Industrial Management Journal

Print ISSN: 2008-5885

Online ISSN: 2423-5369

Integrating Process Planning and Scheduling Taking into Account Multiple Objective Using Constraint Planning

Nahid Khorasani

MSc., Department of Industrial Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: n.kh129@yahoo.com

Majid Esmaelian

*Corresponding author, Associate Prof., Department of Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: m.esmaelian@ase.ui.ac.ir

Abstract

Objective: The purpose of this research was to apply various flexibilities including device, tools, direction toward accessing the device (TAD) flexibilities, and considering the qualitative parameters based on the fuzzy inference system for integrated optimization of process planning and scheduling using the Constraint Programming approach.

Methods: There are many approaches to solving IPPS problems. In this research, because of the multitude of existing variables and the complexity of the solution space, limited planning has been used to solve the problem. At first, the qualitative parameters of the model are calculated based on the fuzzy inferencing system and after providing other inputs and solving the problem using limited planning, an optimal answer will be obtained.

Results: To evaluate the efficiency of the integrated model, an example in the literature considering three states of short, medium and long due date time, has been solved using IBM ILOG Cplex optimization studio software.

Conclusion: The results indicated the proper functioning of the limited planning method to obtain optimal solutions in a limited time. In fact, the results of the numerical experiments showed that the proposed model has acceptable performance and the proposed algorithm can efficiently solve IPPS. Finally, we can conclude that it is a very suitable method for integrated optimization of multiple objectives.

Keywords: Integrating process planning and scheduling, Constraint Programming, Process planning, Scheduling, Fuzzy inference system.

Citation: Khorasani, N., Esmaelian, M. (2018). Integrating Process Planning and Scheduling Taking into Account Multiple Objective Using Constraint Planning. *Industrial Management Journal*, 10(4), 677-698. (*in Persian*)

Industrial Management Journal, 2018, Vol. 10, No.4, pp. 677-698

DOI: 10.22059/imj.2019.260052.1007445

Received: June 13, 2018; Accepted: September 18, 2018

© Faculty of Management, University of Tehran

فصلنامه مدیریت صنعتی
شاپا چاپی: ۵۸۸۵-۲۰۰۸
شاپا الکترونیکی: ۵۳۶۹-۲۴۲۳

تلفیق برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی با در نظر گرفتن اهداف چندگانه با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت

ناهید خراسانی
کارشناس ارشد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: n.kh129@yahoo.com

مجید اسماعیلیان
* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: m.esmaelian@ase.ui.ac.ir

چکیده

هدف: هدف این پژوهش، اعمال انعطاف‌های مختلف شامل انعطاف ماشین و ابزار، جهت دسترسی به ابزار (TAD) و در نظرگرفتن پارامترهای کیفی بر اساس سیستم استنتاج فازی به منظور بهینه‌سازی یکپارچه برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی محدویت است.

روش: رویکردهای بسیاری برای حل مسائل IPPS وجود دارد. در این پژوهش، به‌دلیل تعدد متغیرهای موجود و پیچیدگی فضای جواب، از برنامه‌ریزی محدودیت برای حل مسئله استفاده شده است. ابتدا امتیاز پارامترهای کیفی مدل بر اساس سیستم استنتاج فازی محاسبه شد و پس از تأمین سایر ورودی‌ها و حل با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت، جواب بهینه به دست آمد.

یافته‌ها: برای ارزیابی کارایی مدل تلفیقی، مثالی از پژوهش‌های پیشین، با سه حالت زمان تحویل پایین، متوسط و بالا با نرم‌افزار IBM ILOG Cplex حل شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش برنامه‌ریزی محدودیتی برای به دست آوردن جواب‌های بهینه در زمان محدود است. در واقع، نتایجی که از آزمایش‌های عددی به دست آمد، نشان می‌دهد مدل پیشنهاد شده عملکرد قابل قبولی دارد و الگوریتم پیشنهاد شده می‌تواند IPPS را به‌شکل مؤثری حل کند و روش بسیار مناسب برای بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه است.

کلیدواژه‌ها: تلفیق برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی، برنامه‌ریزی محدودیت، برنامه‌ریزی فرایند، زمان‌بندی، سیستم استنتاج فازی.

استناد: خراسانی، ناهید؛ اسماعیلیان، مجید (۱۳۹۷). تلفیق برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی با در نظر گرفتن اهداف چندگانه با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت. *فصلنامه مدیریت صنعتی*، ۱۰(۴)، ۶۷۷- ۶۹۸.

فصلنامه مدیریت صنعتی، ۱۳۹۷، دوره ۱۰، شماره ۴، صص. ۶۷۷- ۶۹۸
DOI: 10.22059/imj.2019.260052.1007445
دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۷
© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

سازمان‌های تولیدی در محیطی قرار گرفته‌اند که از ویژگی‌های آن می‌توان به افزایش فشارهای رقابتی، تنوع در محصولات، تغییر در انتظارات مشتریان و افزایش سطح توقع مشتریان اشاره کرد. برای مقابله با این چالش، تولید یکپارچه کامپیوتری مؤثرترین ابزار به شمار می‌رود و عملکرد اصلی آن ادغام فعالیت در سیستم تولید است. برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی، دو تابع مهم در سیستم تولید هستند که تأثیر عمده‌ای بر تبدیل طراحی محصول به بخش نهایی یعنی آزمون و تصحیح می‌گذارند.

برنامه‌ریزی فرایند، تعیین‌کننده تجهیزات و ابزارهای لازم برای ساخت قطعات و طراحی محصول است. خروجی برنامه‌ریزی فرایند مشخص می‌کند چه مواد خام یا مواد تشکیل دهنده‌ای و همچنین چه فرایندها و عملیاتی برای تبدیل این مواد خام به محصول نهایی نیاز است. به بیان دیگر، برنامه‌ریزی فرایند عبارت است از تعیین مناسب‌ترین و کارآمدترین فرایندهای ساخت و مونتاژ و تعیین توالی آنها برای تولید یک محصول، مطابق با مشخصات مورد نیازی که در مستندات طراحی محصول است (ادیتن[1]، ۲۰۰۷).

در جهان صنعتی، به تولید همچون سلاح رقابتی نگریسته می‌شود. محصولات در حالی که باید بسیار کیفی باشند، تنها زمان کوتاهی در بازار می‌مانند و باید جای خود را به محصولاتی بدهند که با آخرین سلیقه یا نیاز مشتریان سازگارند. بی‌توجهی به خواست مشتری یا قصور در تحویل به‌موقع، بسیار گران تمام می‌شود. بنابراین، برنامه‌های زمان‌بندی، برنامه‌ریزی فرایند را به‌عنوان درون‌داد ورودی خود دریافت می‌کنند و وظیفهٔ آنها زمان‌بندی تمام عملیات روی ماشین‌ها و برآوردن روابط ترجیحی ارائه شده در برنامه‌های فرایند است. به طور سنتی، برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی، کارهای جدا و متوالی‌ای هستند که انجام می‌شوند و زمان‌بندی پس از برنامه‌ریزی فرایند اتفاق می‌افتاد. این روش ساده‌ای است، اما ارتباط متقابلی که بین این دو وجود دارد، سبب بروز مشکلاتی شده است. تعدادی از این مشکلات عبارت‌اند از (کومار و راجوتا[2]، ۲۰۰۳):

- کمبود ماشین‌آلات، خراب شدن آنها و نبود ابزار، از مشکلات متداول در هر کارخانه است که طراح فرایند به آن توجه نمی‌کند.
- طراحی فرایند با این فرض انجام می‌شد که کارخانهٔ ایده‌الی با منابع نامحدود موجود است، بنابراین، همواره ماشین‌های بهتر انتخاب می‌شدند، در حالی‌که در زمان‌بندی، به هر دستگاه تنها یک فعالیت تعلق می‌گیرد.
- همواره تأخیر زمانی بین مرحله طراحی فرایند تا زمان تولید وجود دارد که ممکن است در این حین تغییراتی در خط تولید ایجاد شود.
- معمولاً برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی، اهداف متضادی دارند. هدف برنامه‌ریزی فرایند، تولید با بهترین ابزار و هدف زمان‌بندی، تولید در حداقل زمان و هزینه ممکن است.

یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی (IPPS)[3] راه‌حل مناسبی برای جلوگیری از تحمیل هزینه‌ها و تلاش

1. Adithan
2. Kumar and Rajotia
3. Integration of Process Planning and Scheduling (IPPS)

اضافه نشئت گرفته از این نوع تغییرات، برای بهبود عملکرد سیستم‌هاست. در مطالعه حاضر، سعی بر آن است که با اعمال انعطاف‌های مختلف شامل انعطاف ماشین و ابزار و به منظور دسترسی به ابزار (TAD)[1] و در نظرگرفتن پارامترهای کیفی بر اساس سیستم استنتاج فازی، به بهینه‌سازی یکپارچه برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی محدویت پرداخته شود. اهداف پژوهش پیش رو، کمینه‌سازی هزینه‌های تولید (هزینه‌های استفاده از ماشین و ابزار)، زمان تولید کل قطعات، کمینه‌کردن جریمه‌های زودکرد و دیرکرد، حداکثر بهره‌برداری از ماشین و بیشینه‌کردن مطلوبیت از لحاظ پارامترهای کیفی است.

