Persian

Using Tabu-Search Algorithm for Multi-Objective Planning in Flexible Manufacturing Systems

6287

A.Sharifinya and F. Kolahan

Mechanical Engineering Group, Mechanical Engineering Department,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Corresponding Author E-mail: Kolahan@ferdowsi.um.ac.ir

Abstract

In this paper, a multi-objective model for simultaneous part sequencing and tool replacement schedule is presented and solved. The main objectives include determining optimal part sequence, tool assignment to machining processes, tool replacement schedule, and number of tool copies for each tool type. These parameters are determined in such a way that the total production cost is minimized. The originality of this research includes using tool reliability, instead of tool life, and considering asymmetric set up times for tool and part scheduling. Since the proposed model falls into combinatorial problems, a Tabu Search (TS) algorithm is used as the solution procedure. Computational results show that the proposed solution technique has a good performance in solving such problems.

Keywords: Tabu Search- Reliability- Optimization- Tool replacement - Part sequencing

اولین کنگره بین المللی (هفتمین کنگره ملی) مهندسی ساخت و تولید ایران
آذرماه ۱۳۸۴ تهران- دانشگاه تربیت مدرس

کاربرد الگوریتم جستجوگر ممنوعه در برنامه‌ریزی چند هدفه سیستمهای تولید انعطاف‌پذیر

احمد شریفی نیا[1]، فرهاد کلاهان[2]
گروه مکانیک- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد
kolahan@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این مقاله مدل چند هدفه برنامه‌ریزی قطعات و ابزارها برای سیستم‌های تولید اتومات، طراحی و حل شده است. در مدل ارائه شده، هدف تعیین بهینه توالی قطعات، تخصیص ابزار مناسب به پروسه‌های ماشینکاری، تعیین زمانبندی تعویض ابزارها و تعداد یدکی مورد نیاز از هر ابزار می‌باشد. مدل ارائه شده بگونه‌ای است که مقادیر این پارامترها بصورت همزمان و بمنظور کمینه کردن هزینه‌های تولید تعیین می‌شوند. نوآوری این تحقیق در استفاده از قابلیت اطمینان، بجای عمر مفید ابزار، و همچنین لحاظ نمودن زمانهای آماده‌سازی و پردازش در تخصیص ابزارها و قطعات است. با توجه به این که مدل ارائه شده در این پژوهش جزء مسائل پیچیده توالی و زمانبندی بشمار می‌رود، برای حل آن از الگوریتم جستجوگر ممنوعه استفاده شده است. نتایج محاسباتی نشان دهنده کارآیی این الگوریتم در حل چنین مسائلی است.

واژه های کلیدی: بهینه سازی- قابلیت اطمینان- تعویض ابزار- توالی قطعات- Tabu Search

۱- مقدمه

در جهان امروز رشد چشمگیر تکنولوژی، تغییرات سریع در محصولات و رقابت شدید در عرصه تولید، باعث شده است که ضرورت نیاز به سیستم‌های تولیدی با کارایی و انعطاف‌پذیری بالا بیش از پیش احساس شود. ماشینهای کنترل عددی (CNC) و سلول‌های تولید اتومات، به عنوان سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر (Flexible Manufacturing Systems-FMS)، می توانند جواب ایده‌آلی برای این مسئله، بخصوص برای محیط‌های تولیدی با ظرفیت کم و تنوع بالا، باشند.

با اینحال اگر چه این سیستم‌ها باعث افزایش انعطاف‌پذیری می‌شوند اما پیچیدگی‌هایی با خود به همراه دارند. هرگونه اشتباه در برنامه‌ریزی و بکارگیری این سیستم‌ها، ممکن است منجر به کاهش راندمان و قابلیت اطمینان تجهیزات و افزایش بی رویه هزینه‌های تولیدی شود. یک مرکز ماشینکاری اتومات (Automated Machining Centre) نیاز به سرمایه‌گذاری زیادی دارد و تنها هنگامی بازگشت سرمایه‌گذاری دارای توجیه اقتصادی است که سیستم با راندمان بالایی بکار گرفته شود. لذا به منظور استفاده بهینه از امکانات و کاهش هزینه‌ها و نیز لزوم پاسخ سریع به تغییر در محصولات، برنامه‌ریزی تولید برای چنین محیط‌هایی اهمیت خاصی پیدا می‌نماید[1]. بطور کلی منظور از برنامه‌ریزی تولید، تعیین بهینه نوع، تعداد، توالی و

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد
۲- استادیار گروه مکانیک

زمان‌های پردازش قطعات با توجه به منابع مورد نیاز و تعهدات تولید است. این امر معمولاً به منظور کاهش هزینه‌های مستقیم تولید و هزینه‌های عدول از تحویل به موقع (Just-in-Time) محصولات صورت می گیرد[2].

