



# بررسی قواعد ماشین کاری هندسی و معرفی روشی بر پایه جایگشت برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها در قطعه‌های منشوری

داود منافی<sup>1</sup>، محمدجواد ناطق<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 143-14115، nategh@modares.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 20 اردیبهشت 1394  
پذیرش: 15 مرداد 1394  
ارائه در سایت: 31 شهریور 1394  
کلیدواژگان:  
طرح‌ریزی فرایند به کمک رایانه  
تعیین توالی ماشین کاری فیچرها  
قواعد ماشین کاری هندسی  
قواعد ماشین کاری تکنیکی  
جایگشت

## چکیده

طرح‌ریزی فرایند به کمک رایانه پلی برای یکپارچه‌سازی سامانه‌های طراحی و تولید به کمک رایانه است که تعیین توالی ماشین کاری فیچرها، یکی از وظایف اولیه آن است. توالی ماشین کاری فیچرها براساس قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی تعیین می‌شود؛ بنابراین در این مقاله سعی شده است قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی و همچنین روش تعیین توالی ماشین کاری فیچرها مورد مطالعه قرار گیرد. ابتدا به برخی از قواعد ماشین کاری تکنیکی اشاره و سپس تداخل‌های هندسی فیچرها بررسی می‌شود. دو قاعده جدید برای تداخل‌های هندسی بیان می‌شود تا توالی ماشین کاری فیچرهای تداخلی مشخص شود. ویژگی این قواعد جدید در استخراج نتایج واحد و شناسایی آسان‌تر آن‌ها توسط سامانه‌های رایانه است، همچنین الگوریتمی برای شناسایی خودکار این قواعد ماشین کاری هندسی بیان می‌شود. در برخی موارد ممکن است مغایرتی بین قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی رخ دهد، که این مغایرت باید در تعیین توالی ماشین کاری فیچرها در نظر گرفته شود. در نهایت الگوریتمی بر پایه روش جایگشت برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها معرفی می‌شود. در این الگوریتم قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی، جداگانه و مرحله به مرحله اعمال می‌شود و در صورت وجود مغایرت بیان شده، این مغایرت به‌طور خودکار شناسایی و رفع می‌شود. الگوریتم‌های بیان شده در برنامه پایتون اوسی‌سی پیاده‌سازی و آزمایش شده است.

## Investigation of Geometrical Rules and Introducing a Method Based on Permutation for Sequencing of Machining Features for Prismatic Parts

Davood Manafi<sup>1</sup>, Mohammad Javad Nategh<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 10 May 2015  
Accepted 06 August 2015  
Available Online 22 September 2015

### Keywords:

Computer-Aided Process Planning  
Feature Sequencing, Geometrical Rules  
Technical Rules  
Permutation

## ABSTRACT

Computer-aided process planning (CAPP) is a bridge for integrating computer-aided design (CAD) and computer-aided manufacturing (CAM). One of the basic computer-aided process planning tasks is sequencing of machining features. Sequencing of machining features is determined based on technical and geometrical rules. In this paper, the technical rules, geometrical rules and sequencing of machining features method were discussed. At first, some of the technical rules were pointed. Then, the geometrical interactions were studied and two new geometrical rules were introduced for sequencing the machining features having geometrical interaction. These rules can yield unique results and they are identified easily by the computer systems. Also, an algorithm was introduced for automated application of these geometrical rules in computer systems. The conflict between the technical and geometrical rules that may occur in some cases was studied. This conflict must be considered in the sequencing of machining features methods. Finally, an algorithm was introduced for sequencing of machining features based on permutation. In this algorithm the technical and geometric rules were applied separately and step by step. Any conflict between technical and geometrical rules could be detected automatically in this algorithm. Algorithms were programmed and verified in PythonOCC.

## 1- مقدمه

طرح‌ریزی فرایند به کمک رایانه<sup>1</sup> پلی برای یکپارچه‌سازی طراحی<sup>2</sup> و تولید

به کمک رایانه<sup>3</sup> است [1]. در طرح‌ریزی فرایند، اطلاعات طراحی به دستورالعمل‌های تولیدی تبدیل می‌شود [2]. یکی از وظایف اولیه طرح‌ریزی فرایند، تعیین توالی ماشین کاری فیچرهاست. در تعیین توالی

1- Computer-Aided Process Planning (CAPP)  
2- Computer-Aided Design (CAD)

3- Computer-Aided Manufacturing (CAM)

Please cite this article using:

D. Manafi, M. J. Nategh, Investigation of Geometrical Rules and Introducing a Method Based on Permutation for Sequencing of Machining Features for Prismatic Parts, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 311-319, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ماشین کاری فیچرها، دو فاکتور حائز اهمیت است: رعایت قواعد ماشین کاری و بهینه بودن توالی ماشین کاری فیچرها [3].

در سامانه های طرح ریزی فرایند، قواعد ماشین کاری براساس تداخل های ایجاد شده بین فیچرها تعیین می شوند. تداخل های موجود بین فیچرها به دو دسته تکنیکی و هندسی تقسیم می شوند [4]. در تداخل های هندسی، فیچرها یک سری اطلاعات توپولوژی را به اشتراک می گذارند. درحالی که تداخل های تکنیکی، براساس دانش فنی تعیین می شوند و ممکن است هیچ اطلاعات توپولوژی بین این فیچرها مشترک نباشند.

پژوهش های انجام شده در زمینه تعیین توالی ماشین کاری فیچرها به دو دسته تقسیم می شوند. در دسته نخست به معرفی قواعد ماشین کاری حاکم بین فیچرها پرداخته شده است تا توالی ماشین کاری فیچرها و ستاپ ها تعیین شود. درباره روش های تعیین توالی ماشین کاری فیچرها در دسته دوم بحث شده است.

سورماز و خوشنویس [3] تداخل تکنیکی فیچرها را مورد مطالعه و بررسی قرار داده اند و سه الگوریتم برای به کارگیری تداخل تکنیکی فیچرها، جهت تعیین توالی ماشین کاری فیچرها پیشنهاد کرده اند. کیم و همکاران [5] از روش تجزیه حجمی برای شناسایی فیچرها استفاده کرده اند. آن ها قواعد هندسی بین فیچرها را هنگام شناسایی فیچرها، به روش مجموع متناوب حجم قسمت ها<sup>1</sup> تعیین کرده اند. وانگ و همکاران [6] پنج قاعده هندسی براساس حجم ماشین کاری فیچرها برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها معرفی کرده اند. آن ها از این قواعد هندسی برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها و ستاپ ها استفاده کرده اند. لی یو و وانگ [4] به بررسی تعیین توالی فیچرها و طرح ریزی ستاپ ها براساس قواعد ماشین کاری هندسی و تکنیکی پرداخته اند. روش آن ها شامل سه مرحله است: 1) توالی ماشین کاری بین فیچرها را براساس قواعد ماشین کاری تکنیکی تعیین کرده اند. 2) فیچرها را براساس جهت ابزار در یک ستاپ قرار داده اند. 3) پس از طرح ریزی ستاپ ها، توالی ماشین کاری فیچرهای هر ستاپ براساس قواعد ماشین کاری هندسی تعیین شده است. آن ها سه قاعده هندسی برای این کار تعریف کرده اند.