با توجه به محدودیت‌ها و پارامترهای مؤثر فراوان و تعداد پاسخ‌های ممکن، یافتن پاسخی دقیق و کامل در زمان محدود برای مسئله IPPS بسیار مشکل و گاهی ناممکن به نظر می‌رسد و این گونه مسائل در زمرهٔ مسائل NP-Hard قرار می‌گیرند (کیس[2]، ۲۰۰۳ و خوشنویس و چن[3]، ۱۹۹۱). رویکردهای بسیاری برای حل مسائل IPPS وجود دارد. از جمله این رویکردها، می‌توان به برنامه‌ریزی ریاضی، رویکردهای ابتکاری و فراابتکاری اشاره کرد که در این گونه مسائل سابقه طولانی دارند. رویکردهای فراابتکاری (تکاملی، جست‌وجوی تصادفی) با یک سری راه‌حل ابتدایی آغاز می‌شوند و در ادامه با به‌کارگیری استراتژی‌های جست‌وجو، سعی در پیدا کردن راه‌حل نهایی دارند. این رویکردها در حین جست‌وجو از نقاط بهینه محلی تا حد ممکن دوری می‌کنند (برک و پترویک[4]، ۲۰۰۲ و زیبران[5]، ۲۰۰۷). رهیافت‌های فراابتکاری شامل رهیافت‌های مبتنی بر جمعیت و رهیافت‌های مبتنی بر تک راه‌حل هستند. از جمله رهیافت‌های مبتنی بر جمعیت می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌سازی کلونی مورچه[6]، الگوریتم ممتیک[7] و الگوریتم جست‌وجوی هارمونیک[8] اشاره کرد. همچنین رهیافت‌های مبتنی بر تک راه‌حل شامل الگوریتم‌های جست‌وجوی ممنوع، جست‌وجوی همسایگی متغیر[9] و شبیه‌سازی تبریدی هستند.

امروزه محققان از تکنیک‌های برنامه‌ریزی محدودیت نیز برای حل مسائل زمان‌بندی استفاده می‌کنند (لابوری[10]، ۲۰۱۸). برنامه‌ریزی محدودیت یکی از رویکردهای مهم در حل مسائل ارضای محدودیت به شمار می‌رود. مهم‌ترین مزیت این رویکرد، ارائه توصیف شفاف و دقیق از مسئله همراه با محدودیت‌های آن (روابط میان متغیرها) است. در واقع، این رویکرد ساختار ارضای محدویت مسئله را استخراج می‌کند. هر مسئله ارضای محدودیت، با بیان مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ و دامنه آنها $D = \{d_1, d_2, ..., d_n\}$ و محدودیت اعمال شده بر متغیرهای $C = \{c_1, c_2, ..., c_n\}$، تعریف می‌شود (ماریوت و استاکی[11]، ۱۹۹۸).

حل مسئله ارضای محدودیت، یعنی یافتن تخصیصی برای تمام متغیرها، به گونه‌ای که تمام محدویت‌ها ارضا شوند. مسائل ارضای محدودیت را می‌توان به‌کمک روش‌های جست‌وجوی عمومی سیستماتیک، نظیر روش‌های عمقی یا عمقی تکرارشونده حل کرد، البته راه‌حل‌های بسیاری نیز برای جست‌وجو ابداع شده است که کارایی بیشتری نسبت به

1 Tool Access Direction
2. Kis
3. Khoshnevis and Chen
4. Burke and Petrovic
5. Zibran
6. Ant colony optimization
7. Memetic algorithm
8. Harmony search algorithm
9. Variable neighborhood search
10. Laborie
11. Marriott & Stuckey

این روش‌ها دارند. برخی از این روش‌ها آینده‌نگرند، به این معنا که مقداردهی متغیرها را به گونه‌ای انجام می‌دهند که دیگر نیازی به عقب‌گرد نباشد و در نتیجه در تعداد گام‌های کمتری به جواب برسند. از جملهٔ این الگوریتم‌ها، می‌توان بررسی جلورو[1]، آینده‌نگر جزئی[2] و آینده‌نگر کامل[3] را معرفی کرد (هرالیک و الیوت[4]، ۱۹۸۰). با وجود توانایی‌ها و مزیت‌های بسیار زیاد برنامه‌ریزی محدودیتی، در پژوهش‌های داخلی برای حل مسائل زمان‌بندی، از این تکنیک استفاده زیادی نشده، به همین دلیل در این پژوهش از تکنیک برنامه‌ریزی محدویت برای حل مسئله IPPS استفاده می‌شود.

ادامه مقاله به این صورت ساختاربندی شده است: در بخش دوم پیشینهٔ پژوهش بیان شده و در بخش سوم روش‌شناسی پژوهش و مدل برنامه‌ریزی محدودیت معرفی شده است. در بخش چهارم، به آزمایش مدل با داده‌های موجود در پژوهش پیشین پرداخته شده و در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

پیشینه پژوهش

برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی، هر دو زیرسیستم مهمی در سیستم تولید هستند و عملکرد مکملی دارند. کریسولوریس و همکارانش نخستین محققانی بودند که پیشنهاد اولیه تلفیق برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی را ارائه کردند (کریسولوریس، چن و کوب[5]، ۱۹۸۴). زمان‌بندی سنتی پس از برنامه‌ریزی فرایند اتفاق می‌افتد و معمولاً فرض می‌شود که برای هر کار برنامه فرایند ثابتی وجود دارد. به طور کلی پژوهش‌های IPPS در دو دسته متمرکز شده‌اند: یکی مدل ادغام و یکپارچه‌سازی و دیگری روش پیاده‌سازی. مدل‌های یکپارچه‌سازی IPPS به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند: برنامه‌ریزی فرایند غیرخطی، برنامه‌ریزی فرایند حلقه بسته، برنامه‌ریزی فرایند گسترده (لی، گائو، ژانگ و شائو[6]، ۲۰۱۰ و شائو، لی، گائو و چانگ[7]، ۲۰۰۹).

برنامه‌ریزی فرایند غیرخطی

به طور کلی برنامه‌ریزی فرایند غیرخطی، مدل عمومی در نظر گرفته می‌شود. در این رویکرد برای هر قطعه با در نظرگرفتن انعطاف‌پذیری، چندین برنامهٔ فرایند پیش از رسیدن به بخش تولید ایجاد می‌شود؛ سپس بر اساس معیارهایی مانند زمان ماشین‌کاری یا زمان تولید و غیره رتبه‌بندی شده و در یک پایگاه داده ذخیره می‌شوند. هنگامی که کار تولیدی الزامی است، برنامهٔ آماده‌ای که بیشترین اولویت را دارد، ارائه می‌شود و در صورت مطابق نبودن با وضعیت فعلی خط تولید، برنامه‌ای که اولویت بعدی را دارد، ارائه خواهد شد. از ضعف‌های این مدل می‌توان به افزایش و به نوعی انفجار ترکیبی (جین، جین و سینق[8]، ۲۰۰۶) و کاهش سریع بهره‌وری زمان‌بندی اشاره کرد (لی و همکاران، ۲۰۱۰).

برنامه‌ریزی فرایند حلقه بسته

این نوع برنامه‌ریزی مبتنی بر سیستم برنامه‌ریزی فرایند دینامیکی با سازوکار بازخورد است و در دسترس بودن زمان‌بندی بدون وقفه از طریق بازخورد سیستم زمان‌بندی تولید را تضمین می‌کند. در این رویکرد، بازخورد پویا از زمان‌بندی تولید و

1. Forward checking
2. Partially lookahead
3. Fully look ahead
4. Haralick, Elliott
5. Chryssolouris, Chan, & Cobb
6. Li, Gao, Zhang, & Shao
7. Shao, Li, Gao, Chang
8. Jain, Jain & Singh

وضعیت منابع در دسترس برای تولید برنامه‌های فرایند در نظر گرفته می‌شوند (جو، پارک و چو[1]، ۲۰۰۱). بزرگ‌ترین ضعف این مدل بازتولید برنامه‌ریزی‌های فرایند در هر فاز زمان‌بندی است که علت آن به‌دست آوردن داده‌های زمان واقعی در وضعیت کنونی کارگاه است (فاندن، جین و ورما[2]، ۲۰۱۱).