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه برنامه‌ریزی تولید و زمانبندی ابزار و قطعات انجام گردیده و معیارهای مختلفی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. کمینه کردن مجموع زمان‌های تکمیل (Total Completion Time)[3]، کمینه کردن گستره کلی زمان تولید (Makespan)[2]، کاهش ریسک ناشی از خرابی ابزارها در حین کار[4] و کمینه کردن تعداد تعویض ابزار[5] از جمله معیارهای در نظر گرفته شده در تحقیقات مرتبط با مسائل زمانبندی بوده است.

با این وجود، در بسیاری از تحقیقات، تنها یکی از این معیارها به عنوان هدف عمده مد نظر قرار گرفته است. در حالیکه در یک سیستم تولید واقعی، عوامل متعددی وجود دارند که بصورت همزمان در عملکرد آن موثرند. بعلاوه، این پارامترها مستقل نبوده و بر یکدیگر نیز تاثیر متقابل دارند. بعنوان مثال، یک توالی مستقل از قطعات، بدون در نظر گرفتن پیش‌بینی مناسب برای زمان تعویض و جایگزینی (Replacement) ابزارها، اجرایی نخواهد بود. تصمیم‌گیری در مورد چگونگی و زمان تولید قطعات می‌بایست با توجه به نیازمندیهای ابزاری و در دسترس بودن آنها صورت گیرد. لذا یک برنامه تولید خوب بایستی شامل برنامه زمانبندی تعویض و جایگزینی ابزارها نیز باشد.

با توجه به آنچه اشاره شد، در این تحقیق، مسئله تعیینِ همزمان توالی قطعات، تخصیص ابزار مناسب به هر پروسه ماشینکاری، تعیین برنامه تعویض ابزارها و نیز تعیین تعداد یدکی مورد نیاز از هر ابزار (بر اساس قابلیت اطمینان ابزار) مدلسازی و حل گردیده است. برای این منظور یک مدل ریاضی چند هدفه طراحی و با استفاده از الگوریتم جستجوگر ممنوعه (Tabu Search-TS) حل شده است. در ادامه، ابتدا تحقیقات انجام شده در مسائل زمانبندی قطعات و مدیریت ابزارها در سیستم‌های تولید اتومات بررسی می‌گردد. سپس ساختار و ویژگی‌های سیستم تولیدی به همراه اهداف مورد نظر تشریح شده و مدل ریاضی مسئله ارائه می‌شود. در بخش بعد، ساختار و چگونگی عملکرد الگوریتم مورد استفاده بصورت خلاصه توضیح داده شده و پارامترهای مهم آن معرفی می‌گردند. در انتها نیز یک مثال عددی از مسئله مورد نظر، ارائه و نتایج محاسباتی آن بحث می‌شود.

۲- مدیریت ابزار در سیستم‌های تولید اتومات

تعویض و جایگزینی ابزارها در طی دوره برنامه‌ریزی ممکن است به سه علت مختلف انجام گیرد: ۱) تغییر نوع پروسه ماشینکاری، ۲) پایان یافتن عمر مفید ابزار و ۳) شکست ناگهانی ابزار. در این میان، شکست ابزار یکی از مهمترین عوامل در کاهش بهره‌وری و افزایش هزینه‌های سیستم‌های تولیدی است. ابزارها معمولا بیش از سایر اجزاء در معرض سایش و خرابی قرار دارند. اطلاعات موجود در محیطهای صنعتی نشان می‌دهد که حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد هزینه‌های ثابت و متغیر تولید در محیطهای ماشینکاری اتومات مربوط به هزینه‌های مرتبط با ابزار است[7]. بنابراین همواره سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان برای ابزارها و تجهیزات در سیستم‌های تولید اتومات بایستی محاسبه و تأمین گردد.

یکی از پارامترهای مهم که در مسائل زمانبندی تعویض ابزار بصورت مؤثری بکار می رود، "عمر ابزار" می‌باشد. عمر مفید ابزار عبارتست از مدت زمانی که ابزار توانایی ماشینکاری قطعاتی با کیفیت قابل قبول را داشته باشد. در محیطهای ماشینکاری اتومات، تعیین عمر ابزارهای برشی از اهمیت خاصی برخوردار است و توانایی پیش بینی مؤثر آن می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش خرابیهای پیش‌بینی نشده در سیستم شود. طی سال‌های اخیر، روابط تجربی زیادی برای بیان عمر ابزار با استفاده از پارامترهای ماشینکاری (سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برشی) ارائه شده است. این معادلات می توانند اثر متغیرهای برشی را نشان دهند، اما قادر به توضیح خصوصیات سایش و عمر ابزار نمی باشند. اما در واقع، عمر ابزار دارای ماهیتی تصادفی و احتمالی است که تحت تاثیر متغییرهای زیادی قرار دارد[8]. بعبارت دیگر، یک ابزار هر زمانی در حین کار ممکن است خراب شود و تنها احتمال خرابی آن، با افزایش زمان کارکرد، افزایش می‌یابد. این امر استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان را بمنظور ارزیابی دقیقتر از وضعیت ابزارها در فرآیندهای ماشینکاری توجیه می نماید. این در حالیست که در بسیاری

از تحقیقات انجام شده در زمینه زمانبندی، معمولاً فرض می‌شود که عمر ابزار یک مقدار قطعی بوده و ابزار در این مدت، در دسترس و کاملاً قابل اعتماد می باشد. در نتیجه از خرابی‌های احتمالی ابزار، بالاخص خرابی‌های در حین انجام عملیات صرفنظر شده است[10].