در پژوهش های دسته دوم، هوانگ و میلر [8,7] از مجموع قواعد ماشین کاری هندسی، تفرانسی و سطوح مرجع برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها استفاده کرده اند. آن ها از زنجیره های پیش رونده برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها، و از زنجیره های پس رونده برای اعمال قواعد ماشین کاری بین فیچرها استفاده کرده اند. الگوریتم پیشنهادی آن ها شامل 4 مرحله است: 1) گرفتن اطلاعات مورد نیاز، 2) تعیین قواعد ماشین کاری بین فیچرها برای تعیین توالی ماشین کاری، 3) تعیین توالی ماشین کاری فیچرها و 4) افزودن عملیات ضروری به فیچرها. دجا و همکاران [9] به یافتن بهینه ترین حالت توالی ماشین کاری فیچرها با در نظر گرفتن قواعد ماشین کاری، ماشین ابزار و تابع هدف زمان تولیدی قطعه کار پرداخته اند. آن ها برای نشان دادن قواعد ماشین کاری بین فیچرها، ماتریس قواعد ماشین کاری فیچرها<sup>2</sup> را معرفی و الگوریتمی را برای پیدا کردن بهینه ترین حالت ماشین کاری فیچرها ارائه کرده اند. سریرامولو و همکاران [10] طرح ریزی فرایند را به عنوان مسئله بهینه سازی با در نظر گرفتن تعدادی قید مدل سازی کرده اند. سپس از روش بهینه سازی تجمع مورچگان به حل آن پرداخته اند. آن ها الگوریتم فراابتکاری را برای شناسایی

سریع بهینه ترین توالی ماشین کاری فیچرها توسعه داده اند. لی یو و گیائو [11] از الگوریتم ژنتیک تکرار شونده برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها بهره برده اند. آن ها دو نوع ماتریس برای نشان دادن قواعد ماشین کاری حاکم بین فیچرها استفاده کرده اند. در روش ها آن ها، ابتدا همه توالی ماشین کاری فیچرها برپایه قواعد ماشین کاری فیچرها تعیین می شود. سپس از اطلاعات فیچرها مانند ماشین ابزار، ستاپ و ابزار برش جهت تعیین بهینه ترین توالی ماشین کاری فیچرها استفاده می شود، همچنین در پژوهش های دیگر از الگوریتم ژنتیک [12,14]، منطق فازی [15]، الگوریتم مورچگان [16] و روش های بهینه سازی ترکیبی [17] برای دستیابی به بهینه ترین توالی ماشین کاری فیچرها استفاده شده است.

در کل، می توان بیان داشت که روش های ارائه شده برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها قابل توسعه نیست. به عبارت دیگر نمی توان روش های گفته شده را برای طرح ریزی ستاپ ها و یکپارچه سازی طرح ریزی ستاپ ها با طراحی قیدوبند توسعه داد؛ بنابراین نیاز به روشی است که علاوه بر سادگی، قابل توسعه نیز باشد و بتوان آن روش را برای طرح ریزی ستاپ ها نیز توسعه داد، همچنین در پژوهش های دسته نخست، روش شناسایی قواعد ماشین کاری بیان نشده و در برخی موارد که فیچرها چندجهته است، از یک قاعده ماشین کاری هندسی می توان نتایج متفاوتی به دست آورد؛ بنابراین نیاز به قواعدی است که هم نتایج واحدی از آن ها استنباط شود و هم بتوان به آسانی آن ها را توسط سامانه های رایانه ای شناسایی کرد.

در این مقاله قواعد ماشین کاری هندسی و تکنیکی مطالعه و قواعد ماشین کاری هندسی جدیدی برای تداخل های هندسی بیان می شود تا علاوه بر گرفتن نتایج واحد، بتوان به آسانی و به صورت خودکار آن ها را توسط سامانه های رایانه ای شناسایی کرد، همچنین مغایرتی بین قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی بیان می شود که ممکن است در برخی موارد بین قواعد ماشین کاری رخ دهد. روشی بر پایه جایگشت برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها معرفی می شود که علاوه بر سادگی قابل توسعه نیز باشد. در این روش مغایرت یادشده به طور خودکار شناسایی و رفع می شود. در بخش 2 طرح کلی از سامانه طرح ریزی فرایند بیان می شود. در بخش 3 اطلاعات فیچرهای ماشین کاری و روش شناسایی به کار گرفته شده معرفی می شود. در بخش 4 روی قواعد تعیین توالی ماشین کاری فیچرها بحث می شود که موضوع اصلی در این بخش، قواعد ماشین کاری هندسی است. روش تعیین توالی ماشین کاری فیچرها در بخش 5 آورده شده است. در بخش 6، روش تعیین توالی ماشین کاری فیچرها روی یک قطعه کار آزمایش شده است. در نهایت نتایج حاصل از پژوهش در بخش 7 آورده شده است.

## 2- طرح کلی از سامانه طرح ریزی فرایند

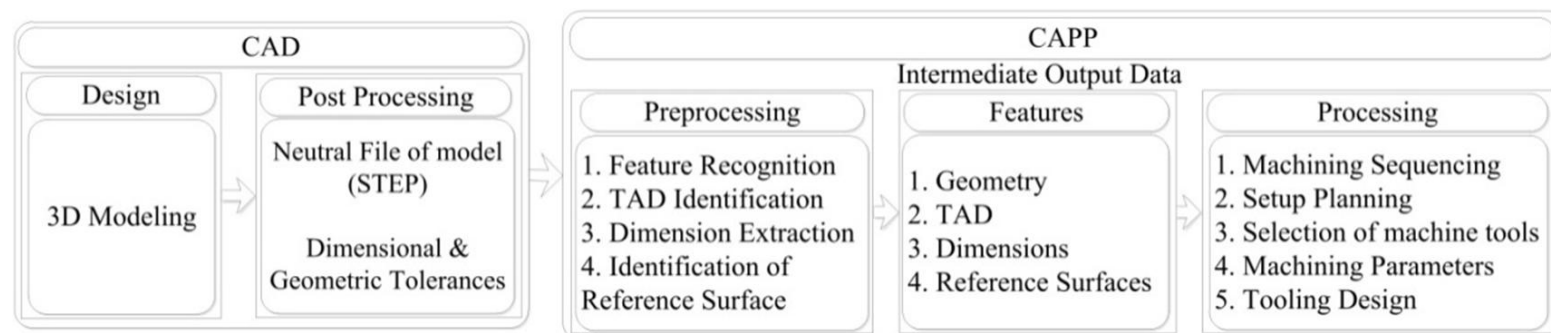
برای ایجاد سامانه های یکپارچه تولیدی<sup>3</sup>، ابتدا اطلاعات طراحی قطعه کار به اطلاعات تولیدی تبدیل می شوند. سپس براساس اطلاعات تولیدی، طرح فرایند مناسبی برای قطعه کار تنظیم می شود. در شکل 1 روند کلی سامانه از مرحله طراحی تا طرح ریزی فرایند نشان داده شده است. در این شکل، ابتدا قطعه کار در سامانه های طراحی به کمک رایانه مدل سازی و در فایل خنثی مانند استپ<sup>4</sup> ذخیره می شود. سپس فایل خنثی به همراه دیگر

3- CIM

4- STEP

1- Alternating Sum of Volumes with Partitioning

2- Feature Precedence Matrix (FPM)



**Fig.1** The workflow of an integrated CAD-CAPP system

شکل 1 روند کلی سامانه از یکپارچه سازی طراحی تا طرح ریزی فرایند

به صورت دو نیم استوانه در نظر گرفته شده است.

#### 4- قواعد ماشین کاری جهت تعیین توالی ماشین کاری فیچرها

برای آن که توالی ماشین کاری فیچرها به درستی تعیین شود، باید قواعد ماشین کاری بین فیچرها رعایت شود. همان طوری که بیان شد، قواعد ماشین کاری به دو نوع تکنیکی و هندسی تقسیم می شوند. رعایت قواعد ماشین کاری برای تولید محصول مطابق با نیازمندی های طراحی ضروری است.

##### 4-1- قواعد ماشین کاری تکنیکی

تداخل های تکنیکی که بین فیچرها وجود دارد، سبب به وجود آمدن قواعد ماشین کاری تکنیکی می شوند. رعایت این نوع قواعد ماشین کاری ضروری است. در زیر برخی از این قواعد آورده شده است.

