



Mathematical Modeling of Setup Planning Rules in the Permutation-Based Setup Planning



ARTICLE INFO

Authors

Manafi D.¹,
Nategh MJ.^{1*}

¹ Mechanical Engineering Department,
Tarbiat Modares University, Tehran,
Iran.

* Correspondence

Address: Mechanical Engineering
Department, Tarbiat Modares
University, Tehran, Iran.
Nategh@modares.ac.ir

How to cite this article

Manafi D, Nategh MJ. Mathematical
Modeling of Setup Planning Rules in the
Permutation-Based Setup Planning.
Modares Mechanical Engineering.
Proceedings of 2nd Iranian National
Conference on Advanced Machining
and Machine Tools (CAMMT).
2022;22(10):167-171.

ABSTRACT

Computer-aided process planning is one of the challenges for researchers to achieve computer-integrated manufacturing, and setup planning is the core of the CAPP system. Based on the literature survey, it has been observed that researchers use different methods for setup planning, and there is a lack of mathematical models in their methods. However, the mathematical model is necessary to implement and develop the setup planning method. Therefore, in this paper, the permutation-based setup planning was selected to determine the setups, and then the setup planning rules were cast into the mathematical model. Finally, the mathematical model is implemented and evaluated in MATLAB software to ensure the accuracy of this model.

Keywords Process Planning, Setup planning, Machining Sequence, Mathematical Modelling

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین کاری و ماشین های ابزار پیشرفته.
مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۱۶۷-۱۷۱.



مدل سازی ریاضی قوانین تعیین ستاپ ها در روش طرح ریزی ستاپ برپایه جایگشت



چکیده

مشخصات مقاله

طرح ریزی فرایند به کمک رایانه یکی از چالش های پیش روی محققین برای دستیابی به سامانه ای یکپارچه تولیدی است که هسته ای اصلی آن طرح ریزی ستاپ ها است. با بررسی پیشینه پژوهشی، مشاهده شد که محققین از روش های مختلفی برای طرح ریزی ستاپ استفاده و برای روش های پیشنهادی خود، کمتر مدل ریاضی بیان کرده اند. این در حالی است که برای پیاده سازی و توسعه روش طرح ریزی ستاپ، وجود مدل های ریاضی ضروری است. از این رو در این مقاله روش طرح ریزی ستاپ برپایه جایگشت برای تعیین ستاپ ها انتخاب و سپس قوانین لازم برای تعیین ستاپ ها بصورت مدل های ریاضی درآورده شده است. در نهایت مدل ریاضی در نرم افزار متلب پیاده سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است تا از صحت این مدل اطمینان به عمل آید.

نویسنده ها

داود منافی^۱
محمد جواد ناطق^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، گروه
ساخت و تولید، دانشگاه تربیت
مدرس، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول

آدرس:

Nategh@modares.ac.ir

کلیدواژه ها طرح ریزی فرایند، طرح ریزی ستاپ، توالی ماشین کاری، مدل ریاضی

۱- مقدمه

طرح‌ریزی ستاپ هسته‌ای اصلی طرح‌ریزی فرایند به‌کمک رایانه است که از یک سری قوانین برای تعیین ستاپ‌ها پیروی می‌کند. از مهمترین قوانین طرح‌ریزی ستاپ‌ها می‌توان به یکسان بودن راستای ابزار و ماشین‌ابزار فیچرهای درون یک ستاپ، رعایت قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی اشاره کرد [1,2].

برخی پژوهشگران روشی برای طرح‌ریزی ستاپ پیشنهاد کرده‌اند. برای نمونه ژانگ و همکاران [3] از روش تئوری گراف برای طرح‌ریزی ستاپ‌ها بهره جستند. همچنین سان و همکاران [4] سعی کردند این روش را بهبود و برای یکپارچه‌سازی با طرح‌ریزی قیدوبند استفاده کنند. منافی و ناطق [5] از روش جایگشت برای تعیین ستاپ‌ها و توالی ماشین‌کاری آنها استفاده کردند. در این روش طرح‌ریزی ستاپ مرحله مرحله انجام شده و قوانین طرح‌ریزی ستاپ در هر مرحله اعمال می‌شود.