یکی از مشخصات بارز سیستم‌های تولید اتومات، توانایی انجام پروسه‌های مختلف در یک بازه زمانی مشخص بصورت خودکار و بدون دخالت انسان است. هنگامیکه این سیستم‌ها برای ماشینکاری، مونتاژ یا ساخت بکار گرفته می‌شوند، ابزارهای تولیدی خاصی، با توجه به نوع پروسه در حال انجام، استفاده می‌شوند. این ابزارها میبایست، بر حسب توالی عملیات، در زمان مناسب بر روی دستگاه مورد نظر وجود داشته باشند. بنابراین، مدیریت ابزارها و توالی قطعات دو پارامتر مهم و کاملا وابسته در برنامه ریزی تولید می‌باشند که تأثیر بسزایی بر راندمان و هزینه‌های تولیدی دارند. نقش مدیریت ابزار بخصوص در انتخاب نوع قطعه، گروه ماشین‌ها و مسائل بارگذاری ماشین بیشتر نمایان می‌شود[1].

با این حال در اکثر تحقیقات جاری دو مقوله مهم زمانبندی قطعات و تخصیص ابزارها بطور جداگانه بررسی شده‌اند. این امر دقت و کاربردی بودن بسیاری از نتایج حاصل را محدود مینماید[6]. همچنین در مطالعاتی که این دو مسئله با هم در نظر گرفته شده‌اند، محققان معمولاً از سایر معیارهای عملکرد مؤثر بر هزینه تولید کل، چشم‌پوشی کرده و مسئله زمانبندی را تنها با هدف کمینه کردن تعداد تعویض ابزارها بررسی نموده‌اند[5] که این نیز به نوبه خود می‌تواند از کارآمدی نتایج بدست آمده بکاهد.

همانطور که اشاره شد، در محیط‌های تولیدی پیشرفته، به علت تنوع فراوان قطعات و ابزارها و همچنین وجود معیارها و اهداف مختلف عملکردی، مدلهای برنامه‌ریزی تولید غالبا پیچیده و بزرگ میباشند. ابعاد مسائل واقعی در صنعت باعث شده است روش‌های حل استاندارد عموماً از کارآیی و سرعت عمل لازم برای حل اینگونه مسائل برخوردار نباشند[9]. امروزه، با توسعه امکانات محاسباتی و کامپیوتری، روش‌های ابتکاری از قبیل جستجوگر ممنوعه، الگوریتم ژنتیک، تبرید تدریجی و ... کاربرد وسیعی در حل مسایل بهینه‌سازی تولید یافته‌اند[11]. اصول کار این الگوریتم‌ها ایجاد و ارزیابی مرحله‌ای تعداد محدودی از جواب‌ها، جهت رسیدن به جواب بهینه در زمان‌های قابل قبول است.

۳- تعریف مسئله

در اغلب سیستم‌های انعطاف‌پذیر، قطعات طی یک زمانبندی خاص تولید می‌شوند. زمانبندی تولید به عوامل متعددی وابسته است. از جمله این عوامل می‌توان به موعد تحویل(Due date)، قابلیت‌ها و ظرفیت دستگاهها، ابزارهای موجود و مورد نیاز و همچنین زمان‌های تعویض و آماده‌سازی (Setup) قطعات اشاره نمود. در این پژوهش، سیستم مورد نظر شامل یک واحد تولیدی انعطاف‌پذیر با قابلیت انجام پروسه‌های ماشینکاری مختلف است. تعدادی قطعه، با پروسه تولیدی مشخص، میبایست بر روی سلول مزبور تولید و در موعد مقرر تحویل شوند. در راستای تفکر تولید بموقع (Just-In-Time)، هرگونه عدول از این موعد موجب تحمیل جریمه دیرکرد یا زودکرد خواهد شد. جریمه عدول از تحویل بموقع، بر حسب مقدار انحراف از موعد تحویل، برای هر قطعه بطور جدا محاسبه و منظور می‌گردد.

زمان انجام عملیات ماشینکاری برای هر قطعه معین و مستقل از توالی قطعات است. در مقابل، زمانهای آماده‌سازی قطعات (باز و بست قطعه، تعویض فیکسچر، تنظیم ماشین و ....) وابسته به توالی تولید و تشابه قطعات از نظر فرآیندهای تولیدی می‌باشد. تعدادی ابزار برای انجام عملیات مورد نیاز وجود دارند که برخی از آنها دارای قابلیت‌های مشترک هستند. ولی زمان و هزینه ماشینکاری با ابزارهای مختلف متفاوت بوده و هر پروسه ماشینکاری تنها به یک ابزار قابل تخصیص است.