اگر سطوح تکیه گاه یا بست مورد نیاز برای ماشین کاری فیچر 1، با ماشین کاری فیچر 2 از بین برود؛ در این حالت فیچر 1 باید زودتر از فیچر 2 ماشین کاری شود [4].

اگر سطح مورد نیاز برای موقعیت دهی ابزار ماشین کاری فیچر 1 با ماشین کاری فیچر 2 از بین برود؛ در این حالت فیچر 1 باید زودتر از فیچر 2 ماشین کاری شود [21].

اگر سطوحی از فیچر 1، جزء سطوح مرجع فیچر 2 باشد؛ در این حالت فیچر 1 زودتر از فیچر 2 ماشین کاری می شود [22].

##### 3- فیچرهای ماشین کاری

فیچرهای ماشین کاری از تبدیل اطلاعات هندسی تعریف شده توسط سامانه های طراحی به کمک رایانه (داده های سطح پایین مانند سطوح، لبه و...)، به اطلاعات تولیدی مورد نیاز در طرح ریزی فرایند و تولید به کمک رایانه (داده های سطح بالا مانند شیار، سوراخ و...) حاصل می شوند [19,18]. هر فیچر از مجموعه ای از سطوح، لبه ها و رأس ها تشکیل شده است. برای هر فیچر می توان حجم ماشین کاری تعریف کرد. هر فیچر با توجه به نوعش، تعداد معینی سطح دارد که در این مقاله به این تعداد سطوح، «تعداد سطوح تشکیل دهنده فیچر» گفته می شود. ده نوع فیچر ماشین کاری به همراه جهت ابزارشان در جدول 1 نشان داده شده است. در این مقاله برای شناسایی فیچرهای ماشین کاری از روش گراف- مبنا استفاده شده است [20]. قابل توجه است که در این مقاله سطح استوانه

جدول 1 فیچرهای ماشین کاری

Table 1 Machining features

نوع فیچر	تعداد سطوح تشکیل دهنده فیچر	شکل فیچر	نوع فیچر	تعداد سطوح تشکیل دهنده فیچر	شکل فیچر
روتراشی	1		پاکت 2- طرفه	3	
پله	2		پاکت 3- طرفه	4	
شیار سرتاسری	3		پاکت 4- طرفه	5	
شیار نیمه کور	4		سوراخ سرتاسری	2	
شیار کور	5		سوراخ کور	3	

## 2-4- قواعد ماشین کاری هندسی

تداخل های هندسی وقتی ایجاد می شوند که فیچرها در یک سری از مشخصات توپولوژی با یکدیگر مشترک باشند. در این حالت رعایت قواعد ماشین کاری هندسی برای خروج راحت تر براده و کاهش برش هوایی لازم است. تداخل های هندسی به دو دسته تقسیم می شوند: تداخل های سطحی و تداخل های حجمی. در تداخل های سطحی، دو فیچر تنها در سطح ماشین کاری اشتراک دارند، ولی در تداخل های حجمی، دو فیچر حجم ماشین کاری را به اشتراک می گذارند [4]. در شکل 2 تداخل های سطحی و تداخل حجمی نشان داده شده است.

در تداخل های سطحی، فیچر پایه فیچری است که همه لبه های مشترک در یک سطح آن قرار دارد. برای نمونه در شکل 2-الف و شکل 2-ب فیچر پایه به ترتیب، فیچرهای شیار سرتاسری و پاکت چهار- طرفه است. در این حالت که فیچرها تداخل سطحی دارند، بهتر است قاعده ماشین کاری هندسی یک رعایت شود.

قاعده ماشین کاری هندسی یک: اگر فیچر  $F_1$  و  $F_2$  تداخل هندسی سطحی داشته باشند و  $F_1$  فیچر پایه باشد؛ بنابراین باید فیچر  $F_1$  زودتر از فیچر  $F_2$  ماشین کاری شود.

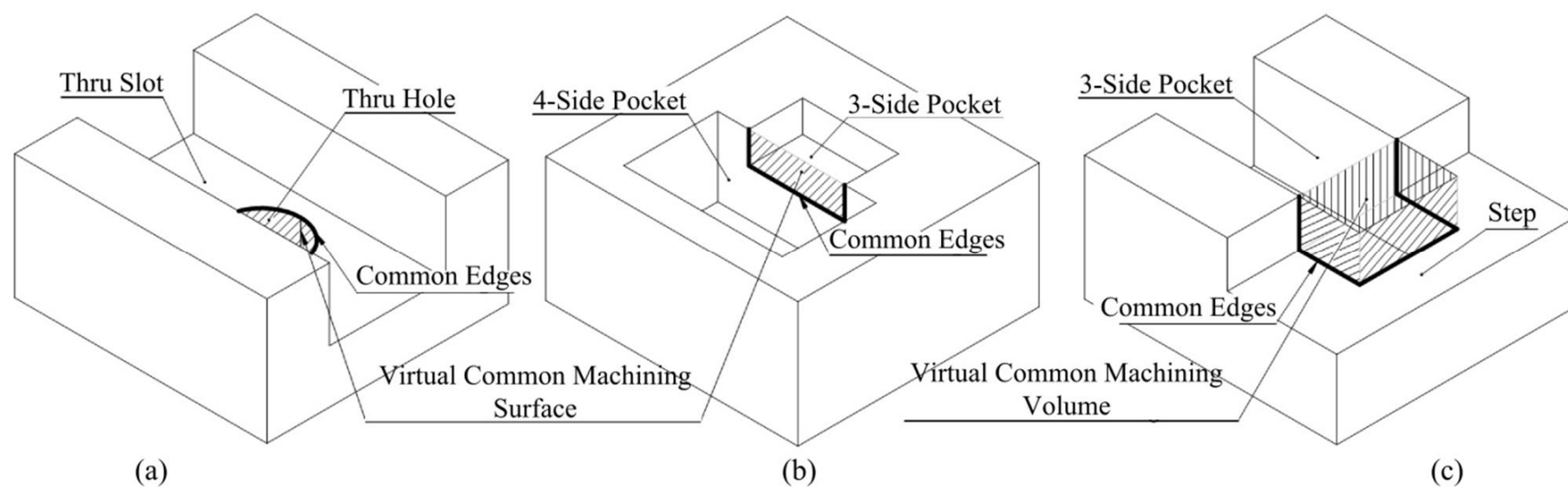
در شکل 3-الف فیچرهای پاکت سه- طرفه و پله با هم تداخل حجمی دارند. اگر نخست پاکت سه- طرفه ماشین کاری شود هنگام ماشین کاری پله، دو حالت رخ می دهد: (1) اگر مسیر ابزار برای ماشین کاری پله به شکل 3-ب در نظر گرفته شود، برش هوایی رخ می دهد (مسیر سیاه رنگ). (2) اگر برای اجتناب از برش هوایی مسیر ابزار به شکل 3-ج باشد، در این صورت به دلیل فاصله ای که بین سطح پله ایجاد شده است (سطوح هاشورخورده)، ابزار پس از جدا شدن از سطح یک تا رسیدن به سطح دو مسیر بیشتری را طی می کند؛ بنابراین موقعیت سطح دوم نسبت به سطح نخست با خطای ماشین کاری بیشتری ماشین کاری می شود؛ به طوری که دیگر نمی توان گفت که سطح یک و دو در یک راستاست، ولی با ماشین کاری پله در مرحله اول و سپس پاکت سه- طرفه، هیچ یک از این مشکلات پدید نمی آید. پس در این حالت بهتر است پله پیش از پاکت سه- طرفه ماشین کاری شود.