برخی دیگر نیز به بیان قوانین طرح‌ریزی ستاپ پرداخته‌اند که می‌توان به کار سورماز و خوشنویس [6] اشاره کرد. آنها روی تداخل تکنیکی فیچرها مطالعه کردند و سه الگوریتم برای بکارگیری تداخل تکنیکی فیچرها برای تعیین توالی فیچرها پیشنهاد دادند. وانگ و همکاران [7] پنج قواعد هندسی براساس حجم ماشین‌کاری فیچرها برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها معرفی کردند و از آنها برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها و ستاپ‌ها استفاده کردند. لی‌بو و وانگ [8] قواعد ماشین‌کاری هندسی و تکنیکی را در قالب عبارات شرطی بیان و از آنها برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها و ستاپ‌ها استفاده کردند. منافی و ناطق [9] روی قواعد ماشین‌کاری هندسی مطالعه و دو قاعده‌ی هندسی جدید که به راحتی قابل شناسایی بود را معرفی کردند.

درمجموع می‌توان بیان کرد که علارغم پیشنهاد روش‌ها و یا قوانین طرح‌ریزی ستاپ، کمتر مشاهده شده است که این قوانین در قالب مدل‌های ریاضی بیان شود. از این رو در این مقاله مدل ریاضی قوانین طرح‌ریزی ستاپ‌ها بیان می‌شود. برای اینکار از روش طرح‌ریزی ستاپ به روش جایگشت بهره گرفته شده است.

۲- طرح‌ریزی ستاپ به روش جایگشت

هدف از طرح‌ریزی ستاپ، تعیین ستاپ‌ها و توالی ماشین‌کاری آنها و فیچرهای درون آنها است. با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون راستای ابزار، ماشین‌ابزار و سیستم قیدوبند، برای ایجاد ستاپ‌ها از قاعده‌ی زیر استفاده می‌شود:

❖ قاعده تعیین ستاپ: فیچرهای درون هر ستاپ باید راستای ابزار، ماشین‌ابزار و سیستم قیدوبند مشترکی داشته باشند.

همچنین برای تعیین توالی ماشین‌کاری ستاپ‌ها و فیچرهای درون آنها از قواعد ماشین‌کاری تکنیکی، هندسی و ستاپ استفاده می‌شود که در جدول ۱ آورده شده است.

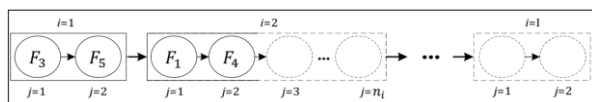
جدول ۱) قواعد ماشین‌کاری برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها و ستاپ‌ها

قواعد تکنیکی	
۱	اگر سطوح تکیه‌گاه یا بست موردنیاز برای ماشین‌کاری فیچر ۱، با ماشین‌کاری فیچر ۲ از بین رود؛ آنگاه فیچر ۱ باید زودتر از فیچر ۲ ماشین‌کاری شود [8].
۲	اگر سطح موردنیاز برای موقعیت دهی ابزار ماشین‌کاری فیچر ۱ با ماشین‌کاری فیچر ۲ از بین رود؛ آنگاه فیچر ۱ باید زودتر از فیچر ۲ ماشین‌کاری شود [10].
۳	اگر سطوحی از فیچر ۱، جزء سطوح مرجع فیچر ۲ باشد؛ آنگاه فیچر ۱ زودتر از فیچر ۲ ماشین‌کاری می‌شود [11].
۴	اگر ماشین‌کاری دو فیچر، باعث ایجاد پلیسه در یکدیگر شوند و حذف پلیسه در فیچر ۱ سخت‌تر از فیچر ۲ باشد؛ آنگاه فیچر ۱ زودتر از ماشین‌کاری می‌شود [6].
۵	فیچری که حجم ماشین‌کاری بیشتری دارد زودتر از ماشین‌کاری می‌شود [7].
قواعد هندسی	
۱	اگر فیچرهای F_1 و F_2 تداخل هندسی سطحی داشته باشند و F_1 فیچر پایه باشد؛ آنگاه فیچر F_1 زودتر از فیچر F_2 ماشین‌کاری می‌شود. فیچر پایه، فیچری است که در آن همه‌ی لبه‌های مشترک در یک سطح فیچر قرار دارد [9].
۲	اگر فیچرهای F_1 و F_2 تداخل حجمی داشته باشند و تعداد سطوح فیچر F_1 بیشتر از تعداد استاندارد سطح آن فیچر باشد؛ آنگاه فیچر F_1 زودتر از فیچر F_2 ماشین‌کاری می‌شود. منظور از "تعداد سطوح تشکیل دهنده‌ی فیچر (NSSF)" تعداد سطوح آن فیچر می‌باشد [9].
قواعد ستاپ	
۱	اگر فیچری از ستاپ A برای ماشین‌کاری مقدم بر فیچر از ستاپ B باشد؛ آنگاه ستاپ A زودتر از ستاپ B ماشین‌کاری می‌شود [8].
۲	در صورتی که دو ستاپ A و B اولویت ماشین‌کاری نداشته باشند و حجم ماشین‌کاری ستاپ A بیشتر از حجم ماشین‌کاری ستاپ B باشد؛ آنگاه ستاپ A زودتر از ستاپ B ماشین‌کاری می‌شود [8].