بدلیل سایش و استهلاک ابزار، با افزایش زمان ماشینکاری امکان شکست و خرابی در حین کار افزایش می یابد. در چنین مواردی معمولا قطعه کار نیز خراب و بلااستفاده شده و هزینه مضاعفی تحمیل میگردد. لذا استفاده از ابزار مستهلک موجب افزایش هزینه خرابی در حین کار میگردد. برای جلوگیری از این مشکل میتوان ابزار را در فواصل زمانی کوتاهتری تعویض نمود. اینکار اگرچه ریسک خرابی در حین کار را کاهش میدهد، ولی مستلزم صرف هزینه ابزار جدید و افزایش زمانهای تعویض

ابزار است. بنابراین تصمیم‌گیری در خصوص برنامه زمانبندی تعویض ابزارهای مستهلک با ابزارهای جدید و تعداد یدکی‌های مورد نیاز می‌بایست با توجه به مجموع هزینه‌ها در هر مورد صورت پذیرد. بعبارت دیگر، ابزار مستعمل هنگامی تعویض می‌شود که مجموع هزینه‌های ماشینکاری با آن بیشتر از هزینه ماشینکاری با ابزار جدید باشد. بمنظور محاسبه هزینه ناشی از ریسک خرابی در حین کار، از مفهوم قابلیت اطمینان (بجای عمر مفید) در ارزیابی وضعیت ابزار استفاده می‌شود.

با توجه به مطالب فوق، در طراحی مدل پیشنهادی در این تحقیق چندین هدف بطور همزمان مد نظر بوده است:

۱) ارائه بهترین توالی تولید قطعات با لحاظ نمودن تعهدات تولید، تشابه عملیاتی قطعات و زمانهای آماده‌سازی بین قطعات؛
۲) تخصیص مناسب ابزار به هر عملیات با توجه به امکان اشتراک ابزار در برخی از پروسه‌های ماشینکاری
۳) تعیین تعداد یدکی‌های مورد نیاز برای هر ابزار؛
۴) تعیین برنامه زمانبندی تعویض ابزارها با توجه به توالی قطعات و قابلیت اطمینان ابزارها.

با تعیین بهینه این متغییرها، مجموع هزینه‌های تولیدی کمینه خواهد شد. هزینه‌های مهم در نظر گرفته شده شامل هزینه ریسک خرابی ابزار و قطعه در حین کار، جریمه عدول از تحویل به موقع، هزینه‌های ماشینکاری، هزینه ابزارهای یدکی، و هزینه‌های مزبوط به آماده‌سازی و تعویض ابزارها و قطعات می‌باشند.

۴- مدل ریاضی ارائه شده

با توجه به توضیحات داده شده، مدل ریاضی برنامه ریزی همزمان توالی قطعات و تخصیص ابزارها را به شکل زیر می‌توان ارائه نمود:

علائم و اختصارات

i	اندیس نوع ابزار $i=1,\ldots, I$
j	اندیس شماره قطعه $j=1,\ldots, J$
$p(s,j)$	عملیات s از قطعه j $s=1,\ldots, S$
a_j	جریمه دیرکرد قطعه j در واحد زمان
b_j	جریمه زودکرد قطعه j در واحد زمان
C	هزینه ماشینکاری در واحد زمان
c	هزینه آماده‌سازی ابزار و قطعه در واحد زمان
T_j	دیرکرد قطعه j
E_j	زودکرد قطعه j
$t_j^{se\text{-}j}$	زمان آماده‌سازی قطعه j
$t_i^{se\text{-}t}$	زمان آماده‌سازی ابزار i
$t^m_{ip(s,j)}$	زمان ماشینکاری عملیات s قطعه j توسط ابزار i
Q_i	هزینه ابزار i
P_j	هزینه قطعه خام
R_{min}	حداقل قابلیت اطمینان
R_{ij}	قابلیت اطمینان ابزار i در پایان عملیات قطعه j، اگر آن در شروع ماشینکاری قطعه j تعویض شده باشد
r_{ij}	قابلیت اطمینان ابزار i در پایان عملیات قطعه j، اگر آن در شروع ماشینکاری قطعه j تعویض نشده باشد

مدل:

$$\text{Min } Z=\sum_i\sum_j\sum_{p(s,j)}((1-y_i)zr_{ip(s,j)}+y_i zR_{ip(s,j)})+ct_{i-1,i}^{se-t}+ct_{j-1,j}^{se-j})+abs(\sum_j(w_j a_j T_j+(1-w_j)b_j E_j)) \quad (۱)$$