برای تشخیص حق تقدم بین فیچرهای تداخلی حجمی، از تعداد سطوح تشکیل دهنده فیچر استفاده می شود. زمانی که تعداد سطوح یک

فیچر بیشتر از تعداد سطوح تشکیل دهنده آن باشد، به این معناست که فاصله ای بین یکی از سطوح آن فیچر ایجاد شده است. تعداد سطوح تشکیل دهنده فیچر پله و پاکت سه- طرفه به ترتیب دو و سه سطح است. درحالی که در شکل 3-الف تعداد سطوح فیچر پله و پاکت سه- طرفه به ترتیب سه و سه سطح است، که تداخل حجمی سبب افزایش تعداد سطوح پله شده است. با توجه به دلایل گفته شده ابتدا باید فیچر پله ماشین کاری شود که تعداد سطح آن به دلیل تداخل حجمی افزایش یافته بود.

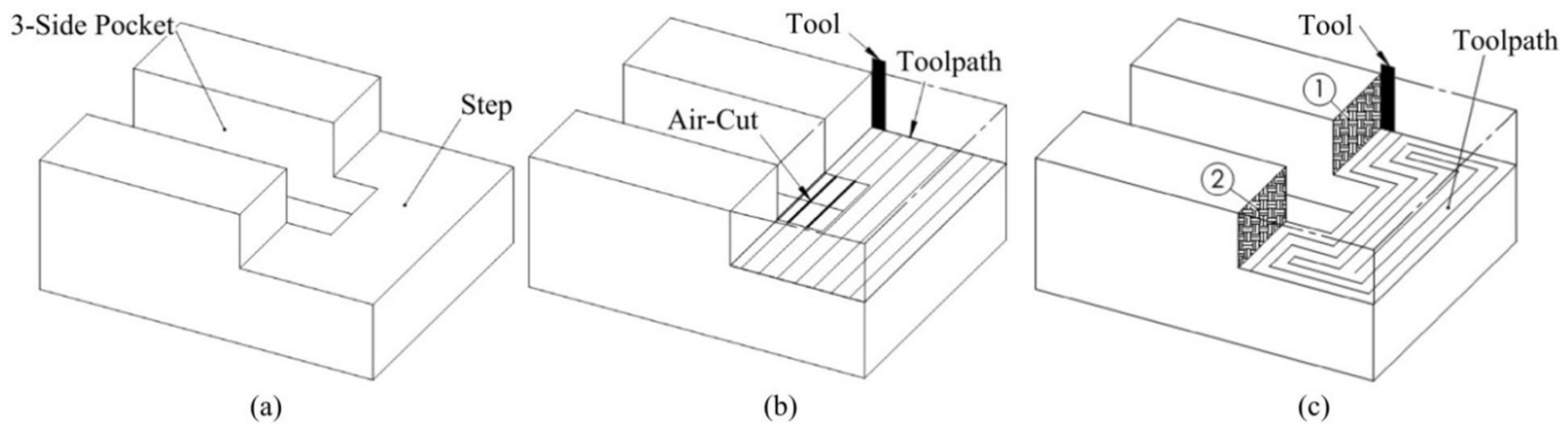
قاعده ماشین کاری هندسی 2: اگر فیچر  $F_1$  و  $F_2$  تداخل حجمی داشته باشند و تعداد سطوح فیچر  $F_1$  بیشتر از تعداد سطوح تشکیل دهنده آن فیچر باشد؛ بنابراین باید فیچر  $F_1$  زودتر از فیچر  $F_2$  ماشین کاری شود. قواعد ماشین کاری موجود در یک قطعه کار در ماتریس قواعد ماشین کاری فیچرها (FMP) خلاصه می شود [9]. تعداد ستون های این ماتریس برابر با تعداد فیچرهای ماشین کاری قطعه کار است. تعداد سطرهای آن براساس قواعد ماشین کاری تنظیم می شود. اعداد ستون  $z$  متعلق به فیچر  $F_z$  است ( $z = 1, \dots, n$  و  $n$  تعداد فیچرها است). اعداد این ماتریس می تواند 0، -1 و شماره فیچرها (1 تا  $n$ ) باشد. عدد 0 در سطر اول ستون  $z$  بدین معناست که فیچر  $F_z$  آماده ماشین کاری است. عدد -1 هنگامی که در سطر اول قرار می گیرد به این معناست که فیچر  $F_z$  ماشین کاری شده است و در سطرهای پایین معنای خاصی ندارد و برای پرشدن ماتریس به کار رفته است. اعداد موجود در ستون  $z$  نشان می دهند که برای ماشین کاری فیچر  $F_z$ ، باید فیچرهای  $F_i$  زودتر ماشین کاری شوند که  $i$  اعداد مربوط به ستون  $z$  است. دقت شود که در این مقاله دو ماتریس یکی برای نمایش قواعد ماشین کاری تکنیکی و دیگری برای نمایش قواعد ماشین کاری هندسی موجود بین فیچرها استفاده شده است که در بخش 4-4 دلیل این کار بیان خواهد شد. برای نمونه در ماتریس رابطه (1)، عدد ستون یک، 0؛ یعنی فیچر  $F_1$  اکنون آماده ماشین کاری و عدد ستون پنج، -1؛ یعنی فیچر  $F_5$  ماشین کاری شده و اعداد ستون دو، 1، 3 و 4 است؛ یعنی برای ماشین کاری فیچر  $F_2$  ابتدا باید فیچرهای  $F_1$ ،  $F_3$  و  $F_4$  ماشین کاری شوند.

$$FMP = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$



**Fig. 2** Geometrical interaction (a) surface interaction between slot and hole (b) surface interaction between two pockets (c) volumetric interaction between pocket and step

شکل 2 تداخل های هندسی الف- تداخل سطحی بین شیار و سوراخ ب- تداخل سطحی بین دو پاکت ج- تداخل حجمی بین پاکت و پله



**Fig. 3** Volumetric interaction (a) machined features (b) air cut (c) increase of error in alignment between surfaces 1 and 2

شکل 3 تداخل حجمی الف- فیچرهای ماشین کاری ب- ایجاد برش هوایی ج- افزایش خطای ماشین کاری در سطح 1 و 2

سطوح استاندارد پله است؛ بنابراین براساس قاعده ماشین کاری هندسی 2، فیچر  $F_1$  زودتر از فیچر  $F_2$  ماشین کاری می شود. با توجه به مطالب بالا، الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی خودکار قواعد هندسی به صورت زیر است.

1. آغاز.
2. دریافت فیچرها و اطلاعات توپولوژی آنها
3. ایجاد ماتریس FPM را با ستونی برابر با تعداد فیچرها و سطر قابل تغییر
4. شناسایی و ذخیره دو فیچر  $F_i$  و  $F_j$  که لبه های مشترک دارند.
5. اگر لبه های مشترک فیچرهای  $F_i$  و  $F_j$  در یک سطح باشند تداخل از نوع سطحی است، آن گاه گام برداشتن برای مرحله 7
6. اگر لبه های مشترک فیچرهای  $F_i$  و  $F_j$  در یک سطح نباشند تداخل از نوع حجمی است، آن گاه گام برداشتن برای مرحله 8
7. انجام مراحل 7- الف تا ج- (تداخل سطحی).  
الف. پیدا کردن سطحی که همه لبه های مشترک را دارد.  
ب. پیدا کردن فیچری که سطح لبه های مشترک دارد و ذخیره این فیچر به عنوان فیچر. برای نمونه فرض می شود که  $F_i$  فیچر پایه است.  
ج. اضافه کردن  $F_i$  به ستون  $z$  در ماتریس FPM
8. انجام مراحل 8- الف تا ج- (تداخل حجمی)  
الف. مقایسه تعداد سطوح تشکیل دهنده هر یک از فیچرها با تعداد سطوح کنونی فیچرها  
ب. ذخیره فیچری که تعداد سطح بیشتری نسبت به تعداد سطوح تشکیل دهنده خود دارد. برای نمونه فرض می شود که فیچر  $F_i$  تعداد سطوح بیشتری دارد.  
ج. اضافه کردن  $F_i$  به ستون  $z$  در ماتریس FPM
9. گام برداشتن به مرحله 1، چنانچه فیچرهای تداخلی تمام نشده باشد
10. قرار دادن عدد صفر به سطر اول ستون هایی از ماتریس FPM که عددی (شماره فیچر) به آنها نسبت داده نشده است.
11. تکمیل کردن باقی درایه های خالی ماتریس با عدد 1-
12. پایان