برنامه‌ریزی فرایند گسترده

برنامه‌ریزی فرایند گسترده متفاوت از دو مدل قبلی است. متدولوژی مدل، فرایند مهندسی هم‌زمان است و در آن هم‌زمانی عملکرد توابع برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی مد نظر قرار می‌گیرد. وظایف به دو فاز مقدماتی و نهایی طبقه‌بندی می‌شوند، در فاز نخست تجزیه و تحلیل فنی برای تعیین ویژگی‌های ماشین‌کاری، روش‌های پردازش و قابلیت‌های دستگاه‌های مورد نیاز، بر اساس طراحی تولید ـ محصول انجام می‌شود و برنامه‌ریزی دقیق‌تر و با جزئیات بیشتر به فاز دوم اختصاص دارد. یکپارچه‌سازی در نقطه‌ای اتفاق می‌افتد که منابع در دسترس‌اند و کار باید انجام شود.

به طور کلی روش‌های حل مسائل IPPS به دو رویکرد مبتنی بر هوش مصنوعی و مبتنی بر الگوریتم دسته‌بندی می‌شود (شائو و همکاران، ۲۰۰۹). در روش پیاده‌سازی مبتنی بر الگوریتم، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند مانند، الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید، ازدحام ذرات و الگوریتم‌های مشابه برای تسهیل در فرایندهای جست‌وجو به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است (لی و کیم[3]، ۲۰۰۱؛ لی و مک‌ماهان[4]، ۲۰۰۷؛ لی، شائو و گائو[5]، ۲۰۰۸ و نصیری و افشاری[6]، ۲۰۱۲). هوش مصنوعی نیز روش مهمی است که برای حل مسائل تلفیق برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی به کار می‌رود (وانگ، شن و هائو[7]، ۲۰۰۶).

یو، ژانگ، چن و ژانگ[8] (۲۰۱۵) در پژوهشی، یک الگوریتم هیبرید GA/PSO را برای حل مسائل IPPS ارائه دادند. ژانگ و وانگ[9] (۲۰۱۸) از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO) برای حل مسئله IPPS استفاده کردند. یو، یانگ و چن[10] (۲۰۱۸) از الگوریتم PSO گسسته برای حل مسائل IPPS استفاده کردند. لی و همکارانش (۲۰۱۸) نیز، برای حل مسائل IPPS از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جست‌وجوی همسایگی استفاده کردند. به گفتهٔ بارزنجی، نادری و بگن[11] (۲۰۱۹)، در تمام روش‌های ارائه‌شده برای حل مسائل IPPS، الگوریتم‌های فراابتکاری و تکاملی (جست‌وجوی تصادفی) مد نظر قرار گرفته و از روش‌های جست‌وجوی ریاضی و دقیق استفاده نشده است. به همین دلیل آنها برای حل مسائل IPPS از الگوریتم تجزیه بندرز[12] استفاده کردند.

در پژوهش‌های اخیر به ملاحظات مرتبط با صرفه‌جویی در مصرف انرژی هنگام حل مسائل IPPS توجهی ویژه‌ای شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش دای، تانگ، شو و لی[13] (۲۰۱۹) و جین، ژانگ و فی[14] (۲۰۱۹) اشاره کرد.

1. Joo, J., Park, S., & Cho
2. Phanden, Jain & Verma
3. Lee, & Kim
4. Li & McMahon
5. Li, Shao, & Gao
6. Naseri & Afshari
7. Wang, Shen & Hao
8. Yu and Zhang
9. Zhang & Wong
10. Yu, Yang, & Chen
11. Barzanji, Naderi, & Begen
12. Logic-based Benders decomposition (LBBD)
13. Dai, Tang, Xu, & Li
14. Jin, Zhang, & Fei

روش‌شناسی پژوهش

برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی به‌صورت توأم نقش بسیار مهمی در کارایی سیستم تولید دارد. برای یافتن طرح فرایند بهینه، باید معیارهای تأثیرگذار در توالی اجرای عملیات روی ماشین‌های موجود با رعایت محدودیت‌های پیش نیاز و عدم تداخل عملیات‌ها روی ماشین و قطعه تعیین شود. علاوه بر اهداف کمی همچون حداقل زمان تکمیل، حداقل زمان دیرکرد و زودکرد و موارد مشابه، ممکن است اهداف کیفی مانند حداکثر سهولت جریان مواد در تعیین برنامه فرایند و زمان‌بندی مد نظر قرار گیرد. در پژوهش حاضر برای دخالت دادن تأثیر پارامترهای کیفی در بهینه‌سازی فرایند، از سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. برمبنای نظریه فازی، برای ارزیابی مطلوبیت یک طرح بهینه فرایند، به فاکتورهای کیفی تأثیرگذار، متغیرهای زبانی اختصاص داده می‌شود. در پژوهش حاضر دو هدف کیفی سهولت تولید و سهولت جریان مواد بین ماشین‌ها مد نظر قرار گرفته است. در دو سیستم استنتاج فازی ممدانی توسعه داده شده، چهار معیار برای متغیر ورودی در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای ورودی سیستم استنتاج فازی پیشنهاد شده، شامل تناسب مشخصه‌های فنی بین ماشین‌ها، سهولت راه‌اندازی، فاصله بین ماشین‌ها و سهولت حمل‌ونقل است. باید توجه داشت که میزان مطلوبیت برنامه فرایند با معیارهای ذکر شده به‌طور قطعی شناسایی نخواهد شد، چرا که ماهیت اساسی مطلوبیت برنامه فرایند دارای عدم قطعیت است. اما در اینجا تلاش شده است که با استفاده از یک سیستم فازی، به هدف مسئله با توجه به معیارهای ذکرشده دست یابیم. مراحل انجام پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات منابع تولید

منابع	علامت اختصاری	هزینه استفاده در هر عملیات(MC)	منابع	علامت اختصاری	هزینه استفاده در هر عملیات(TC)
دستگاه فرز	M۱	۵۰	مته۱	$T_۱$	۶
دستگاه تراش	M۲	۳۰	مته۲	$T_۲$	۵
دستگاه دریل	M۳	۳۵	مته۳	$T_۳$	۱۰
دستگاه سنگ فرز	M۴	۲۰	مته۴	$T_۴$	۱۵
			مته۵	$T_۵$	۱۳
			مته۶	$T_۶$	۱۴
			سمباده	$T_۷$	۱۰
			قلاویز۱	$T_۸$	۱۵
			قلاویز۲	$T_۹$	۲۰
			تیغه الماسه	$T_{۱۰}$	۱۵
			صفحه تراش	$T_{۱۱}$	۱۸
			سنگ مغناطیسی	$T_{۱۲}$	۲۴

پایگاه قوانین سیستم استنتاج شامل قوانین «اگر ـ آنگاه» فازی است که برای تمام متغیرها تعریف می‌شود. بعد از فازی کردن متغیرها و تشکیل پایگاه قوانین به موتور استنتاج نیاز داریم. موتور استنتاج، ورودی‌های قطعی را می‌گیرد و با استفاده از الگوریتم‌های استنتاج، قوانین را استنتاج می‌کند و پس از تجمیع قوانین خروجی و با استفاده از روش غیرفازی‌کننده مرکز ثقل و با توجه به توابع عضویت، خروجی فازی به یک مقدار قطعی تبدیل می‌شود. برای بررسی کارایی مدل پیشنهاد شده، مثالی مشابه پژوهش محمدی، اسماعیلیان و جوکار (۱۳۹۵) شامل دو قطعه با عملیات‌های ماشین‌کاری متفاوت حل شده است. مشخصات تمام ماشین‌ها و ابزارها و هزینه به‌کارگیری آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای ورودی‌های مسئله IPPS، دو قطعه در نظر گرفته شده است. قطعه اول شامل ۱۴ و قطعه دوم شامل ۱۰ عملیات ماشین‌کاری است. مشخصات فنی قطعات در جدول‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است. شایان ذکر است که زمان ماشین‌کاری بستگی به ویژگی‌های ماشین دارد. برای مثال، زمان ماشین‌کاری اولین عملیات قطعه ۱ روی ماشین نخست ۴۵ ثانیه است، در حالی که زمان ماشین‌کاری آن روی ماشین دوم، ۳۸ ثانیه طول می‌کشد.