شمای کلی طرح‌ریزی ستاپ به روش جایگشت در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن N_{SU} ستاپ و درون ستاپ i ام n_i فیچر وجود دارد. در شکل ۱ طرح‌ریزی ستاپ تا مرحله‌ی که خطوط پیوسته است انجام شده و بقیه مراحل (خطوط خط چین) هنوز انجام نشده است. در این روش طرح‌ریزی ستاپ مرحله به مرحله انجام می‌شود؛ درنتیجه ستاپ‌ها در صورت نیاز براساس فیچر آماده‌ی ماشین‌کاری ایجاد می‌شود. منظور از ایجاد ستاپ برپایه فیچر آماده‌ی ماشین‌کاری این است که راستای ابزار ستاپ آن براساس راستای ابزار فیچر آماده‌ی ماشین‌کاری تعیین شود.

هر ستاپ بصورت مجموعه SU_i تعریف می‌شود که دارای مجموعه فیچرهای ماشین‌کاری (SF_i)، راستای ابزار (ST_i) و ماشین‌ابزار (SMT_i) است. مجموعه فیچرهای ستاپ i ام شامل فیچرهایی است که در آن ستاپ به همان توالی که در مجموعه قرار دارند ماشین‌کاری می‌شوند.

$$SU_i = \{SF_i, ST_i, SMT_i\} \quad (1)$$



شکل ۱) شمای کلی طرح‌ریزی ستاپ برپایه جایگشت

۳-۱- مدل ریاضی اطلاعات قطعه کارها

اطلاعات ورودی، قطعه کار طراحی شده (WP_D) به همراه اطلاعات تولیدی و قطعه کار خام ماشین کاری (WP_R) است. قطعه کار طراحی شده شامل اطلاعات توپولوژی (سطح، لبه و رؤس) و تولیدی (اندازه ها، ماده، صافی سطح و غیره) است که به صورت مجموعه زیر تعریف می شود:

$$WP_D = \{S_D, E_D, V_D, DT_D, GT_D\} \quad (2)$$

در روابط بالا S_D سطوح طراحی، E_D لبه های طراحی، V_D رؤس طراحی، DT اندازه های هندسی و GT تلورانس های هندسی هستند. این اطلاعات طراحی طی فرایند شناسایی فیچرها، تبدیل به مجموعه ای از فیچرهای ماشین کاری می شوند که هر فیچر اطلاعات تولیدی از قبیل سطوح ماشین کاری، راستای ابزار و سطوح مرجع را داراست. در نتیجه قطعه کار طراحی شده تبدیل به مجموعه ای از فیچرها می شوند که در پروسه طرح ریزی فرایند این فیچرها مورد بررسی قرار می گیرند و با ماشین کاری این فیچرها از قطعه کار خام، قطعه کار طراحی شده حاصل می شود. از این رو اطلاعات قطعه کار طراحی شده (WP_D) به اطلاعات تولیدی قطعه کار (WP_M) تبدیل و به صورت زیر تعریف می شود.

$$WP_M = \{F_1, F_2, \dots, F_n, \dots, F_{N_F}\} \quad (3)$$

$$F_n = \{MS_n, TAD_n, GD_n, GT_n, RS_n, MV_n, GR_n, TR_n\} \quad (4)$$

در این روابط F_n فیچرهای ماشین کاری، TAD_n راستای ابزار ماشین کاری فیچر n ام، DT_n اندازه گذاری های هندسی فیچر n ام، GT_n تلورانس های هندسی فیچر n ام، RS_n سطوح مرجع ۳ فیچر n ام، MV_n حجم ماشین کاری فیچر n ام، GR_n قواعد ماشین کاری هندسی فیچر n ام و TR_n قواعد ماشین کاری تکنیکی فیچر n ام است.