Subject to:

$$\sum_i\sum_{p(s,j)}(t_{ip(s,j)}^m+t_i^{se-t})+t_j^{se-j}-d_j\le T_j \quad (۲)$$

$$d_j-\sum_i\sum_{p(s,j)}(t_{ip(s,j)}^m+t_i^{se-t})+t_j^{se-j}\le E_j \quad (۳)$$

$$E_j\ge 0 \quad (۴)$$

$$T_j\ge 0 \quad (۵)$$

$$R_{ip(s,j)}(or\, r_{ip(s,j)})\ge R_{\min} \quad (۶)$$

Where

$$y_i=\begin{cases}1 & if\ \ zR_{ip(s,j)}<zr_{ip(s,j)}\\ 0 & otherwise\end{cases} \quad (۷)$$

$$w_j=\begin{cases}1 & if\ \ tardiness\ \ occure\\ 0 & otherwise\end{cases} \quad (۸)$$

$$zr_{ip(s,j)}=(Q_i+P_j)(1-r_{ip(s,j)})+(Ct_{ip(s,j)}^m r_{ip(s,j)}) \quad (۹)$$

$$zR_{ip(s,j)}=(Q_i+P_j)(1-R_{ip(s,j)})+(Ct_{ip(s,j)}^m R_{ip(s,j)})+Q_i \quad (۱۰)$$

در این مدل، تابع هدف (رابطه (۱))، متشکل از هزینه‌های ماشینکاری، ریسک احتمال خرابی ابزار، آماده‌سازی قطعات و ابزارها و هزینه‌های عدول از تحویل به موقع قطعات می‌باشد.

محدودیت‌های (۲) و (۳) مقادیر مربوط به دیرکرد و زودکرد هر قطعه را تعیین می‌کنند، روابط (۴) و (۵) بیان می‌کنند که دیرکرد و زودکرد مقادیری بزرگتر از صفر داشته و برای هر قطعه، دیرکرد و زودکرد همزمان با هم به وقوع نمی‌پیوندد. مقادیر مربوط به دیرکرد و زودکرد، بکمک متغییر تصمیم صفر و یک رابطه (۸)، جریمه عدول از تحویل بموقع را برای هر قطعه در تابع هدف مشخص می‌نمایند. محدودیت (۶) حداقل سطح قابلیت اطمینان را برای هر پروسه ماشینکاری تضمین میکند. بعبارت دیگر، قابلیت اطمینان ابزار برای هر پروسه نبایستی از یک حد معین کمتر باشد. متغییر صفر و یک در معادله (۷)، عمل تصمیم گیری تعویض ابزار را، بر اساس هزینه‌های مرتبط، مشخص می نماید. روابط (۹) و (۱۰)، هزینه‌های احتمال خرابی در حین کار ابزار و قطعه در صورت استفاده از ابزار مستعمل (رابطه (۹)) یا ابزار نو (رابطه (۱۰)) را محاسبه می‌کنند.

۵- روش حل (جستجوگر ممنوعه)

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی تولید، همچون مسائل زمانبندی قطعات و ابزارها، بطور ذاتی بسیار پیچیده بوده و جزء مسائل سخت بشمار می‌روند که حل آنها به کمک روشهای بهینه‌سازی استاندارد بسیار مشکل و نیازمند زمان محاسباتی زیادی می‌باشد. با پیچیده‌تر شدن سیستمها و مسائل بهینه‌سازی آنها از یک طرف و پیشرفت کامپیوتر و قابلیت‌های محاسباتی از طرف دیگر، امروزه استفاده از روش‌های ابتکاری و جستجوگرهای هوشمند کاملاً متداول گردیده است. در طول چند دهه اخیر، محققان راهکارهای جدید و ابتکاری، برای حل این مسائل با الهام گرفتن از ایده ها و نظریه‌های مربوط به نظم در طبیعت و

سایر پدیده‌های نظام‌مند، در نظر گرفته و بر این اساس الگوریتم‌های متعددی طراحی و پیشنهاد شده‌است[11]. الگوریتم‌های جستجوی بهینه محلی همچون الگوریتم جستجوگر ممنوعه (Tabu Search - TS) بطور گسترده‌ای برای حل این چنین مسائلی بکار می‌رود.

جستجوگر ممنوعه اولین بار توسط گلوور در سال ۱۹۸۶ برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شد[12]. مکانیزم کاری این الگوریتم به این ترتیب است که، جستجوگر از یک جواب قابل قبول مسأله شروع به حرکت نموده و پس از تشکیل و ارزیابی جوابهای 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 می‌نماید [13].

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 می پذیرد. چنین چوابی ممکن است بهتر و یا بدتر از جواب فعلی باشد. مشخصه دوم جستجوگر TS، حافظه کوتاه مدت آن می باشد، که به لیست تابو (Tabu List) معروف است. این لیست شامل تعدادی از حرکتهای اخیر جستجوگر است که اجازه رجوع به آنها در حرکت فعلی وجود ندارد. پس از انجام هر حرکت، جواب فعلی در بالای لیست تابو قرار گرفته و چنانچه لیست پر باشد، قدیمی‌ترین جواب لیست از آن خارج می‌گردد. 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 می‌نماید.