جدول ۲. مشخصات فنی قطعه ۱

ویژگی ماشین‌کاری	عملیات	انعطاف TAD	انعطاف ماشین	انعطاف ابزار	زمان ماشین‌کاری هریک از ماشین‌ها (S)
F_1	$Oper_1$	-Z	M_1,M_2	T_{10},T_{11},T_{12}	۴۵ , ۳۸
F_2	$Oper_2$	+Z	M_1	T_8,T_{10},T_{11}	۲۵
F_3	$Oper_3$	-Z,-Y	M_2,M_4	T_8,T_{11},T_{12}	۵۲ , ۴۵
F_4	$Oper_4$	+Y,-Z	M_1,M_3	T_9,T_{11},T_{12}	۲۵ , ۳۲
F_5	$Oper_5$	+Y,-Y	M_3	T_7	۴۲
F_6	$Oper_6$	-Z	M_2,M_3	T_1,T_5	۴۲ , ۳۵
	$Oper_7$	-Z	M_2,M_3,M_4	T_9	۴۱, ۳۰ , ۳۶
F_7	$Oper_8$	-Z,-Y	M_1,M_3	T_8,T_{11},T_{12}	۵۶ , ۴۰
F_8	$Oper_9$	+X,-X	M_1,M_3,M_4	T_3	۲۵ , ۳۲ , ۴۲
F_9	$Oper_{10}$	+X,-X	M_1,M_3,M_4	T_4	۵۱ , ۳۶ , ۶۰
F_{10}	$Oper_{11}$	+Y	M_1,M_3	T_6	۶۲ , ۳۵
F_{11}	$Oper_{12}$	+Y	M_2,M_3,M_4	T_1,T_6	۶۰ , ۴۵, ۴۰
F_{12}	$Oper_{13}$	+Y	M_2,M_3	T_9	۴۵ , ۵۲
F_{13}	$Oper_{14}$	A	M_4	T_7	۵۳

جدول ۳. مشخصات فنی قطعه ۲

زمان ماشین‌کاری هریک از ماشین‌ها (S)	انعطاف ابزار	انعطاف ماشین	انعطافTAD	عملیات	ویژگی ماشین‌کاری
۳۵ , ۴۵	$T_{۱۰},T_{۱۱},T_{۱۲}$	$M_{۱},M_{۳}$	-Y,-X	$Oper_{۱}$	$F_{۱}$
۲۰ , ۳۵	$T_{۷},T_{۹},T_{۱۲}$	$M_{۱},M_{۲}$	+Z,+X	$Oper_{۲}$	$F_{۲}$
۴۰ , ۳۵	$T_{۷},T_{۸}$	$M_{۲},M_{۳}$	+Z,+Y	$Oper_{۳}$	$F_{۳}$
۳۶ , ۲۹	$T_{۱۰},T_{۱۱},T_{۱۲}$	$M_{۱},M_{۴}$	+X,-X	$Oper_{۴}$	$F_{۴}$
۴۷ , ۵۰	$T_{۱۰},T_{۱۱}$	$M_{۲},M_{۴}$	+X,-X	$Oper_{۵}$	$F_{۵}$
۴۵ , ۲۵ , ۴۳	$T_{۷}$	$M_{۲},M_{۳},M_{۴}$	-Z,+Z	$Oper_{۶}$	$F_{۶}$
۴۵ , ۵۰	$T_{۷},T_{۹},T_{۱۰}$	$M_{۱},M_{۲}$	-Z	$Oper_{۷}$	$F_{۷}$
۳۶ , ۳۷	$T_{۵},T_{۷},T_{۹},T_{۱۲}$	$M_{۲},M_{۳}$	+X,-X	$Oper_{۸}$	$F_{۸}$
۴۵ , ۴۸ , ۵۹	$T_{۴}$	$M_{۲},M_{۳},M_{۴}$	+X,-X	$Oper_{۹}$	$F_{۹}$
۵۸ , ۶۰, ۴۵	$T_{۲}$	$M_{۱},M_{۳},M_{۴}$	-Z	$Oper_{۱۰}$	$F_{۱۰}$

جدول٤. محدودیت‌های پیش‌نیازی فرایند تولید

شماره قطعه	محدودیت‌های اولویت عملیات
قطعه شماره ۱	Oper۱ نخستین عملیات است. Oper۲ قبل از Oper۴، Oper۵، Oper۱۲ و Oper۱۳ انجام شود. Oper۴ قبل از Oper۶، Oper۷ و Oper۸ انجام شود. Oper۶ قبل از Oper۷، Oper۱۱ و Oper۱۴ انجام شود. Oper۷ و Oper۸ قبل از Oper۱۰ انجام شود. Oper۹ و Oper۱۰ قبل از Oper۱۱، Oper۱۲ و Oper۱۳ انجام شود. Oper۱۰ و Oper۱۱ قبل از Oper۱۳ انجام شود.
قطعه شماره ۲	Oper۱ نخستین عملیات است. Oper۲ و Oper۳ قبل از Oper۵ و Oper۶ انجام شود. Oper۴ قبل از Oper۵ و Oper۷ انجام شود. Oper۵ قبل از Oper۶ انجام شود. Oper۸ قبل از Oper۷ انجام شود. Oper۹ قبل از Oper۸ و Oper۵ انجام شود. Oper۱۰ قبل از Oper۶ انجام شود.

پارامترهای کیفی مؤثر در توالی عملیات پردازشی هر قطعه، شامل تناسب مشخصه‌های فنی بین ماشین‌ها، سهولت راه‌اندازی، فاصله بین ماشین‌ها و سهولت حمل‌ونقل است. توابع عضویت برای دامنه هر متغیر به صورت مثلثی بیان شده و مجموعه مرجع برای تمام پارامترها در بازهٔ [۱۰-۰] در نظر گرفته شده است. تابع عضویت برای خروجی متغیرها نیز به صورت مثلثی بیان شده و مجموعه مرجع آن در بازهٔ [۶-۰] در نظر گرفته شده است. پس از تعیین توابع عضویت، قوانین فازی «اگر ـ آنگاه» نیز برای هر پارامتر جداگانه تعریف شده است. قوانین مربوط به سهولت تولید و سهولت جریان مواد در جدول‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ٥. قوانین فازی سهولت جابه‌جایی

سهولت جابه‌جایی		سهولت حمل و نقل				
		بسیار پایین	پایین	متوسط	بالا	بسیار بالا
فاصله بین ماشین‌ها	بسیار پایین	X	X	X	U	U
	پایین	X	U	U	O	O
	متوسط	X	U	O	I	I
	بالا	U	O	I	E	A
	بسیار بالا	U	O	I	A	A

جدول ٦. قوانین فازی سهولت تنظیم و آماده سازی

سهولت تنظیم و آماده سازی		سهولت راه‌اندازی				
		بسیار پایین	پایین	متوسط	بالا	بسیاربالا
تناسب مشخصه‌های فنی بین ماشین‌ها	بسیار بالا	X	X	X	U	U
	بالا	X	U	U	O	O
	متوسط	X	U	O	I	I
	پایین	U	O	I	E	A
	بسیار پایین	U	O	I	A	A

برای پیاده‌سازی سیستم استنتاج فازی، از نـرم‌افـزار متلـب استفاده شده است. بدین منظور ابتـدا، دو ورودی و یـک خروجی سیستم، فازی‌سازی شده و ۲۵ قانون اگر ـ آنگاه برای هـر یـک از سیسـتم‌هـای اسـتنتاج فـازی تعریف شده‌اند. خروجی سیستم‌های استنتاج فازی به‌ترتیب، میزان درجه سهولت جابه‌جایی ($TrE_{\mathrm{m_k m_l}}$) و میزان درجه سهولت تنظیم و آماده سازی ($SetE_{\mathrm{m_k m_l}}$) بین هر دو ماشین است. خروجی‌های سیستم استنتاج فازی مانند جـدول‌هـای ۷ و ۸ بـه ازای تمام زوج ماشین‌های k وl به‌عنوان ضرایب تابع هدف پنجم مدل برنامه‌ریزی محدودیتی محاسبه شده و مجمـوع آنهـا، مطلوبیت برنامه از لحاظ پارامترهای کیفی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۷. میزان نهایی نزدیکی ماشین‌ها بر اساس سهولت جابه‌جایی

سهولت جابه‌جایی	M۱	M۲	M۳	M٤
M۱	۴/۸۰	۲/۴۸	۳/۸۰	۱/۴۵
M۲	۳/۸۵	۴/۷۵	۵/۳۰	۲
M۳	۳/۹۰	۲/۳۵	۲/۴۵	۲/۶۷
M۴	۲/۳	۲	۲/۷۰	۴/۶۹

جدول ۸. میزان نهایی نزدیکی ماشین‌ها بر اساس سهولت تنظیم و آماده‌سازی

سهولت تنظیم و آماده سازی	M۱	M۲	M۳	M٤
M۱	۲/۵۲	۲/۰۵	۱/۳۵	۱/۵
M۲	۱/۳۵	۱/۵۱	۲/۸۶	۲/۱۲
M۳	۱/۴۵	۲/۳۶	۲/۷۸	۲/۶۰
M۴	۲/۰۰	۲	۱/۸۰	۳/۹۵

برای مسئله تلفیق برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی مفروضات زیر وجود دارد و باید در مدل برنامه‌ریزی محدودیت در نظر گرفته شود. نمی‌توان هم‌زمان دو عملیات را روی یک قطعه انجام داد. در زمان انجام و تکمیل یک عملیات، انقطاع وجود ندارد. در حین انجام کارها، نمی‌توان انصراف داد. مدت زمان آماده‌سازی و مدت زمان پردازش هر کار، مستقل از ترتیب انجام کارهاست. مدت زمان حمل‌ونقل بین ماشین‌ها ناچیز است و ماشین‌ها ممکن است بیکاری داشته باشند. هر ماشین بیش از یک کار را هم‌زمان پردازش نمی‌کند. محدودیت‌های فنی شناسایی شده و تغییرناپذیرند. حالت تصادفی وجود ندارد و ماشین‌ها در دورهٔ برنامه‌ریزی همواره در دسترس‌اند.