#### 4-4- مغایرت بین قواعد تکنیکی و هندسی

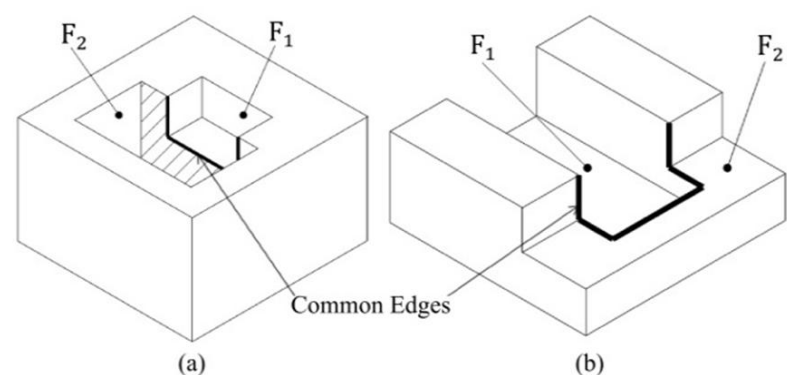
در برخی موارد مغایرتی بین قواعد تکنیکی و هندسی قطعه کار به وجود می آید. در شکل 5 نمونه ای از این نوع مغایرت نشان داده شده است.

#### 3-4- شناسایی خودکار قواعد ماشین کاری هندسی

در این بخش الگوریتمی برای شناسایی خودکار قواعد ماشین کاری هندسی بیان شده در بخش 2-4 معرفی می شود. نتایج حاصل از قواعد ماشین کاری تکنیکی نیز توسط کاربر وارد برنامه می شود.

در شکل 4 هر دو نوع تداخل حجمی و سطحی نشان داده شده است. وجه اشتراک بین دو فیچر تداخلی هندسی در این است که آنها لبه های مشترک دارند (خطوط پر رنگ در شکل 4). همان طور که گفته شد در تداخل های هندسی از نوع سطحی، وجه اشتراک بین فیچرها یک سطح ماشین کاری است؛ بنابراین انتظار می رود که همه لبه های مشترک این نوع تداخل، در یک سطح قرار داشته باشند. در شکل 4- الف) تداخل سطحی و لبه های مشترک نشان داده شده است. همه لبه های مشترک در سطح هاشور خورده قرار دارند. فیچری که سطح هاشور خورده را دارد همان فیچر پایه است که باید اول ماشین کاری شود. برای نمونه در شکل 4- الف) سطح هاشور خورده متعلق به فیچر  $F_1$  است؛ بنابراین  $F_1$  فیچر پایه است و طبق قاعده ماشین کاری هندسی 1، فیچر  $F_1$  زودتر از فیچر  $F_2$  ماشین کاری می شود.

همان طور که گفته شد تداخل حجمی زمانی رخ می دهد که دو فیچر حجم ماشین کاری را به اشتراک گذاشته باشند. پس در این حالت همه لبه های مشترک دو فیچر در یک صفحه قرار ندارند (شکل 4- ب)؛ بنابراین می توان گفت که اگر دو فیچر لبه های مشترک داشته باشند تداخل هندسی دارند. تداخل هندسی از نوع تداخل سطحی است اگر همه لبه های مشترک در یک سطح باشند در غیر این صورت تداخل هندسی از نوع حجمی است. در تداخل هندسی حجمی، فیچری اول ماشین کاری می شود که تعداد سطوح کنونی آن بیشتر از تعداد سطوح تشکیل دهنده باشد. برای نمونه در شکل 4- ب) تعداد سطوح فیچر پله ( $F_1$ ) بیشتر از تعداد



**Fig. 4** The common edges in geometrical interactions (a) surface interaction (b) volumetric interaction

شکل 4 لبه های مشترک در تداخل های هندسی الف- تداخل سطحی ب- تداخل حجمی



ماشین کاری فیچرها، مشابه مسائل جایگشت است که در آن حالت هایی تعیین می شود که فیچرها بدون تکرار کنار هم قرار گرفته و در آن ها قواعد ماشین کاری رعایت شده باشند.

تعیین توالی ماشین کاری فیچرها براساس روش جایگشت این گونه است که توالی ماشین کاری فیچرها مرحله به مرحله تعیین و در هر مرحله قواعد ماشین کاری اعمال می شوند. در شکل 6- ب شیوه کار این روش برای تعیین توالی ماشین کاری پنج فیچر فرض شده، نشان داده شده است. اطلاعات تولیدی پنج فیچر در شکل 6- الف آورده شده است. در هر مرحله، ابتدا فیچرهایی که نیاز به ماشین کاری دارند تعیین می شوند. سپس بین این فیچرها قواعد ماشین کاری تکنیکی ( $FPM_{TR}$ ) اعمال می شوند تا فیچرهایی در گام بعدی مورد بررسی قرار گیرند که از نظر قواعد ماشین کاری تکنیکی، آماده ماشین کاری است. سپس بین فیچرهایی آماده از نظر قواعد ماشین کاری تکنیکی، قواعد ماشین کاری هندسی ( $FPM_{GR}$ ) اعمال می شود. در صورت وجود مغایرت بین قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی، قواعد هندسی به طور خودکار نادیده گرفته می شوند؛ زیرا قواعد ماشین کاری هندسی بین فیچرهایی اعمال می شود که از نظر قواعد ماشین کاری تکنیکی آماده ماشین کاری هستند. در نهایت بین فیچرهایی که از نظر قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی آماده ماشین کاری هستند، فیچری که بیشترین حجم ماشین کاری را دارد، در مرحله  $m$  در توالی ماشین کاری فیچرها قرار می گیرد. برای نمونه در مرحله نخست هر 5 فیچر نیاز به ماشین کاری دارند. در گام نخست براساس ماتریس  $FPM_{TR}$ ، فیچرهای  $F_2$ ،  $F_3$ ،  $F_4$  و  $F_5$  آماده ماشین کاری است. پس از اعمال قواعد هندسی (مطابق ماتریس  $FPM_{GR}$ ) بین این فیچرها، تنها فیچر  $F_2$  باقی می ماند؛ بنابراین فیچر  $F_2$  در مرحله 1 ماشین کاری می شود. سپس ماتریس های  $FPM$  به روزرسانی شده (چون فیچر  $F_2$  ماشین کاری شده و باید این موضوع در ماتریس ها لحاظ شود) و مرحله دوم مانند مرحله اول روی فیچرهای باقی مانده اجرا می شود. در مرحله آخر توالی ماشین کاری فیچرها تعیین می شود.

در صورتی که در هر مرحله، قاعده ماشین کاری فیچر با حجم بیشتر بین فیچرها اعمال شود، فقط یک حالت برای توالی ماشین کاری به دست می آید. برای تعیین همه حالت های توالی ماشین کاری، ابتدا باید شرط اعمال حجم ماشین کاری حذف شده و در هر مرحله که پس از اعمال قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی چند فیچر باقی می ماند، یکی را انتخاب کرده و تا مرحله آخر پیش رفت. سپس به این مرحله بازگشته و فیچر آماده دیگر را انتخاب و دوباره تا مرحله آخر، تعیین توالی را ادامه داد. همان طور که یاد شد در این روش، در صورت وجود مغایرت بین قواعد هندسی و تکنیکی، این مغایرت به طور خودکار شناسایی و از قواعد ماشین کاری هندسی عدول می شود.

با توجه به مطالب بالا، الگوریتم تعیین توالی ماشین کاری فیچرها بر پایه روش جایگشت بدین صورت است.