معیارهای مختلفی برای خاتمه جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمان محاسباتی، تعداد حرکتهای انجام شده و کاهش نرخ بهبود تابع هدف در حرکتهای متوالی، از متداول‌ترین معیارهای توقف الگوریتم TS هستند. در طی جستجو بهترین جواب در حافظه نگهداری شده و در انتها بعنوان جواب نهایی ارائه می‌شود. مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد الگوریتم TS، نقطه شروع الگوریتم، مکانیزم تشکیل همسایگی و اندازه لیست ممنوعه می‌باشند. توضیحات مبسوط در مورد ساختار و نحوه کار الگوریتم TS را میتوان در [10], [11] و[12] مطالعه نمود.

۶- ارائه مثال و نتایج محاسباتی

بمنظور تشریح و صحه گذاری مدل پیشنهادی و ارزیابی توانمندی الگوریتم TS، در این قسمت یک مثال عددی شامل زمانبندی ۳۰ قطعه مختلف حل شده و نتایج محاسباتی آن بحث می‌شود. هر یک از این قطعات بطور متوسط دارای ۵ پروسه تولیدی بوده و می‌بایست بر روی یک دستگاه انعطاف‌پذیر ماشینکاری شوند. برای انجام تمامی عملیات ماشینکاری قطعات، در مجموع به ۱۵ نوع ابزار مختلف نیاز است که حداقل قابلیت اطمینان برای کلیه آنها ۹۰٪ در نظر گرفته شده است [14].

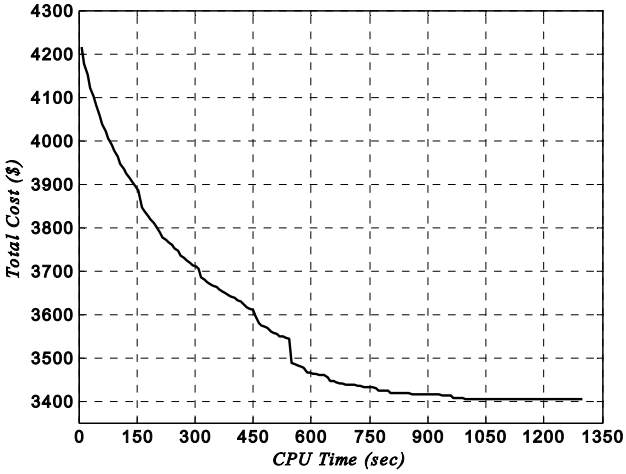
قیمت ابزارها بین ۵ تا ۱۰ واحد، مواد خام قطعات ۱۰۰ تا ۶۰۰ واحد، هزینه آماده‌سازی ۲ واحد بر دقیقه، هزینه ماشینکاری ۳ واحد بر دقیقه، جریمه زودکرد برای هر قطعه ۱ و جریمه دیرکرد نیز بطور متوسط ۱/۸ واحد بر ساعت، همچنین موعد تحویل برای قطعات بین ۸۰ تا ۸۰۰ دقیقه در نظر گرفته شده است.

۶-۱- نتایج محاسباتی توسط الگوریتم TS

مسئله فوق توسط جستجوگر TS و به ازای مقادیر مختلف اندازه لیست تابو و حل گردید. شکل (۱) منحنی پیشروی این جستجوگر را نسبت به زمان، برای بهترین اندازه لیست تابو، نشان می‌دهد. الگوریتم طی زمان حدود۲۰ دقیقه به بهترین جواب دست پیدا می‌کند. در طی مدت جستجو، مجموع هزینه‌های مورد انتظار تولید از حدود ۴۲۱۴ واحد به کمتر از ۳۴۰۴ واحد کاهش یافته که این مقدار مبین ۲۴٪ بهبود در مجموع هزینه‌ها می‌باشد. سرعت همگرایی تابع هزینه و نتایج بدست آمده، حاکی از قابلیت خوب الگوریتم TS در حل مسائل چند هدفه بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید است.

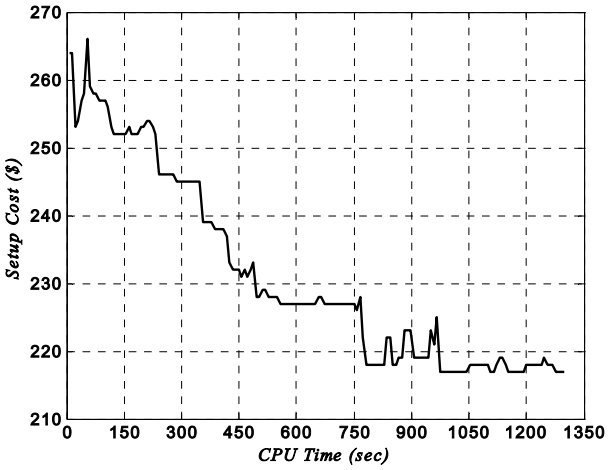
برنامه نهایی تولید شامل توالی قطعات و زمانبندی تعویض ابزارها در جدول (۱) ارائه گردیده است. در اولین ستون از این جدول، توالی بهینه قطعات نشان داده شده و در سطر مربوط به هر قطعه، تخصیص ابزار به پروسه‌های ماشینکاری و نیز زمان