با در نظر گرفتن مفرضات مطرح‌شده برای مسئله IPPS ، فرمول‌بندی ریاضی آن در زیر ارائه شده است:

پارامترها

p: شاخص شماره قطعات $p = 1, \dots, NP$

O_P: مجموعه عملیات‌های مربوط به قطعه P

i: شاخص عملیات، $i \in O_P\ ,\ p = 1, \dots, NP$

d: شاخص جهت استفاده از ابزار

t: شاخص ابزار

m: شاخص ماشین $m = 1, \dots, NM$

Pt_i^p: زمان انجام عملیات iام از قطعه pام

$Machine_i$: مجموعه ماشین‌های کاندید برای انجام عملیات iام

TAD_i: مجموعه جهت‌های ممکن برای انجام عملیات iام

$Tool_i$: مجموعه ابزارهای کاندید برای انجام عملیات iام

MC_m: هزینه استفاده از ماشین mام به ازای هر عملیات

TC_t: هزینه استفاده از ابزار tام به ازای هر عملیات

$TrE_{m_k m_l}$: میزان درجه سهولت جابه‌جایی قطعات بین ماشین m_k و m_l

$SetE_{m_k m_l}$: میزان درجه سهولت تنظیم و آماده سازی بین ماشین m_k و m_l

$DueDate_p$: زمان تحویل قطعه pام

متغیرهای تصمیم

$operation^{p}_{imtd}$: اگر عملیات iام قطعه p روی ماشین mام و با استفاده از ابزار tام و جهت dام انجام شود به آن ۱ تعلق می‌گیرد و در غیر این صورت صفر است.

$part^{p}_{ij}$: اگر عملیات jام قطعه p بلافاصله بعد از عملیات iام آن انجام شود، به آن عدد ۱ اختصاص می‌یابد و در غیر این صورت صفر است.

$time^{p}_{i}$: زمان تجمعی انجام عملیات‌های قطعه pام تا تکمیل عملیات iام

M_i: ماشین انجام‌دهنده عملیات iام. $M_i \in Machine_i$

T_i: جهت ابزار استفاده شده برای انجام عملیات iام. $T_i \in TAD_i$

مدل برنامه‌ریزی چند هدفه

رابطهٔ ۱)
$$Min\ D = \left(w_1 \times \frac{Makespane}{G_{MakeSpan}}\right) + \left(w_2 \times \frac{Twp}{G_{Twp}}\right) + \left(w_3 \times \frac{\text{Tardiness}}{G_{\text{Tardiness}}}\right) + \left(w_4 \times \frac{\text{Earliness}}{G_{\text{Earliness}}}\right) - \left(w_5 \times \frac{F}{G_F}\right) - \left(w_6 \times \frac{\text{Utilization}}{G_{\text{Utilization}}}\right)$$

$Subject\ to:$

رابطهٔ ۲)
$$MakeSpan = \underset{\substack{i \in O_p \\ p=1,\ldots,NP}}{Max} (time^{p}_{i})$$

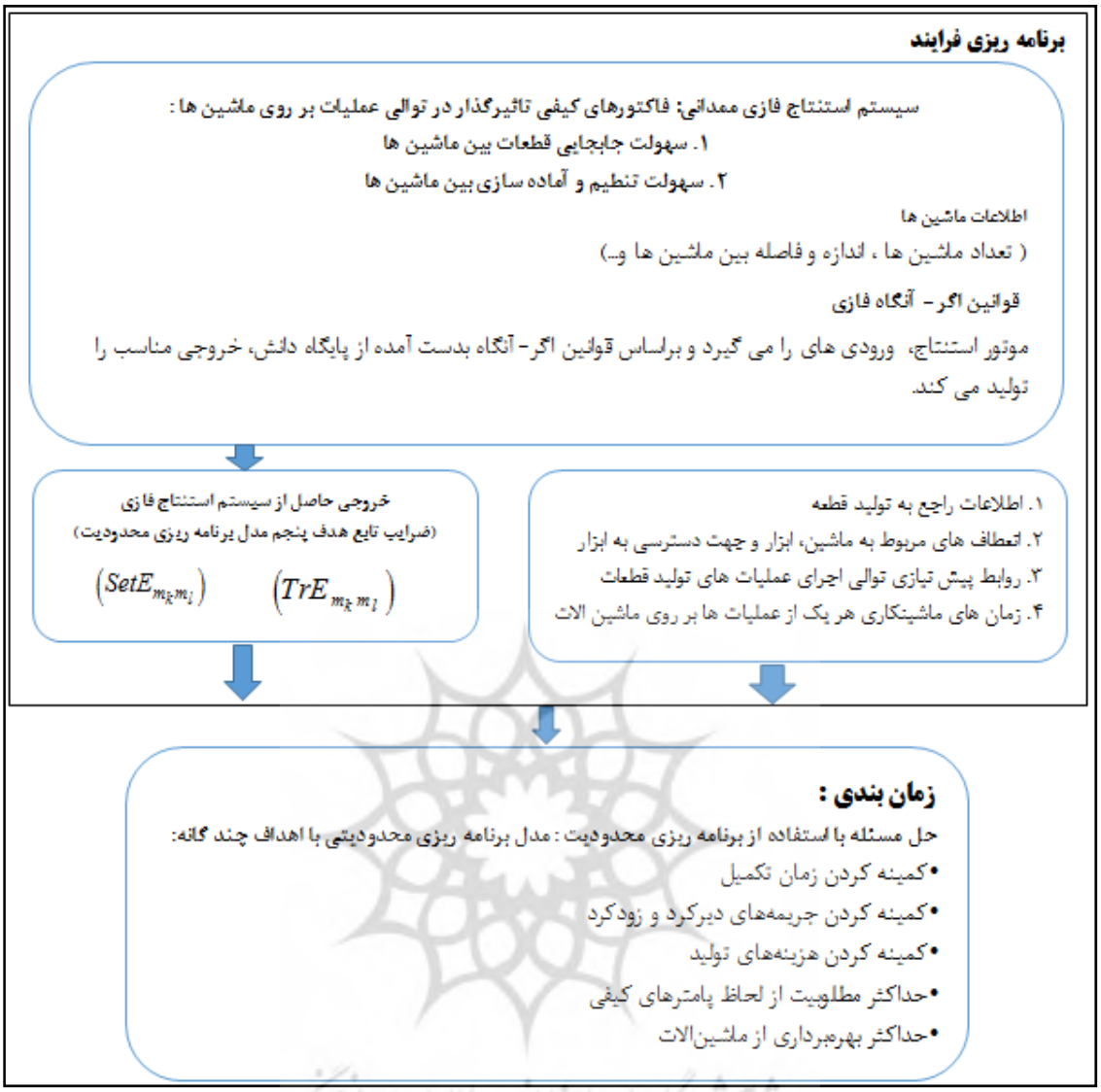
رابطهٔ ۳)
$$TWC = \sum_{i \in O_P} \sum_{m \in Machine_i} \sum_{t \in Tool_i} \sum_{d \in TAD_i} operation^{p}_{imtd} .(MC_{M_i} + TC_{T_i})$$

رابطهٔ ۴)
$$Tardeness_p = Max(0, \underset{i \in O_P}{Max} (time^{p}_{i}) - DueDate_p) \ , \ p = 1,\ldots,NP$$

رابطهٔ ۵)
$$Earleness_p = Max(0, DueDate_p - \underset{i \in O_P}{Max} (time^{p}_{i})) \ , \ p = 1,\ldots,NP$$

رابطهٔ ۶)
$$F = \sum_{p=1}^{NP} \sum_{i,j \in O_P / part^{p}_{ij}=1} (TrE_{M_i,M_j} + SetE_{M_i,M_j})$$

رابطهٔ ۷)
$$Utilization = \frac{\sum_{p=1}^{NP} \sum_{i \in O_P} Pt^{p}_{i}}{MakeSpan * NM} * 100$$



شکل ۱. نمودار روش اجرای پژوهش

مدل برنامه‌ریزی محدودیت

نخستین ایده‌هایی که موجب شکل‌گیری برنامه‌ریزی محدودیت شد، از هوش مصنوعی نشئت گرفته و مربوط به دهه شصت قرن بیستم است. مزیت اصلی برنامه‌ریزی محدودیت این است که تعریف شفاف‌تری از محدودیت‌های یک مسئله خاص بیان می‌کند و ابزاری قوی برای حل مسائل ارضای محدودیت است. مسائل ارضای محدودیت چارچوب واحدی برای مطالعه مسائل مختلف محاسباتی ارائه می‌کنند. مؤلفه‌های اصلی مسائل ارضای محدودیت، متغیرها و محدودیت‌ها هستند. هدف اصلی در حل این گونه مسائل، مقداردهی متغیرهاست، به گونه‌ای که همهٔ محدودیت‌ها تعریف‌شده در مسئله ارضا شوند. مقداردهی متغیرها با استفاده از دامنهٔ تعریف‌شده روی آن متغیر صورت می‌گیرد، همچنین هنگام مقداردهی به متغیرها باید توجه داشت که مقدار همهٔ متغیرها باید با هم سازگار باشند. در این بخش نحوهٔ مدل‌سازی مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیتی تشریح شده است. برای این منظور، مدل CP در نرم افزار

IBM ILOG CPLEX پیاده‌سازی و حل شده است (ای بی ام[1]، ۲۰۱۲). در جدول ۹ نمادهای به‌کار رفته در تعریف متغیرها و محدودیت‌ها ذکر شده است.