همان طور که گفته شده، قطعه کار خام نیز جزء اطلاعات ورودی مسئله است. علاوه بر اطلاعات توپولوژی قطعه کار خام، نیاز است سطوحی که بدون نیاز به ماشین کاری دقت لازم برای جاسازی را دارند (PCLS) نیز مشخص شوند. همچنین ممکن است لازم نباشد همه ی فیچرهای ماشین کاری قطعه کار، ماشین کاری شود در نتیجه همه ی این اطلاعات به صورت مجموعه زیر تعریف شده ست.

$$WP_R = \{S_R, PCLS, NMF\} \quad (5)$$

که در روابط بالا S_R سطوح قطعه کار خام و NMF فیچرهایی است که نیاز به ماشین کاری ندارند.

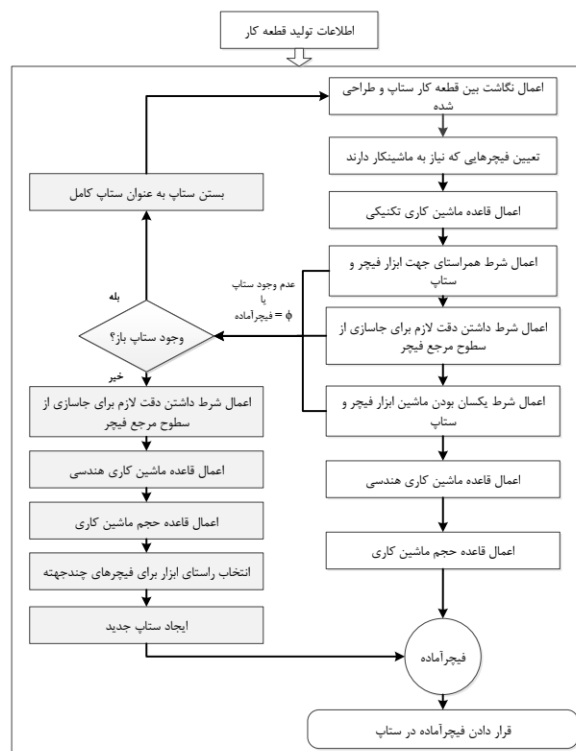
۳-۲- مدل ریاضی قوانین طرح ریزی ستاپ

برای طرح ریزی ستاپ لازم است قوانین بیان شده در فلوچارت شکل ۲ رعایت شود. ابتدا طبق رابطه ی زیر فیچرهایی که در ستاپ n ام و مرحله زام نیاز به ماشین کاری دارند شناسایی می شوند تا براساس این فیچرها، طرح ریزی ستاپ انجام شود.

$$RF = All\ Features - NMF - \bigcup_{x=1}^i SF_x \quad (6)$$

فلوچارت طرح ریزی ستاپ برپایه جایگشت در شکل ۲ نشان داده شده است که این فلوچارت برای هر مرحله از طرح ریزی ستاپ تکرار می شود. در هر مرحله ابتدا نگاهی بین قطعه کار طراحی و ستاپ انجام و فیچرهایی که نیاز به ماشین کاری دارند شناسایی می شوند. با فرض ایجاد شدن ستاپ در مرحله قبل، بین این فیچرها قواعد ماشین کاری تکنیکی، راستای ابزار، داشتن دقت لازم برای جاسازی سطوح مرجع، قواعد ماشین کاری هندسی و حجم ماشین کاری اعمال می شود تا فیچری مشخص شود که مناسب این ستاپ است و درون ستاپ قرار داده می شود (مسیر سمت راست فلوچارت).