مناسب تعویض ابزار تعیین شده است. آخرین سطر از جدول تعداد یدکی‌های مورد نیاز از هر ابزار را که بایستی درون خشاب ابزار جای داده شوند، مشخص می‌کند. به عنوان مثال، برای ماشینکاری قطعه شماره ۱۵، از ابزارهای ۷، ۹، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ استفاده می‌شود. همچنین برنامه پیشنهاد می‌کند که ابزار ۹، به علت استهلاک ناشی از ماشینکاری قطعه ۱، قبل از شروع ماشینکاری قطعه ۱۵ بایستی با یک ابزار جدید جایگزین شود. در مجموع به ۴ یدکی برای ابزار نوع ۹، احتیاج می‌باشد.



شکل۱- نمودارکاهش هزینه تولید کل

یکی از نکات قابل توجه در مدل‌های برنامه‌ریزی چند هدفه، وابستگی و تأثیر متقابل هزینه‌های فعالیت‌های مختلف به یکدیگر است، و اینکه کاهش در یک یا چند هزینه ممکن است باعث افزایش هزینه‌های دیگر گردد. بنابراین در اینگونه مدلها می‌بایست تمامی فعالیت‌ها را بصورت همزمان در نظر گرفت. این امر باعث می‌شود مجموع هزینه‌های سیستم کمینه گردد. بر حسب اهمیت هزینه‌های مختلف، ممکن است در بعضی از هزینه‌ها بهبود قابل توجهی ایجاد شود و در برخی از هزینه‌ها بهبود زیادی ایجاد نشود و یا حتی باعث افزایش آن گردد. با اینحال این اطمینان حاصل می‌شود که کل هزینه‌های سیستم بهینه شده است. چگونگی افزایش یک مؤلفه هزینه، در هنگام کاهش هزینه‌های کلی تولید را می‌توان در شکل (۲) مشاهده نمود. همانطور که در این شکل نمایان است، منحنی هزینه آماده‌سازی در برخی موارد سیر صعودی دارد و با افزایش هزینه مواجه می‌باشیم در حالیکه نمودار هزینه کل همواره مسیری نزولی را که نمایانگر کاهش هزینه می‌باشد، طی می‌کند.



شکل۲- نمودار هزینه آماده‌سازی

جدول ۱- توالی قطعات و برنامه تعویض ابزارها بدست آمده از الگوریتم TS

	ابزار														
قطعه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
۱	0	0	--	--	--	--	--	--	0	--	0	--	--	0	--
۱۵	--	--	--	--	--	--	0	--	1	--	--	0	0	0	--
۴	0	0	--	0	0	--	--	0	--	--	--	--	--	--	--
۲۷	--	--	--	0	--	--	--	0	0	0	--	0	--	--	--
۱۸	--	0	--	--	0	--	0	--	--	0	--	--	0	--	--
۶	--1------0--00----1------														
۹	--	0	--	--	--	0	--	0	--	--	0	--	--	0	--
۲۲	--	0	--	--	--	0	--	--	0	--	0	0	--	--	--
۲۹	--	--	--	--	0	--	1	1	1	--	--	--	--	--	0
۱۰	--	--	0	--	--	1	0	--	0	1	--	--	--	--	--
۱۱	0	--	--	--	0	--	0	--	--	0	--	0	--	--	--
۱۷	0	0	--	--	--	--	0	--	--	0	--	--	--	--	0
۱۲	1	1	--	--	--	--	--	0	--	--	--	--	0	0	--
۱۴	--	0	--	0	--	0	--	--	0	--	0	--	--	--	--
۲	--	--	0	--	--	0	1	--	1	0	--	--	--	--	--
۵	--	0	--	--	0	--	0	--	0	--	--	0	--	--	--
۸	0	0	--	--	--	--	--	--	--	0	--	0	--	--	0
۱۶	0	--	--	0	0	--	--	--	--	--	1	--	--	--	0
۲۳	0	--	0	0	--	--	--	--	--	0	--	0	--	--	--
۲۰	--	1	--	1	--	--	1	0	--	--	--	1	--	--	--
۷	--	--	0	--	0	--	--	--	0	--	--	0	0	--	--
۱۳	0	--	--	0	--	--	0	--	0	--	--	--	0	--	--
۲۴	--	0	--	--	1	--	1	--	1	--	0	--	--	--	--
۲۸	--	--	--	0	--	--	--	0	0	1	--	--	--	--	0
۲۵	--	0	--	--	--	--	0	--	--	--	--	0	1	--	1
۲۶	1	--	--	--	--	0	0	--	--	0	--	--	--	--	0
۳	0	0	--	0	0	--	--	--	--	--	--	--	0	--	--
۱۹	0	--	0	--	--	0	0	--	--	--	--	--	--	--	0
۲۱	0	--	--	0	--	--	--	0	--	0	--	--	0	--	--
۳۰	--	0	--	--	0	--	--	--	0	--	0	--	0	--	--
مجموع تعداد یدکی	۲	۳	۰	۱	۱	۱	۴	۱	۴	۲	۱	۲	۱	۰	۱