جدول ۹. واژگان استفاده شده در تعریف متغیرها و محدودیت‌ها

i: نشان‌دهندهٔ شاخص قطعه است.
m : نشان‌دهندهٔ شاخص ماشین است.
{}=Tasks مجموعه< id, partNo,operNo,{ tadNo},{ machineNo},{ toolNo},{P},{ succs} >را شامل می‌شود.
partNo: معرف شماره قطعه است.
operNo: معرف شماره عملیات هر قطعه است.
{ tadNo }: مجموعه جهت‌های ممکن استفاده از ابزار.
{machineNo}: مجموعه ماشین‌های تولید.
{toolNo }: مجموعه ابزار استفاده شده.
{Pt}: مجموعه‌ای از زمان پردازش برای هر ماشین انتخابی.
{succs }:مجموعه روابط پیش نیازی.
{} =Modes مجموعه چندتایی< Taskid, partNo, operNo, tadNo, machineNo, toolNo , Pt >را شامل می‌شود.
partNo: معرف شماره قطعه می‌باشد که باTasks. partNoبرابر است.
operNo: معرف شماره عملیات هر قطعه می‌باشدکه با Tasks. operNo برابر است.
tadNo: معرف شماره جهت دسترسی به ابزار منتخب است.
machineNo: معرف شماره ماشین منتخب است.
toolNo: معرف شماره ابزار منتخب است.
Pt: زمان پردازش ماشین منتخب را نشان می‌دهد.
DueDate: موعد تحویل
tardiness: جریمه دیرکرد
earliness:جریمه زود کرد
MC: هزینه استفاده از هر ماشین به ازای هر واحد زمانی
TC: هزینه استفاده از هر ابزار به ازای هر واحد زمانی
MF: سهولت تولید
WF: سهولت جریان مواد

در مدل‌سازی برنامه‌ریزی محدودیت از دو عدد متغیر تصمیم بازه‌ای[2] برای تعیین زمان شروع، زمان پردازش و زمان پایان عملیات‌ها، استفاده شده است. متغیر بازه‌ای بر اساس موقعیتی که در مسئله زمان‌بندی دارد و مدت زمانی که خدمت در آن موقعیت به طول می‌انجامد، تعیین می‌شود. مدت سپری‌شده بین زمان شروع و زمان پایان برابر با طول متغیر بازه‌ای است. برخی از توابع به منظور ارتقای ویژگی متغیر بازه‌ای در نظر گرفته می‌شود. برای متغیر بازه‌ای، توابع endOf (زمان تکمیل)، startOf (زمان شروع)، lengthOf (طول یک بازه)، sizeOf (زمان لازم برای کار بدون انقطاع)، presenceOf (تابع صفر و یک است و حضور و عدم حضور متغیر بازه‌ای را نشان می‌دهد) وجود دارد.

رابطهٔ ۷) $\text{dvar interval task}[t \in Tasks]$

از آنجا که زمان شروع و پایان هر عملیات در دو حالت، یکی عدم هم‌پوشانی عملیات هر قطعه و عدم هم‌پوشانی

1. IBM
2. Interval Variable

بین دو عملیات روی یک ماشین، در نظر گرفته شده است، بنابراین متغیر بازه‌ای دیگری به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطهٔ ۸) dvar interval modes[m∈ machine][md∈ Modes] optional size md.Pt

یکی دیگر از شاخصه‌های مهم متغیر تصمیم بازه‌ای این است که می‌تواند اختیاری باشد. از آنجا کـه یـک عملیـات می‌تواند روی تمام ماشین‌ها اجرا شود، هریک از عملیات‌ها به‌صورت optional تعریف شده است تا در صـورت انتخـاب نشدن یک کار، آن فعالیت نیز زمان‌بندی نشود.

متغیر دیگر استفاده شده در مدل محدودیتی، متغیر توالی[1] است. هر توالی دارای تعدادی متغیر بازه‌ای است. در مدل پیشنهاد شده، ماشین‌ها و کارها به‌صورت متغیرهای توالی در نظر گرفته شده‌اند.

رابطهٔ ۹) dvar sequence Machine[m ∈ machine] in all (md∈ Modes) modes[m][md]
types all(md∈ Modes)md.p.id

رابطهٔ ۱۰) dvar sequence Part[i∈ part] in all (m∈ machine,md∈ Modes |
md.partNo == i) modes[m][md] types all(m∈ machine,md∈ Modes |
md.partNo == i) md.machineNo

محدودیت‌های مدل

تابع noOverlap یکی از توابع تعریف‌شده opl است که تضمین می‌کند بین هر دو فعالیـت زمـان‌بنـدی‌شـده روی هـر ماشین تداخل وجود نداشته باشد.

رابطهٔ ۱۱) noOverlap(Machine m); ∀ (m ∈ machine)

- محدودیت زیر تضمین می‌کند که هر ماشین تنها می‌تواند به یک عملیات در یک زمان اختصاص یابد.

رابطهٔ ۱۲) noOverlap(Part i); ∀ (i∈ part)

- در محدودیت زیر تضمین می‌شود که عملیات مختلف یک قطعه نمی‌توانند هم‌زمان پردازش شوند.
  به ازای هر جفت عملیات یک قطعه که دارای رابطه پیش نیاز است، محدودیت زیر اعمال می‌شود:

رابطهٔ ۱۳) endBeforeStart($task_{t1}$, $task_{t2id}$); ∀ (t1∈ Tasks, t2id∈ {t1.succs})

- این محدودیت نشان‌دهندهٔ شرایط عدم توقف است. در این حالت باید یک کـار (محصـول یـا قطعـه)، بـدون هـیچ وقفه‌ای بین ماشین‌آلات پردازش شود. محدودیت تضمین می‌کند که عملیات مختلف یک کـار بـدون هـیچ تـوقفی پردازش شوند.

رابطهٔ ۱۴) startOfNext(Part$_i$, modes$_{m, md}$) - endOf(modes$_{m, md}$) < 1; ∀ (i∈ part,
m∈ machine,md∈ Modes | md.partNo == i)

1. Sequence Variable

تابع هدف

- کمینه‌کردن زمان تکمیل

رابطهٔ ۱۵)
$$makeSpan = \max_{(t \in Tasks)} endOf\ (task_t)$$

- کمینه‌کردن جریمه‌های دیرکرد و زودکرد:

رابطهٔ ۱۶)
$$Tardiness = \sum_{(i \in part)} (tardiness * maxl(0, C_i - DueDate_i))$$

رابطهٔ ۱۷)
$$Earliness = \sum_{(i \in part)} (earliness * maxl(0, DueDate_i - C_i))$$

در روابط ۱۶ و ۱۷ در صورتی که ساخت قطعه زودتر از زمان تکمیل تمام شود، زمان زودکرد و در غیر این صورت زمان دیرکرد در نظر گرفته می‌شود.

- کمینه‌کردن هزینه‌های تولید:

رابطهٔ ۱۸)
$$Twp = \sum_{\substack{(m \in machine \\ , md \in Modes)}} presenceOf\ (modes_{m,\,md}) * ((MC\ (md.machineNo) + (TC\ (md.toolNo))$$

- حداکثر مطلوبیت از لحاظ پارامترهای کیفی:

رابطهٔ ۱۹)
$$F = \sum_{(i \in part)} \sum_{\substack{(md \in Modes \\ md.partNo == i)}} ((MF[md.machineNo, typeOfNext(Part_i, modes_{m,\,md})]) + (WF[md.machineNo, typeOfNext(Part_i, modes_{m,\,md})]))$$

- حداکثر بهره‌برداری از ماشین‌آلات:

رابطهٔ ۲۰)
$$Utilization = \sum_{m \in machine} \sum_{md \in Modes} presenceOf(modes_{m,\,md} * md.Pt) / (makeSpan * machine * 100)$$

و در نهایت تابع هدف به صورت زیر محاسبه شده است:

رابطهٔ ۲۱)
$$Min\ \ Objective = (w_1 \frac{MakeSpan}{G_{MakeSpan}}) + (w_2 \frac{Twp}{G_{Twp}}) + (w_3 \frac{Tardiness}{z3^*}) + (w_4 \frac{Earliness}{z4^*}) - (w_5 \frac{F}{z5^*}) - (w_6 \frac{Utilization}{z6^*})$$

w_iها درجه اهمیت (وزن) هر یک از بخش‌های تابع هدف و مخرج هر کسر نیز مقدار بهینه هر یک از اهداف به صورت تک هدفه است.