1. آغاز
2. دریافت اطلاعات فیچرها، قواعد ماشین کاری تکنیکی، قواعد ماشین کاری هندسی، حجم ماشین کاری فیچرها
3.  $i \leftarrow 1$  (نشان دهنده مرحله ماشین کاری)
4. ذخیره در  $X$  فیچرهایی که نیاز به ماشین کاری دارند
5. اگر  $X = \emptyset$  آن گاه پایان

براساس قواعد ماشین کاری تکنیکی تداخل ابزار (بخش 4-1)، فیچر  $F_1$  باید زودتر از فیچر  $F_2$  ماشین کاری شود. درحالی که براساس قاعده ماشین کاری هندسی 1، فیچر  $F_2$  باید زودتر از فیچر  $F_1$  ماشین کاری شود. در این گونه موارد باید قاعده هندسی نادیده گرفته شود؛ به دلیل این که قاعده هندسی جهت خروج راحت تر براده و کاهش برش هوایی است. درحالی که رعایت نکردن قواعد ماشین کاری تکنیکی، احتمال معیوب شدن قطعه کار یا آسیب رساندن به تجهیزات را به همراه دارند.

با توجه به مطالب بالا، رعایت قواعد ماشین کاری هندسی لازم است، ولی ضروری نیست. پس باید در روش تعیین توالی ماشین کاری فیچرها این موضوع در نظر گرفته شود و تا جایی که امکان دارد قواعد ماشین کاری هندسی رعایت شود و در صورت وجود مغایرت بین قواعد هندسی و تکنیکی از رعایت قواعد ماشین کاری هندسی اجتناب شود. دلیل استفاده از ماتریس های  $FPM$  جداگانه برای نمایش قواعد ماشین کاری هندسی و تکنیکی نیز همین امر است تا بتوان در مواقع لازم از قواعد ماشین کاری هندسی عدول کرد.

#### 4-5- توالی ماشین کاری فیچرهای بدون تداخل

برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرهایی که تداخل های هندسی یا تکنیکی ندارند، از قواعد ماشین کاری دیگری استفاده می شود که رعایت آن ها سبب تولید محصول با کیفیت بهتر و زمان تولیدی کم می شود. یکی از قواعدی که بین فیچرهای بدون تداخل رعایت می شود این است که فیچر با حجم ماشین کاری بیشتر، زودتر ماشین کاری شود؛ زیرا حجم ماشین کاری بیشتر نیروی برشی و حرارتی بیشتری ایجاد کرده و سبب تغییر شکل بیشتر و صافی سطح پایین قطعه کار می شود [6].

قاعده دیگری که بین فیچرهای بدون تداخل در نظر گرفته می شود این است که فیچرهای دارای ابزار برش مشترک، کنار یکدیگر قرار داده می شوند تا تعداد تعویض ابزار برش کاهش یابد. در این مقاله به دلیل این که ابزار برش در نظر گرفته نشده است، این قاعده هنگام تعیین توالی ماشین کاری فیچرها در نظر گرفته نمی شود [6].

#### 5- تعیین توالی ماشین کاری فیچرها بر پایه جایگشت

توالی ماشین کاری فیچرها براساس قواعد ماشین کاری تعیین می شود. هدف از این مرحله، تعیین بهینه ترین توالی ماشین کاری فیچرهاست؛ به طوری که در این توالی تمام قواعد ماشین کاری رعایت شود. تعیین توالی

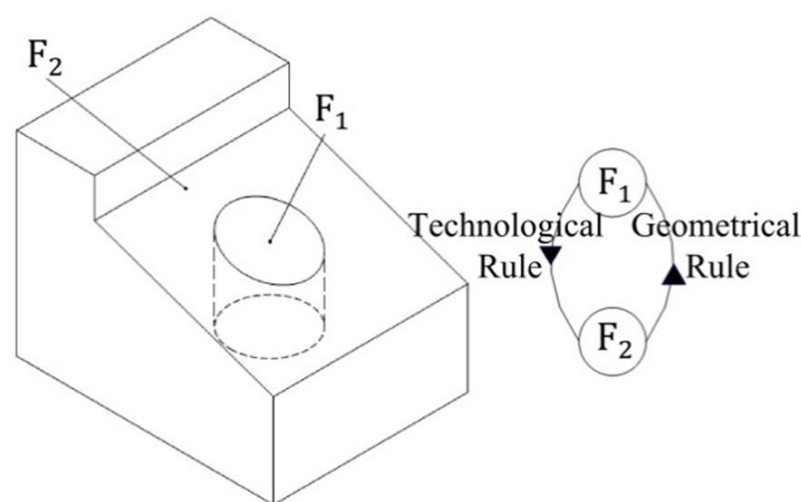
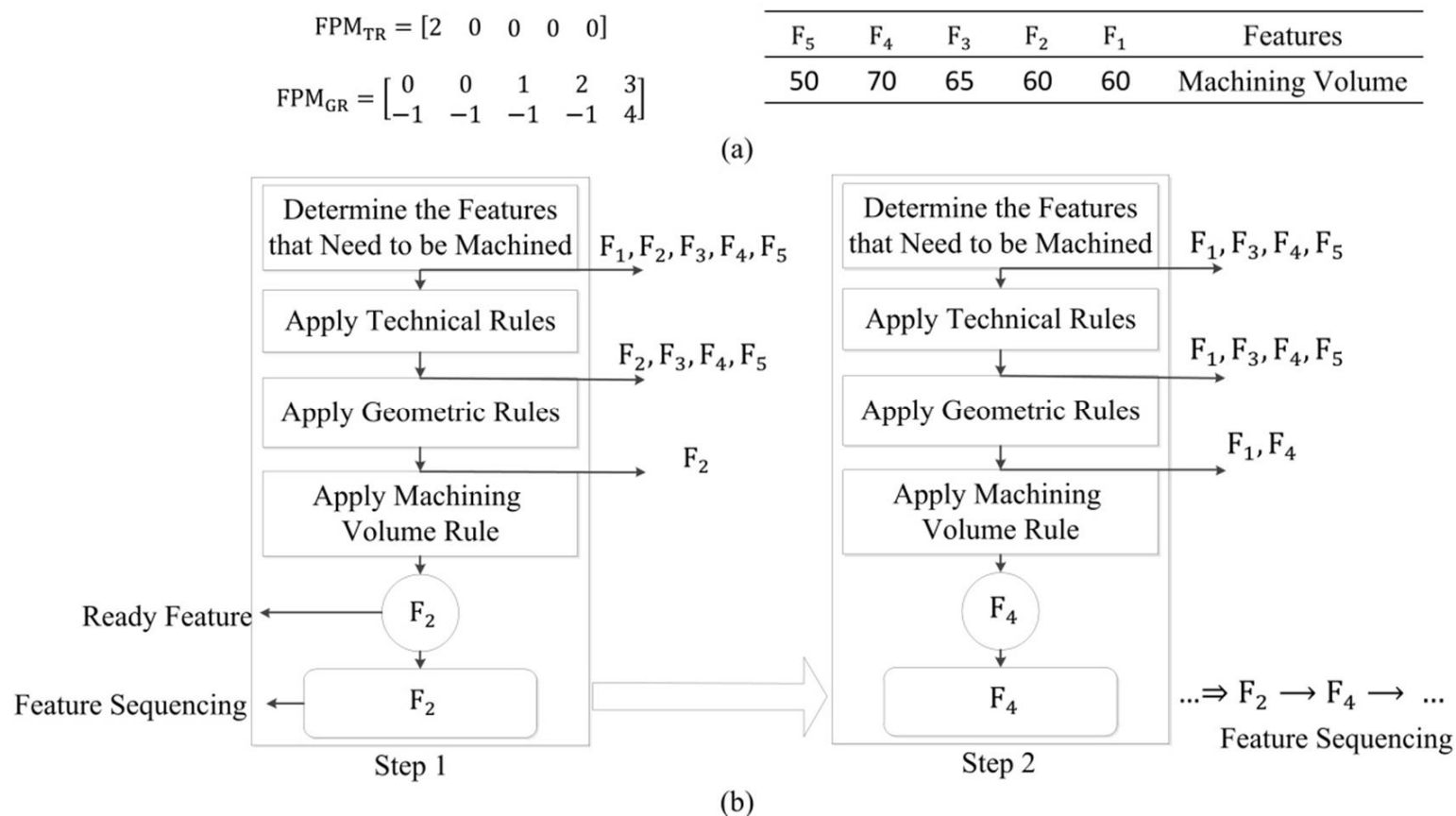


