	--	--	٠	٠	--	--
١٠	١	١	--	--	--	٠	--	٠	--	--	--	--	--	--	--
١١	--	--	١	٠	٠	--	--	--	--	--	--	٠	--	--	--
٢٥	--	٠	٠	١	--	--	٠	--	--	--	--	--	--	٠	--
١٣	--	٠	--	--	٠	--	٠	--	--	--	--	--	--	--	--
١٤	٠	--	--	--	--	--	٠	١	--	٠	--	--	--	--	--
١٥	٠	--	--	٠	--	--	١	--	--	--	--	--	--	--	--
١٦	٠	٠	--	--	--	٠	٠	--	--	--	--	--	--	--	--
١٧	٠	--	٠	--	١	--	--	--	--	--	١	--	--	--	--
٧	٠	--	٠	--	--	--	--	--	--	--	--	٠	--	--	--
٨	--	--	--	--	--	--	--	--	--	٠	--	٠	٠	--	--
٢٠	١	--	--	--	٠	--	٠	٠	--	--	٠	--	--	--	--
٢١	--	١	--	٠	٠	--	--	٠	--	--	--	--	--	--	--
٤	٠	٠	--	--	--	--	٠	--	--	--	--	--	٠	٠	--
٢٣	٠	٠	--	٠	--	--	١	--	--	--	--	--	--	--	٠
٢٤	٠	--	--	--	--	--	--	١	--	--	٠	--	--	--	--
١٢	٠	--	١	--	--	--	--	--	--	--	٠	--	--	٠	--
١٩	٠	--	--	--	٠	--	--	--	٠	--	٠	--	--	--	٠
٢٢	٠	--	--	--	٠	٠	٠	--	--	--	--	--	--	--	--
٢٨	--	٠	--	--	٠	--	٠	٠	--	--	--	--	--	--	--
٢٦	١	--	٠	--	--	--	--	--	--	٠	--	--	--	--	--
٣	٠	--	٠	--	--	--	--	--	--	--	٠	--	--	٠	--
تعداد يدكي	٣	٢	٢	١	١	٠	٢	٢	٠	٠	١	٠	٠	٠	٠

"--" عدم تخصيص عمليات، "٠" انجام عمليات بدون تعويض ابزار، "١" تعويض ابزار

در آخرین سطر از جدول، تعداد یدکیهاي مـورد نیـاز از هر ابزار آورده شده است. به عنوان مثال، بـراي ماشـینکاري قطعه شماره ۱۱، به ابزارهاي ۳، ٤، ٥ و ۱۲ نیاز است. این در حالي است که ابزار ۳ با توجه بـه اینکـه در پـردازش قطعـات قبلـي دچـار فرسـایش شـده اسـت، بایـستي قبـل از شـروع ماشینکاری قطعه ۱۱ با یک ابزار جدید جایگزین شود.

یکي از نکاتي که در جدول تعویض ابزارها وجود دارد، عدم توازن در توالي تعویض ابزارهاست. به عنوان نمونه، ابزار شماره ۱ پس از دو عملیات با یک ابزار جدید جایگزین ميشود؛ در حالي که این ابزار جایگزین شده پس از انجام ٦ عملیات بعدی باید تعویض شود؛ بنابراین جایگزیني ابزار را نميتوان تنها بر اساس تعداد عملیات یا زمان ماشینکاری پیش بیني کرد. دلیل این امر این است که زمان جایگزیني ابزار وابسته به پارامترهای مختلفي از جمله زمان ماشینکاری، قیمت ابزار، ارزش قطعه و نرخ خرابي ابزار در هر پروسه ماشینکاری ميباشد.

٥-۲- مقایسه عملکرد **TS** و **SA**

الگوریتم SA در مدت زمان کمتـر از ٦۰۰ ثانیـه بـه سـمت جواب مطلوب همگرا ميشود که تقریباً برابر با نـصف زمـان جستجو با الگوریتم TS است. علت اختلاف سـرعت همگرایـي الگوریتمهاي SA و TS را ميتوان بر اساس مکانیزم حرکـت آنها در فضاي جواب هاي قابل قبـول تفـسیر کـرد. الگـوریتم SA، در هر مرحله جستجو تنها یکي از جـواب هـاي همـسایه جواب فعلي را بررسي مي کند و چنانچه شرایط پـذیرش ایـن جواب برقرار باشد جستجوگر به آن حرکت ميکند.