در صورتی که با اعمال این قواعد، هیچ فیچری مناسب قرار دادن در ستاپ نباشد؛ آنگاه ابتدا ستاپ فعلی به عنوان ستاپ کامل بسته خواهد شد و اگر ستایی نباشد، ستاپ جدیدی براساس فیچر آماده ایجاد و فیچر آماده درون ستاپ ایجاد شده قرار داده می شود (مسیر سمت چپ فلوچارت).



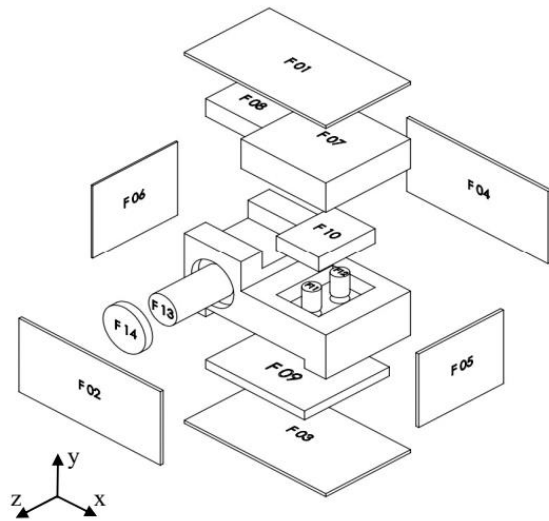
شکل ۲) فلوچارت مرحله زام از ستاپ n ام طرح ریزی ستاپ برپایه جایگشت

۳-۳- مدل ریاضی طرح ریزی ستاپ

برای بیان مدل ریاضی طرح ریزی ستاپ، ابتدا اطلاعات ورودی و سپس قوانین به صورت مدل ریاضی بیان می شود.

۴- ارزیابی مدل

مدل ریاضی در نرم افزار متلب پیاده سازی و از قطعه کار شکل ۳ برای ارزیابی مدل استفاده شده است. طرح ریزی ستاپ قطعه کار حاصل از مدل در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۳ قطعه کار و فیچرهای ماشین کاری

برای اعمال قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی در ستاپ نام و مرحله نام از روابط زیر استفاده می شوند. طبق این روابط فیچرهایی شناسایی می شوند که این قواعد در آنها رعایت شده است و در نتیجه آماده ماشین کاری هستند.

$$RF = \{F_n | n \in \{1, 2, \dots, N\}, TR_n \in NMF \cup \bigcup_{x=1}^i SF_x\} \quad (7)$$

$$RF = \{F_n | n \in \{1, 2, \dots, N\}, GR_n \in NMF \cup \bigcup_{x=1}^i SF_x\} \quad (8)$$

آماده بودن فیچر به لحاظ یکسان بودن راستای ابزار و همچنین ماشین ابزار فیچر با راستای ابزار ستاپ در ستاپ نام و مرحله نام از طرح ریزی ستاپ نیز مطابق دو رابطه زیر تعیین می شود.

$$RF = \{F_n | n \in \{1, 2, \dots, N\}, ST_i \in TAD_n\} \quad (9)$$

$$RF = \{F_n | n \in \{1, 2, \dots, N\}, SMT_i \in CMT_n\} \quad (10)$$

که در رابطه ۱۰ CMT_n ماشین ابزارهای کاندید برای فیچر می باشد. همچنین فیچرهایی که به لحاظ دارا بودن دقت سطوح مرجع برای جاسازی در ستاپ نام و مرحله نام آماده ماشین کاری هستند نیز طبق رابطه زیر تعیین می شوند.

$$RF = \left\{ F_n | n \in \{1, 2, \dots, N\}, RS_n \in \left(PCLS \cup \bigcup_{x=1}^i \bigcup_{y=1}^j MS_{xy} \right) \right\} \quad (11)$$

جدول ۲ طرح ریزی ستاپ بدست آمده برای قطعه کار شکل ۳

$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
$\{F_4\}$	$\{F_2, F_{14}, F_{13}\}$	$\{F_3, F_9\}$	$\{F_1, F_7, F_8, F_{10}, F_{11}, F_{12}\}$
+z	-z	+y	-y

نرم افزار متلب پیاده سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت و از صحت این مدل اطمینان به عمل آمد.