Fig. 5 An example of the conflict between the technological and geometrical rules

شکل 5 نمونه ای از مغایرت بین قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی



**Fig.6** Determining of machining sequence (a) Manufacturing information (b) Permutation method for sequencing of machining features

شکل 6 تعیین توالی ماشین کاری فیچرها الف - اطلاعات تولیدی فیچرها ب - تعیین توالی ماشین کاری فیچرها براساس روش جایگشت

می دهد، در ماتریس FPM خلاصه شده است. ماتریس FPM این قواعد در شکل 8- الف آورده شده است.

1. فیچر روتراشی F<sub>14</sub> زودتر از فیچر F<sub>17</sub> باید ماشین کاری شود، چرا که سطح فیچر روتراشی F<sub>14</sub> سطح مرجع فیچر F<sub>17</sub> است.
2. چون قطر سوراخ بزرگ و ضخامت قطعه کار در ناحیه سوراخ کم است، پس احتمال خم شدگی هنگام سوراخ کاری وجود دارد؛ بنابراین فیچر سوراخ F<sub>13</sub> پیش از شیار F<sub>3</sub> ماشین کاری می شود.
3. جهت سهولت در طراحی قیدوبند، فیچرهای پله F<sub>1</sub>، F<sub>2</sub> پس از فیچر شیار F<sub>3</sub> زده می شود تا بست فیچر شیار سبب خم شدن قطعه کار در نواحی پله نشود.

ماتریس FPM قواعد ماشین کاری هندسی در شکل 8- ب آورده شده که از الگوریتم قواعد ماشین کاری هندسی بیان شده در بخش 3-4 به دست آمده است. مغایرتی بین قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی بین دو فیچر شیار سرتاسری F<sub>3</sub> و سوراخ سرتاسری بزرگ F<sub>13</sub> وجود دارد. براساس قاعده ماشین کاری تکنیکی 2 یادشده در بالا، فیچر F<sub>13</sub> پیش از فیچر F<sub>3</sub> باید ماشین کاری شود. این در حالی است که مطابق قاعده ماشین کاری هندسی 1 بیان شده در بخش 2-4، فیچر F<sub>13</sub> باید پس از فیچر F<sub>3</sub> ماشین کاری شود. در این هنگام باید قواعد ماشین کاری تکنیکی اعمال و از قواعد ماشین کاری هندسی عدول کرد. این مغایرت در الگوریتم پیشنهادی برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها، به طور خودکار شناسایی و از قواعد هندسی عدول می شود. شناسایی و حل مغایرت جزء ویژگی روش پیشنهادی است و بدون هیچ گونه الگوریتم جانبی انجام می شود.

توالی ماشین کاری فیچرها در شکل 9 آورده شده و این توالی از روش پیشنهادی حاصل شده است. همان طور که مشاهده می شود در این توالی، فیچر F<sub>13</sub> پیش از فیچر F<sub>3</sub> ماشین کاری می شود. به عبارت دیگر قاعده ماشین کاری تکنیکی 2 اعمال و از قاعده ماشین کاری هندسی موجود بین فیچر F<sub>13</sub> و F<sub>3</sub> عدول شده است.

6. اعمال قواعد ماشین کاری تکنیکی روی اعضای X کن و ذخیره فیچرهایی از X که طبق این قواعد آماده ماشین کاری در Y هستند
7. اعمال قواعد ماشین کاری هندسی را اعضای Y و ذخیره فیچرهایی از Y که طبق این قواعد آماده ماشین کاری در Z هستند
8. ذخیره فیچری در F که بیشترین حجم ماشین کاری را بین اعضای Z دارد
9. ماشین کاری F در مرحله i
10. نمایش فیچر F و i
11.  $i \leftarrow i + 1$
12. گام به مرحله 4
13. پایان

از این روش می توان توالی ماشین کاری فیچرهای قطعات غیرمنشوری را نیز تعیین کرد، همچنین تنها حجم و قواعد ماشین کاری فیچرها مورد نیاز است؛ بنابراین در صورتی می توان از این روش برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرهای استفاده کرد که بتوان فیچرهای قطعات غیرمنشوری و اطلاعات تولیدی آن را به طور خودکار شناسایی کرد.

## 6- آزمایش مدل

الگوریتم تعیین توالی ماشین کاری فیچرها در محیط برنامه نویسی پایتون اوسی سی مدل سازی شده است. برای آزمایش الگوریتم پیشنهادی برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها، از قطعه کار شکل 7 استفاده شده، همچنین شماره فیچرها نیز آورده شده است. برای این قطعه کار فرض شده است که فیچرهای روتراشی F<sub>15</sub>، F<sub>16</sub>، F<sub>18</sub> و F<sub>19</sub> نیازی به ماشین کاری ندارند.

این مدل، سه قاعده ماشین کاری تکنیکی زیر را داراست. نتایج حاصل از قواعد تکنیکی که توالی ماشین کاری بین فیچرهای تداخلی را نشان

قطعه کار در فایل خنثی قطعه کار موجود و قابل فراخوانی است. جهت اثبات قابلیت شناسایی آسان و خودکار قواعد هندسی بیان شده، الگوریتمی برای شناسایی خودکار آن ها در سامانه های رایانه معرفی و آزمایش شده است. مزیت دیگر قواعد بیان شده نسبت به قواعد هندسی موجود، به دست آوردن نتایج واحد از آن ها است. این در صورتی است که از برخی قواعد بیان شده در مقالات پیشین، می توان نتایج متفاوتی به دست آورد، همچنین مغایرتی بین قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی معرفی شد که این مغایرت باید در روش تعیین توالی ماشین کاری فیچرها و طرح ریزی ستاپ ها در نظر گرفته شود.

روشی بر پایه جایگشت برای تعیین توالی ماشین کاری فیچرها معرفی شد که در آن قواعد ماشین کاری تکنیکی و هندسی به طور جداگانه و مرحله به مرحله اعمال می شود. این روش در حین سادگی، انعطاف پذیر و قابل توسعه است. در این روش مغایرت بین قواعد ماشین کاری هندسی و تکنیکی به طور خودکار شناسایی می شود، زیرا این قواعد جداگانه اعمال می گردد. همچنین در صورت وجود مغایرت بیان شده، به طور خودکار از قواعد ماشین کاری هندسی عدول می شود، زیرا قواعد ماشین کاری هندسی بین فیچرهایی اعمال می شود که از نظر قواعد ماشین کاری تکنیکی آماده ماشین کاری هستند. جهت نشان دادن قابلیت توسعه دادن روش جایگشت بیان شده، در پژوهش آتی به توسعه روش بیان شده برای طرح ریزی ستاپ ها پرداخته خواهد شد.