در مقابل، الگوریتم TS، در هر مرحله از جستجو تمام (یا تعدادي از) همسایههاي جواب فعلي را بررسي و بـه بهتـرین آنها حرکت ميکند. این روند قانونمند و آرامِ جستجو، همـراه با پوشش فـضاي بیـشتري از مجموعـه جـواب هـاي موجـه، باعث ميشود که زمان رسیدن به جواب بهینه (یا نزدیـک بـه بهینه) با الگوریتم TS طولانيتر از SA باشـد. در عـین حـال، یکـي از نقـاط قـوت الگـوریتم TS، مجهـز شـدن آن بـه لیـست ممنوعه است که مانع از بازگشت به جواب هایي ميشود کـه قبلاً بررسي شدهاند.

با توجـه بـه نـرخ همگرایـي ایـن دو الگـوریتم (شـکل ۳)، مشاهده ميشود که الگوریتم SA از سرعت همگرایـي بـسیار بالایي برخوردار اسـت و در مـدت زمـان کمتـري نـسبت بـه الگوریتم TS به سمت جواب نهایي همگـرا مـيشـود. ایـن در حالي است که میزان بهبود جواب در دو الگـوریتم، تـا زمـان ۱۲۰۰ ثانیه اختلاف چنداني با هم ندارد. اما با گذشـت زمـان، با توجه به ویژگي هاي الگوریتم TS، ميتـوان انتظـار داشـت این الگوریتم مقادیر هزینهها را تا سطح مطلـوب تـري بهبـود دهد.

با توجه به آنچه اشاره شد، هر دو الگوریتم از سـرعت و قابلیت بالایي برخوردار هستند؛ اما براي حل مسائل بـزرگ و یا مواقعي که زمان محاسباتي اهمیـت دارنـد (ماننـد برنامـه-ریزيهاي روزانـه و کوتـاه مـدت)، الگـوریتم SA مـيتوانـد نسبت به الگوریتم TS ترجیح داده شود. در مقابل اگر کیفیت جواب به دست آمده در اولویت باشد (مانند طراحي محصول و برنامـهریـزيهـاي بلنـد مـدت)، مـيتـوان از الگـوریتم TS استفاده کرد.

٦- بحث و نتیجهگیري

امروزه تنوع محصولات تولیدي و لزوم پاسخ سـریع بـه نیاز بازار و مشتریان، باعث شده است که برنامهریزي تولیـد در صنعت اهمیت خاصي پیدا کند. مطمئنا، عدم وجود برنامـه تولید مدون و بهینه، باعث افزایش بيرویه هزینه ها و اتلافات در مراکز تولیدي خواهد شد.

در این تحقیق مدلي از برنامهریزي تولید براي یک ماشین تولیدي انعطاف پذیر ارائه شد و با استفاده از روشهـاي SA و TS حل گردید. اهداف اصـلي مـدل شـامل تعیـین همزمـان توالي بهینه قطعات و تعداد ابزارهاي یدکي بـه همـراه برنامـه زمانبندي تعویض ابزارها بـراي حـداقل کـردن تـابع مجمـوع هزینهها ميباشد.

منظور کردن قابلیت اطمینان ابزارهـا، بـه صـورت هزینـه ریـسک خرابـي ناشـي از شکـست ابـزار و بکـارگیري آن در تعیین برنامه زمانبندي جایگزیني ابزارها، از نکات مهمي است که در این پـژوهش بـه آن پرداختـه شـده اسـت. اسـتفاده از مفهوم قابلیت اطمینان، در بررسي وضعیت ابزار، ارائه دقیق-تری از سیستم تولیدی به دست داده و موجب واقعيتر شدن مدل های برنامه ریزی مي شود.

حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز تأثیر مستقیمي بر تـوالي تعویض ابزار دارد. بدیهي است با افزایش این مقـدار(مـثلا از ۹٥% بسمت ۱۰۰%) ، کنترل ابزار سختگیرانه تر شـده و ابـزار میبایست در بازههای زمـاني کوتـاه تـری تعـویض شـود.تـا جایي کـه در صـورت اسـتفاده از معیـار ۱۰۰%، ابزارهـا مـي بایست قبل از هر عملیات با ابزار نو جایگزین شوند؛ بنابر این هر گونه تغییر در مقدار حـداقل قابلیـت اطمینـان مـورد نیـاز، باعث تغییر در تصمیمات مربوط به تعویض ابزار خواهد شد.

نتــايج محاســباتي نــشان مــيدهــد كــه الگــوريتمهــاي پيشنهادي، به عنوان دو روش بهينهســازي، از قابليــت بــالايي در حل سريع و مطلـوب ايـن گونـه مـسائل برخوردارنـد. در مقام مقايسه، الگوريتم SA داراي سـرعت همگرايـي بـالاتري نسبت به الگوريتم TS ميباشد در حالي كه الگـوريتم TS، بـا دارا بودن توانايي گريز از بهينه هاي محلي، از كيفيـت جـواب بهتـري نـسبت بـه الگـوريتم SA برخـوردار اسـت. يكـي از راهكارهای قابل بررسي، استفاده از قابلیت‌های این دو روش در قالب یک الگـوريتم تلفيقـي اسـت. بـا تلفيـق ايـن دو روش جستجو و استفاده از نقاط قوت آنها، ميتـوان الگـوريتمهـاي جديدي طراحي كرد كه هم از سرعت بالايي برخوردار باشند و هم جوابهايي با كيفيت مطلوب ارائه كنند.

۷- مراجع

[۱] Mansour, A. G., Motavalli, S., "*A modeling technique for loading and scheduling problems in FMS*" Robotics & Computer Integrated Manufacturing, ۱۹, pp ٤٥-٥٤, ۲۰۰۳.

[۲] Jain, A. S, Meeran, S. "*Theory and application; Deterministic job-shop scheduling: past, present and future*" European journal of operational research , ۱۱۳, pp ۳۹۰-٤۳٤, ۱۹۹۹.

[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, ۱٦۱, pp ۳–۱۰, ۲۰۰٥.

[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 ۱٦۷, pp ۷۷۲–۷۹٥, ۲۰۰٥.

[٥] Teghem, J., Loukil, T., Tuyttens, D., "*Solving multi-objective production scheduling problems using metaheuristics*" European Journal of Operational Research ۱٦۱, pp ٤۲–٦۱, ۲۰۰٥.

[٦] Sourd, F., "*Earliness–tardiness scheduling with setup considerations*" Computers & Operations Research ۳۲, pp ۱۸٤۹–۱۸٦٥, ۲۰۰٥.

[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, ٤٤, pp ۳٥–٤۷, ۲۰۰۲.

[۸] Bard, J.F., "*A heuristic for minimizing the number of tool switches on a flexible machine*" IIE Transactions, ۲۰, pp ۳۸۲-۳۹۱, ۱۹۸۸.

[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, ۱۹۹۹.

[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, ۳٦, pp ۷٦۷-۷۷۷, ۱۹۸۸.

[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, ۱۷۱, pp ۱۸۹-۲۰۷, ۲۰۰٦.

[۱۲] Van Laarhoven, P. J. M., Aarts, E. H. L., *Simulated annealing: Theory and applications*, Kluwer Academic Publishers, ۱۹۹۸.

[۱۳] Glover, F., *Tabu search — Part I*, ORSA Journal of Computing, ۱ (۳), pp ۱۹۰–۲۰٦, ۱۹۸۹.

[۱٤] Ramalingam, S., Peng, Y., and Waston, J., " *Tool life distributions, Part ۳: Mechanism of single injury tool failure and tool life distribution in interrupted cutting*" ASME, Journal of Engineering for Industry, ۱۰۰, pp۱۹۳-۲۰۰, ۱۹۸۷.

زيرنويس ها

۱ Total completion time
۲ Makespan
۳ Sequence-dependent
٤ Keep Tools Need Soonest- KTNS
٥ Transition probability
٦ Cooling schedule