یافته‌های پژوهش

پیاده‌سازی مدل برنامه‌ریزی محدودیتی پیشنهاد شده در نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX Optimization Studio انجام گرفت. این برنامه در لپ‌تاپی با پردازشگر Intel core i7-7500u،Ram12 پیاده‌سازی و اجرا شد. در این پژوهش موعد تحویل قطعات، ابتدا با استفاده از رابطه |∑min pt,2∑min pt| به سه بازه کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی شد، سپس در هر بازه به صورت تصادفی یک عدد انتخاب گردید که در جدول ۱۰ ارائه شده است. نتایج نهایی مربوط به اهداف مدل نیز در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود.

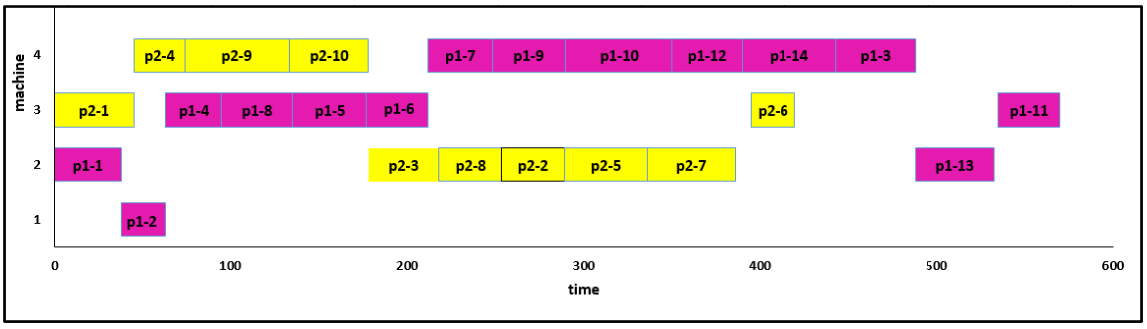
جدول۱۰. زمان تحویل قطعه‌ها

	قطعه ۱	قطعه ۲		قطعه ۱	قطعه ۲
کم	(۴۶۸,۶۲۴)	(۳۵۸,۴۷۷)	→	۵۷۰	۴۲۰
متوسط	(۶۲۴,۷۸۰)	(۴۷۷,۵۹۶)		۶۹۲	۵۰۱
زیاد	(۷۸۰,۹۳۶)	(۵۹۶,۷۱۶)		۷۸۹	۷۱۴

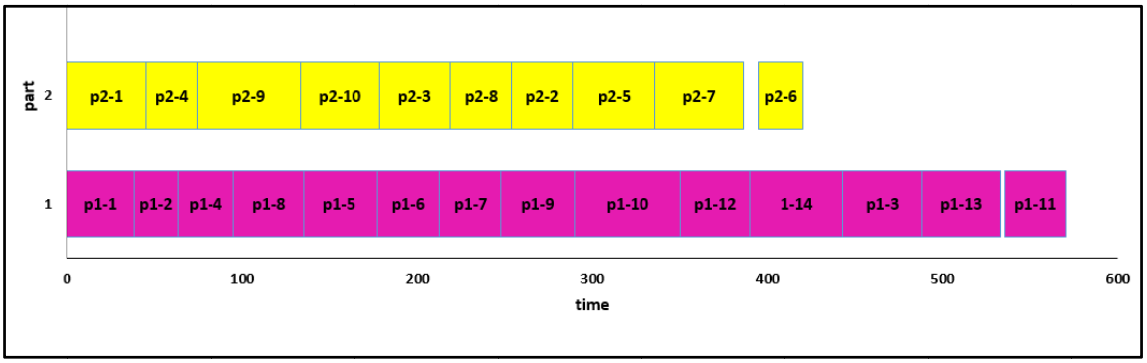
جدول ۱۱. نتایج نهایی مربوط به اهداف مدل

اهداف	زمان اتمام کار	میزان زودکرد	میزان دیرکرد	هزینه تولید	حداکثر بهره‌برداری از ماشین	حداکثر مطلوبیت از لحاظ پارامترهای کیفی
مقدار در حالت موعد تحویل کم	۴۷۰ ، ۵۲۰	۰	۰	۹۸۹	۳۹/۶۶	۱۴۶/۴۳
مقدار در حالت موعد تحویل متوسط	۵۰۱، ۶۹۲	۰	۰	۹۵۹	۲۷/۱۶	۱۴۷/۱۸
مقدار در حالت موعد تحویل زیاد	۷۱۴ ، ۷۸۹	۰	۰	۹۵۹	۲۳/۶۶	۱۴۹

نتایج نهایی حل مدل چندهدفه با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت در حالت موعد تحویل کم روی نمودار گانت نشان داده شده است. در شکل ۲، توالی عملیات ماشین‌ها (محور افقی زمان و محور عمودی ماشین تخصیص داده شده برای هر عملیات را نشان می‌دهد) و شکل ۳، توالی عملیات قطعات نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمودار گانت توالی عملیات ماشین‌ها در حالت موعد تحویل کم



شکل ۳. نمودار گانت توالی عملیات قطعه‌ها

(i: pi-j نشان‌دهندهٔ شماره قطعه و j معرف شماره عملیات است)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، محدودیت‌های پیش‌نیازی رعایت و همچنین ماشین‌ها و عملیات هر قطعه با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند. مدل دارای ۲۰۹۹ محدودیت بوده و با حل آن در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه، در هر سه حالت به جواب بهینه رسیده است. شایان ذکر است که تابع هدف در جهت حداقل‌سازی جریمه‌ها عمل می‌کند، در نتیجه ممکن است به‌دلیل تضاد در محدودیت‌ها، این مقدار به صفر نرسیده باشد، اما در مناسب‌ترین مقدار خود قرار گرفته است.

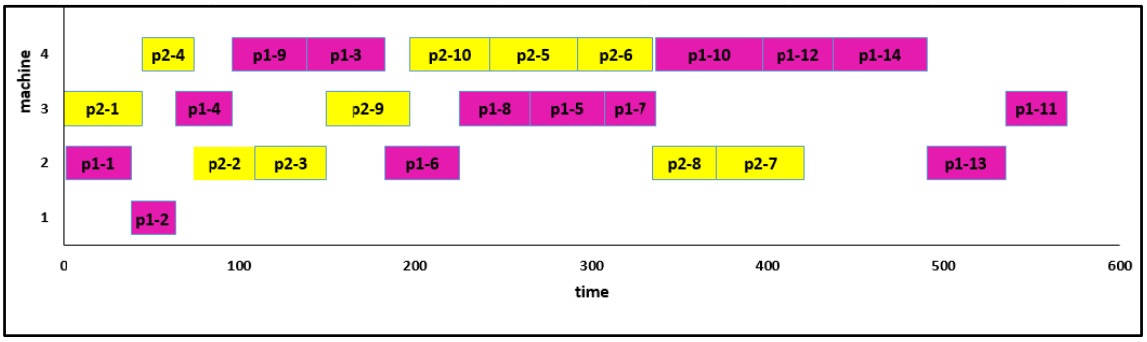
با افزایش موعد تحویل، زمان تکمیل قطعات افزایش و زمان زودکرد و دیرکرد، کاهش می‌یابد. همچنین هزینه‌های تولید کاهش و حداکثر مطلوبیت پارامترهای کیفی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهاد شده عملکرد قابل قبولی دارد و می‌تواند IPPS را به‌طور مؤثری حل کند و این روش برای بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه بسیار مناسب است.