فهرست علائم

ماشین ابزارهای کاندید فیچر نام	CMT_n
مجموعه اندازه های هندسی قطعه کار طراحی شده	DT_D
فیچر ماشین کاری نام	F_n
سطح ماشین کاری	FM
سطح مرجع	FS

۵- نتیجه گیری

پیاده سازی و توسعه روش طرح ریزی ستاپ نیازمند مدل های ریاضی است که با بررسی پیشینه پژوهشی، مشاهده شد که مدل ریاضی برای روش های بیان شده توسط پژوهشگران وجود ندارد. لذا در این مقاله ابتدا مبانی روش طرح ریزی ستاپ برپایه جایگشت بیان و سپس قوانین لازم برای طرح ریزی ستاپ بصورت مدل های ریاضی در آورده شد. در نهایت این مدل در

- 7- Wang L, Cai N, Feng HY, Liu Z. Enriched machining feature-based reasoning for generic machining process sequencing. *International Journal of Production Research*. 2006;44(8):1479-501.
- 8- Liu Z, Wang L. Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning. *Computers in Industry*. 2007;58(4):295-303.
- 9- Manafi D, Nategh MJ. A procedure for planning acyclic setups on the basis of simultaneous sequencing of setups and features. *Int J Adv Manuf Technol*. 2016;84(1):679-90.
- 10- Faheem W, Hayes CC, Castano J, Gaines D. What is a manufacturing interaction. *Proceedings of the 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences* 1998. p. 1-6.
- 11- Zhang YF, Nee AYC, Ong SK. A hybrid approach for set-up planning. *Int J Adv Manuf Technol*. 1995;10(3):183-90.

لبه‌های قطعه کار طراحی	E_D
تلورانس‌های هندسی فیچر nام	GT_n
قواعد ماشین‌کاری هندسی فیچر nام	GR_n
سطوح ماشین‌کاری فیچر nام،	MS_n
حجم ماشین‌کاری فیچر nام	MV_n
تعداد ستاپ	N_{SU}
تعداد کل فیچرهای ماشین‌کاری	N_F
تعداد فیچرهای درون ستاپ nام	n_i
فیچرهایی که نیاز به ماشین‌کاری ندارند	NMF
ماشین‌ابزار ستاپ nام	SMT_i
ستاپ nام	SU_i
سطوح طراحی ستاپ nام	S_D
مجموعه فیچرهای ماشین‌کاری ستاپ nام	SF_i
راستای ابزار ستاپ nام	ST_i
راستای ابزار ماشین‌کاری فیچر nام	TAD_n
قواعد ماشین‌کاری تکنیکی فیچر nام	TR_n
فیچرهای آماده ماشین‌کاری	RF
سطوح رفرنس فیچر nام	RS_n
سطوحی که بدون نیاز به ماشین‌کاری دقت لازم برای جاسازی را دارند	$PCLS$
قطعه‌کار طراحی شده	WP_D
قطعه کار تولیدی	WP_M
قطعه‌کار خام ماشین‌کاری	WP_R
رئوس قطعه کار طراحی	V_D

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان اصول اخلاقی را در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت نموده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط دانشگاه تربیت مدرس تأمین شده است.

مراجع

- 1- Milosevic M, Lukic D, Antic A, Lalic B, Ficko M, Simunovic G. e-CAPP: A distributed collaborative system for internet-based process planning. *Journal of Manufacturing Systems*. 2017;42:210-23.
- 2- Phanden RK, Jain A, Verma R. Integration of process planning and scheduling: a state-of-the-art review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2011;24(6):517-34.
- 3- Zhang Y, Hu W, Rong Y, Yen DW. Graph-based set-up planning and tolerance decomposition for computer-aided fixture design. *International Journal of Production Research*. 2001;39(14):3109-26.
- 4- Sun X, Chu X, Xue D, Su Y, Tang C. An integrated setup/fixture planning approach for machining prismatic parts. *International Journal of Production Research*. 2012;50(4):1009-27.
- 5- Manafi D, Nategh MJ. Integrating the setup planning with fixture design practice by concurrent consideration of machining and fixture design principles. *International Journal of Production Research*. 2021;59:2647-66.
- 6- Sormaz DN, Khoshnevis B. Modeling of manufacturing feature interactions for automated process planning. *Journal of Manufacturing Systems*. 2000;19(1):28-45.