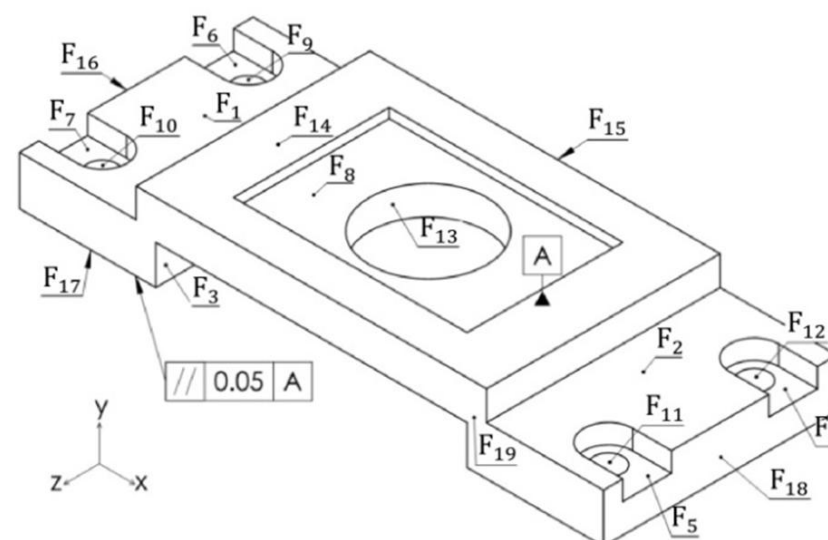


Fig. 7 A work-piece for testing the procedure

شکل 7 قطعه کار آزمایش شده

## 7- نتیجه گیری

تعیین توالی ماشین کاری فیچرها یکی از وظایف نخستین سامانه های طرح ریزی فرایند است که براساس قواعد ماشین کاری و بهینه بودن تعیین می شود. قواعد ماشین کاری به دو دسته تکنیکی و هندسی تقسیم می شوند که در این مقاله قواعد ماشین کاری هندسی مورد مطالعه قرار گرفت و دو قاعده جدید برای تداخل های هندسی بیان شد. این قواعد جدید براساس ویژگی توپولوژی فیچرهای تداخلی بیان شده اند؛ به همین دلیل به راحتی می توان آن ها را خودکار شناسایی کرد، زیرا تمام اطلاعات توپولوژی

Features ID	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	F <sub>12</sub>	F <sub>13</sub>	F <sub>14</sub>	F <sub>15</sub>	F <sub>16</sub>	F <sub>17</sub>	F <sub>18</sub>	F <sub>19</sub>
FPM <sub>TR</sub>	3	3	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0
(a)																			
Features ID	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	F <sub>12</sub>	F <sub>13</sub>	F <sub>14</sub>	F <sub>15</sub>	F <sub>16</sub>	F <sub>17</sub>	F <sub>18</sub>	F <sub>19</sub>
FPM <sub>GR</sub>	14	14	15	2	2	1	1	14	6	7	5	4	3	0	0	0	0	0	0
	15	15	17	18	18	16	16	-1	17	17	17	17	8	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	16	18	19	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	19	19	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
(b)																			

Fig.8 Feature precedence matrices (a) technological rules (b) geometrical rules

شکل 8 ماتریس قواعد ماشین کاری الف - قواعد ماشین کاری تکنیکی ب - قواعد ماشین کاری هندسی

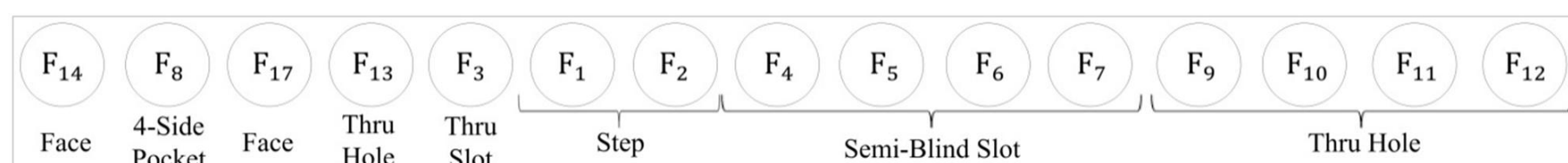


Fig.9 Sequence of machining the features on the basis of the permutation-based procedure

شکل 9 تعیین توالی ماشین کاری فیچرها بر پایه روش جایگشت

International Journal of Production Research, Vol. 39, No. 10, pp. 2077-2103, 2001.

- [6] L. Wang, N. Cai, H. Y. Feng, Z. Liu, Enriched machining feature-based reasoning for generic machining process sequencing, *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 1479-1501, 2006.
- [7] J.-S. Hwang, W. A. Miller, Hybrid blackboard model for feature interactions in process planning, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 29, No. 1-4, pp. 613-617, 1995.
- [8] J.-S. Hwang, W. Miller, Using mixed-type reasoning in computer-aided process planning for feature interactions, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 8, No. 4, pp. 297-306, 1997. English
- [9] M. Deja, M. Siemiatkowski, Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 24, No. 4, pp. 831-846, 2013. English

## 8- مراجع

- [1] N. Xu, S. H. Huang, Y. K. Rong, Automatic setup planning: current state-of-the-art and future perspective, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 11, No. 2, pp. 193-208, 2007.
- [2] I. T. Kim, H. W. Suh, Optimal operation grouping and sequencing technique for multistage machining systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 8, pp. 2061-2081, 1998.
- [3] D. N. Sormaz, B. Khoshnevis, Modeling of manufacturing feature interactions for automated process planning, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 19, No. 1, pp. 28-45, 2000.
- [4] Z. Liu, L. Wang, Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning, *Computers in Industry*, Vol. 58, No. 4, pp. 295-303, 2007.
- [5] Y. S. Kim, E. Wang, H. M. Rho, Geometry-based machining precedence reasoning for feature-based process planning,



- operations sequence in CAPP using an ant colony algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, No. 1-2, pp. 159-164, 2006. English
- [17] R. S. Joshi, N. kumar, A. Sharma, Setup Planning and Operation Sequencing Using Neural Network and Genetic Algorithm, *Information Technology: New Generations*, 2008. ITNG 2008. Fifth International Conference on, [2008, 2008].
- [18] B. Babic, N. Nesic, Z. Miljkovic, A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition, *Computers in Industry*, Vol. 59, No. 4, pp. 321-337, 2008.
- [19] H. Parvaz, M. J. Nategh, A Multi-TAD Framework for Recognizing Machining Features Using Hint Based Recognition Algorithm, *Advanced Materials Research*, Vol. 445, pp. 905-910, 2012.
- [20] S. Joshi, T.-C. Chang, Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model, *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 2, pp. 58-66, 1988.
- [21] A. C. Lin, S.-Y. Lin, D. Diganta, W. F. Lu, An integrated approach to determining the sequence of machining operations for prismatic parts with interacting features, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 73, No. 1-3, pp. 234-250, 1998.
- [22] Y. F. Zhang, A. Y. C. Nee, S. K. Ong, A hybrid approach for set-up planning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 183-190, 1995. English
- [10] D. Sreeramulu, S. K. Singh, C. S. P. Rao, Generation of optimum sequence of operations using ant colony algorithm, *International Journal of Advanced Operations Management*, Vol. 4, No. 4, pp. 253-271, 2012.
- [11] L. Liu, L. H. Qiao, Operation sequencing using genetic algorithm, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 163, pp. 57-61, 2012.
- [12] J. M. Usher, R. O. Bowden, The application of genetic algorithms to operation sequencing for use in computer-aided process planning, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 999-1013, 1996.
- [13] L. Qiao, X. Y. Wang, S. C. Wang, A GA-based approach to machining operation sequencing for prismatic parts, *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 14, pp. 3283-3303, 2000.
- [14] C. KUMAR, S. DEB, GENERATION OF OPTIMAL SEQUENCE OF MACHINING OPERATIONS IN SETUP PLANNING BY GENETIC ALGORITHMS, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 01, pp. 67-80, 2012.
- [15] T. N. Wong, L. C. F. Chan, H. C. W. Lau, Machining process sequencing with fuzzy expert system and genetic algorithms, *Engineering with Computers*, Vol. 19, No. 2-3, pp. 191-202, 2003. English
- [16] A. Gopala Krishna, K. Mallikarjuna Rao, Optimisation of