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

۷- بحث و نتیجه‌گیری

امروزه به دلیل تنوع محصولات و لزوم حفظ انعطاف پذیری سیستمهای تولیدی، برنامه ریزی تولید در صنعت اهمیت خاصی پیدا نموده است. بدیهی است عدم وجود برنامه تولید مدون و بهینه، باعث افزایش بی‌رویه هزینه‌ها و اتلافات در مراکز تولیدی می‌شود. در حالی که در اکثر تحقیقات جاری، زمانبندی قطعات و مدیریت ابزارها بطور جداگانه بررسی شده‌اند، در این مقاله این دو مبحث مهم بصورت همزمان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در این راستا، مدل ریاضی چند هدفه، برای یک ماشین تولیدی انعطاف پذیر، ارائه شده و با استفاده از روش TS حل گردید. اهداف مدل شامل تعیین همزمان توالی بهینه قطعات، تخصیص مناسب ابزارها به پروسه‌های ماشینکاری، بدست آوردن تعداد ابزارهای یدکی مورد نیاز بهمراه برنامه زمانبندی تعویض ابزارها برای حداقل نمودن تابع مجموع هزینه‌ها می باشد. در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ابزارها و هزینه ریسک خرابی ناشی از شکست ابزار، در تعیین برنامه جایگزینی ابزارها، از نکات مهمی است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. مدل ارائه شده و نتایج محاسباتی نشان می‌دهند که دو مسئله زمانبندی قطعات و ابزارها در برنامه‌ریزی تولید کاملا وابسته بوده و بر یکدیگر (و بطور کلی بر هزینه‌های تولید) تاثیر متقابل دارند. همچنین با توجه به روند همگرایی الگوریتم و

نتایج محاسباتی، بنظر می‌رسد الگوریتم پیشنهادی، به عنوان یک روش بهینه سازی، از قابلیت بالایی در حل سریع و مطلوب این گونه مسائل برخوردار است.

مراجع

1. Gamila, M. A., Motavalli, S., “A modeling technique for loading and scheduling problems in FMS”, Robotics and Computer Integrated Manufacturing,19, pp 45–54, 2003
2. 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
3. Jeng A.A.K, Lin B.M.T, “ Minimizing the total completion time in single-machine scheduling with step deteriorating jobs” Computers & operation research 32, pp 521-536, 2005
4. Palei, S.M., and Zubarev, P.M., “Optimum tool-change in an FMM to ensure planned output of good parts” Soviet Engineering Research, 61 (2), pp 7-9, 1990
5. 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 & Industrial Engineering, 44, pp 35-47, 2002
6. Bard, J.F., “A heuristic for minimizing the number of tool switches on a flexible machine“ IIE Transactions, 20, pp 382-391, 1998
7. Ayres, R.U. “Future trends in factory automation”, Manufacturing Rev. 1 (2) pp 93–103, 1988
8. D. A. Axinte, W. Belluco, L. De Chiffre, “Reliable tool life measurements in turning- an application of cutting fluid efficiency evaluation”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41 pp 1003–1014, 2001
9. Low Chinyao, Yip Yukling, “ Modeling and heuristics of FMS scheduling with multiple objectives” Computers & operation research, 2004
10. Kolahan, F. “Modeling and analysis of integrated Machine-level planning problems for automated manufacturing ” PhD thesis, mechanical and aeronautical engineering university of Ottawa, 1999
11. Jones, D.F., Mirrazavi, S.K. and Tamiz, M. “Multi-objective meta- heuristic: An overview of the current state-of-the-art,” European Journal of Operational Research 137, pp 1-9, 2002
12. Glover, F., “Tabu search — Part I”, ORSA Journal of computing 1 (3), pp 190–206, 1989
13. Kolahan, F. and Liang, M., "An adaptive TS approach to JIT sequencing with variable processing times and sequence-dependent setups", European Journal of Operational Research 109, pp.142-159, 1998
14. 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, pp 193-200, 1987

Using Tabu-Search Algorithm for Multi-Objective Planning in Flexible Manufacturing Systems

A. Sharifinya, F. Kolahan
Mechanical Engineering Group, Mechanical Engineering Department,
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
kolahan@ferdowsi.um.ac.ir

Abstract
In this paper, a multi-objective model for simultaneous part sequencing and tool replacement schedule is presented and solved. The main objectives include determining optimal part sequence, tool assignment to machining processes, tool replacement schedule, and number of tool copies for each tool type. These parameters are determined in such a way that the total production cost is minimized. The originality of this research includes using tool reliability, instead of tool life, and considering asymmetric set up times for tool and part scheduling. Since the proposed model falls into combinatorial problems, a Tabu Search (TS) algorithm is used as the solution procedure. Computational results show that the proposed solution technique has a good performance in solving such problems.

Keywords: Tabu Search- Reliability- Optimization- Tool replacement - Part sequencing