بررسی مدل با فرض عدم توقف

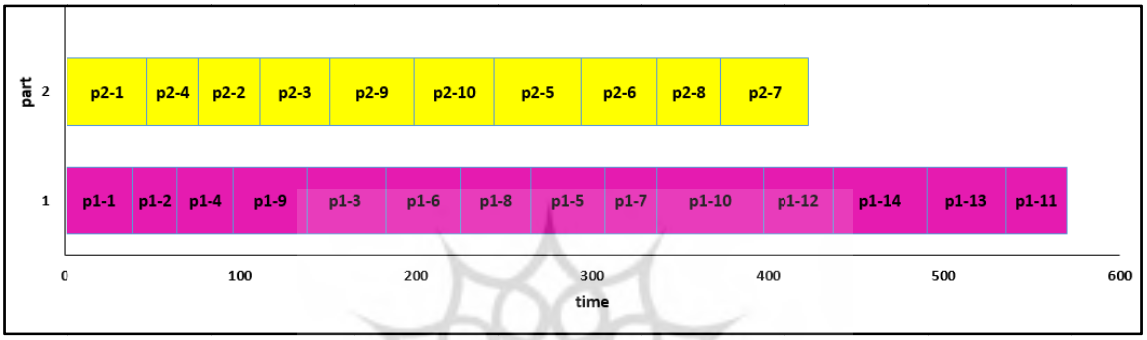
در این قسمت فرض شده است بعد از اتمام عملیات انجام‌شده روی هر قطعه در هر دستگاه، بلافاصله عملیات روی همان قطعه در دستگاه بعدی آغاز شود. زمان موعد تحویل در این مثال برای هر دو قطعه به‌ترتیب ۵۷۰ و ۴۲۰ در نظر گرفته شده است. نتایج نهایی مربوط به اهداف در جدول ۱۲ نشان داده شده است. نمودار گانت توالی ماشین‌ها و قطعه‌ها به‌ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. همان طور که مشخص است، هیچ توقفی بین عملیات هر قطعه وجود ندارد و همچنین محدودیت‌های پیش‌نیازی و عدم هم‌پوشانی رعایت شده است.

جدول ۱۲. نتایج نهایی مربوط به اهداف مدل

اهداف	زمان اتمام کار	میزان زودکرد	میزان دیرکرد	هزینه تولید	حداکثر بهره‌برداری از ماشین	حداکثرمطلوبیت از لحاظ پارامترهای کیفی
مقدار	۵۷۰ ،۴۲۱	۰	۱	۹۸۹	۳۹/۵	۱۳۸/۱۰



شکل ٤. نمودار گانت توالی عملیات ماشین‌ها



شکل ٥. نمودار گانت توالی عملیات قطعه‌ها

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، به مسئلهٔ بهینه‌سازی مدل یکپارچه برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی تولید با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت با اهداف چندگانه و با توجه به تأثیر پارامترهای کیفی بر برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی، پرداخته شد. اهداف مدل شامل کمینه‌سازی هزینه‌های تولید، زمان تولید کل قطعات، کمینه کردن جریمه‌های زودکرد ودیرکرد و حداکثر بهره‌برداری از ماشین و همچنین بیشینه کردن مطلوبیت از لحاظ پارامترهای کیفی است. امتیاز پارامترهای کیفی مدل براساس سیستم استنتاج فازی محاسبه شد و پس از تأمین سایر ورودی‌ها و حل با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت، جواب بهینه به‌دست آمد. همچنین در این پژوهش محدودیت عدم توقف در انجام عملیات‌های یک قطعه نیز در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های عددی نشان می‌دهد مدل پیشنهاد شده عملکرد قابل قبولی دارد و الگوریتم پیشنهاد شده می‌تواند IPPS را به طور مؤثری حل کند و روش بسیار مناسبی برای بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه است. با توجه به بررسی ادبیات موجود در زمینهٔ یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی فرایند و زمان‌بندی، در اندک پژوهشی تأثیر پارامترهای کیفی مؤثر بر برنامه‌ریزی فرایند بر مبنای پایگاه دانش فازی در نظر گرفته شده است و حل مسئله با رویکرد برنامه‌ریزی محدودیت بدیع است. همچنین در هیچ پژوهشی در این زمینه، محدودیت زمان‌بندی بدون توقف در نظر گرفته نشده بود. سیستم‌هایی در صنعت وجود دارند که در آنها یک تأخیر زمانی ثابت بین مراحل الزامی است. این تأخیر ممکن است به دلیل بازرسی و حمل و نقل باشد، از این رو در تحقیقات آتی می‌توان زمان ثابتی را بین اتمام پردازش در هر عملیات و آغاز پردازش در عملیات بعدی در نظر گرفت.

منابع

محمدی زنجیرانی، داریوش؛ اسماعیلیان، مجید؛ جوکار، سعیده (۱۳۹۵). رویکرد یکپارچهٔ زمان‌بندی و برنامه‌ریزی فرایند بـر مبنـای تلفیق پایگاه دانش فازی و روش‌های فراابتکاری. *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۱۴(۴۳)، ۱۳۵– ۱۶۱.

References

Adithan, M. (2007). *Process Planning and Cost Estimation*. Publishing for one world new age international (P) limited, publishers.

Barzanji, R., Naderi, B., & Begen, M. A. (2019). Decomposition algorithms for the integrated process planning and scheduling problem. *Omega*. Available online 10 February 2019 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048318306698.

Burke, E. K., & Petrovic, S. (2002). Recent research directions in automated timetabling. *European Journal of Operational Research*, 140(2), 66-280.

Chryssolouris, G., Chan, S., & Cobb, W. (1984). Decision making on the factory floor: an integrated approach to process planning and scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1*, 315-319.

Dai, M., Tang, D. B., Xu, Y. C., & Li, W. D. (2019). Energy-aware Integrated Process Planning and Scheduling for Job Shops. *In Sustainable Manufacturing and Remanufacturing Management* (pp. 13-36). Springer, Cham.

Haralick, R. M., & Elliott, G. L. (1980). Increasing tree search efficiency for constraint satisfaction problems. *Artificial intelligence*, 14(3), 263-313.

IBM. (2012). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.5 User s Manual.*

Jain, I., Jain, A., & Singh, P. (2006). An integrated scheme for process planning and scheduling in FMS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Tehchnology*, 30(11-12), 1111-1118.

Jin, L., Zhang, C., & Fei, X. (2019). Realizing Energy Savings in Integrated Process Planning and Scheduling. *Processes*, *7*(3), 120.

Joo, J., Park, S., & Cho, H. (2001). Adaptive and dynamic process planning using neural networks. *Journal of Production Research*, 39(13), 2923-2946.

Khoshnevis, B., & Chen, Q. M. (1991). Integration of process planning and scheduling functions. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2(3), 165-175.

Kis, T. (2003). Job-shop scheduling with processing alternatives. *European Journal of Operational Research*, 151(2), 307-332.

Kumar, M. & Rajotia, S. (2003). Integration of scheduling with computer aided process planning. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1-3), 297-300.

Laborie, P. (2018). An update on the comparison of MIP, CP and hybrid approaches for mixed resource allocation and scheduling. In International Conference on the Integration of

Constraint Programming. *Artificial Intelligence and Operations Research* (pp. 403-411). Springer, Cham.

Lee, H., & Kim, S. (2001). Integration of process planning and scheduling using simulation based genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18*, 586-590.

Li, W., & McMahon, C. (2007). A simulated annealing –based optimization approach for integrated process planning and scheduling. *Journal of Computer Integrated Manufacturing, 20*, 80-95.

Li, X., Gao, L., Zhang, C., & Shao, X. (2010). A review on Integrated Process Planning and Scheduling. *Journal of Manufacturing Research, 5*,161-180.

Li, X., Shao, X.Y., & Gao, L. (2008). Optimization of flexible process planning by genetic programming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 38(1-2), 143-153.

Marriott, K. & Stuckey, P. J. (1998). Programming with constraints: an introduction. MIT press.

Mohamadi, D., Esmaelian, M., & Jokar, M. (2015). Integrated Approach of Planning and Scheduling Based on Combining Fuzzy Knowledge Base and MetaHeuristic Method. *journal of Industrial Management Studies*, 14(43), 135-161. (*in Persian*)

Naseri, M., & Afshari, A. (2012). A hybrid genetic algorithm for integrated process planning and scheduling problem with precedence constraints. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1-4), 273-287.

Phanden, R.K., Jain, A., & Verma, R. (2011). Integration of process planning and scheduling: a state-of-the-art review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 24*(6), 517-534.

Shao, X., Li, X., Gao, L., Chang, C. (2009). Integration of process planning and scheduling–A modified genetic algorithmbased approach. *Computers & Operations Research*, 36(6), 2082-2096.

Wang, L., Shen, W., & Hao, Q. (2006). An overview of distributed process planning and its integration with scheduling. *International Journal of Computer Applications in Technology, 26*, 3-14.

Yu, M. R., Yang, B., & Chen, Y. (2018). Dynamic integration of process planning and scheduling using a discrete particle swarm optimization algorithm. *Advances in Production Engineering & Management*, 3(3), 279-296.

Yu, M., Zhang, Y., Chen, K., & Zhang, D. (2015). Integration of process planning and scheduling using a hybrid GA/PSO algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1-4), 583-592.

Zhang, S., & Wong, T. N. (2018). Integrated process planning and scheduling: an enhanced ant colony optimization heuristic with parameter tuning. *Journal of Intelligent Manufacturing, 29*(3), 585-601.

Zibran, M. F. (2007). *A multi-phase approach to university course timetabling. Lethbridge, Alta.* University of Lethbridge, Faculty of Arts and Science.