مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 9-16

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تخمین زمان ساخت در فرآیندهای ساخت افزودنی برمبنای جهت‌گیری قطعه

امیرحسین گل‌محمدی[1]، سعید خدایگان[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق‌پستی 11155-9567، khodaygan@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 اردیبهشت 1396
پذیرش: 02 تیر 1396
ارائه در سایت: 14 مرداد 1396

کلید واژگان:
ساخت افزودنی
تخمین زمان ساخت
جهت‌گیری ساخت قطعه
زبان استاندارد مثلثی (STL)

چکیده

یکی از مهمترین عواملی که در ساخت قطعات با روش ساخت افزودنی باید مورد توجه قرار گیرد، الگوی جهت‌گیری ساخت قطعه است. جهت گیری ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی بر روی خواص قطعه از جمله صافی سطح، استحکام قطعه، زمان ساخت و مقدار مواد تکیه گاهی مورد استفاده تأثیرگذار است. در این بین زمان ساخت قطعه یکی از مهمترین عوامل در تعیین جهت‌گیری بهینهٔ قطعات است. در این مقاله روشی جدید برای تخمین زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی ارائه می‌شود که می‌تواند زمان تخمینی ساخت قطعه در جهت‌گیری‌های مختلف را محاسبه کند. براساس روش پیشنهادی، رابطه‌ای کاربردی براساس تعداد لایه‌ها و مقدار مواد تکیه‌گاهی استخراج می‌گردد. روش ارائه شده علاوه بر کاهش هزینه‌های محاسباتی نسبت به روش‌های پیشین، روشی کارآمد برای تعیین جهت‌گیری بهینه قطعات نیز می‌باشد. در پایان، به منظور نمایش توانایی و همچنین صحت‌سنجی روش پیشنهادی، زمان ساخت یک قطعه در دو نوع جهت‌گیری مختلف براساس روش پیشنهادی تخمین زده می‌شود و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست مقایسه می‌شود. میانگین خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت‌گیری نوع اول در مقایسه با نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست به ترتیب برابر 5 و 9 درصد و در جهت‌گیری نوع دوم 7 و 8 درصد می‌باشد. همچنین سرعت محاسبهٔ نتایج برای قطعهٔ مورد مطالعه با استفاده از روش پیشنهادی به ترتیب حدود 100 و 140 برابر سریع‌تر از نرم‌افزارهای رپتیرهاست و منکاتی است.

Build Time Estimation in Additive Manufacturing Processes based on Part Orientations

Amir Hossein Golmohammadi, Saeed Khodaygan*

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 11155-9567 Tehran, Iran, khodaygan@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 May 2017
Accepted 23 June 2017
Available Online 05 August 2017

Keywords:
Additive manufacturing
Build time estimation
Part build orientation
Standard Triangle Language (STL)

ABSTRACT

The orientation of a part in the additive manufacturing process is one of the most important factors that should be considered in the additive manufacturing process. In the additive manufacturing process, the part orientation factor can significantly affect the part properties such as the surface roughness, strength, the manufacturing time and amount of support materials. The manufacturing time is a key factor that can influence the total production cost. Therefore, to minimize the manufacturing time, the optimum orientation of parts should be determined. In this paper, a new method is introduced to estimate the build time of the parts through the additive manufacturing process. According to the proposed method, a practical equation is extracted to estimate the build time of the parts with regard to the number of layers and the amount of support materials. The method is capable of estimating the build time of a part associated to the part orientations. The efficiency of the proposed method is demonstrated through a case study in two different types of orientation, and the computational results are compared with the obtained results from the simulations in MankatiUM V5.3 and Repetier-Host software. The average of proposed method relative error in the first type of orientation in comparison with MankatiUM and Repetier-Host software results are, respectively, 5 and 10 percent and for the second type of orientation are 7 and 8 percent. Moreover, calculation cost of proposed method is 140 and 100 times faster than MankatiUM and Repetier-Host software, respectively.

1- مقدمه

در توصیف فناوری ساخت افزودنی[1]، نمونه‌سازی سریع[2] یا چاپ سه‌بعدی[3] بر کسی پوشیده نیست که به چه میزان این فناوری هر روز رو به گسترش است و به چه میزان در آیندهٔ صنعت نقش آفرین خواهد بود. این فناوری به پیش‌بینی بسیاری از آینده پژوهان عرصهٔ فناوری به‌عنوان آیندهٔ ساخت و تولید معرفی می‌شود [1]. با معرفی اولین دستگاه تجاری ساخت افزودنی در سال 1986 این فرآیند ساخت به‌عنوان یک فناوری کلیدی مطرح شده‌است که موجب کوتاه شدن زمان ساخت، ساخت قطعات با اشکال پیچیده و رسیدن به دقت ابعادی بالاتر می‌شود [2]. فرآیندهای ساخت افزودنی بر خلاف ماشین‌کاری یک فرآیند افزایشی است به طوری‌که قطعه با اضافه شدن

[1] Additive Manufacturing
[2] Rapid Prototyping
[3] 3D Printing

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. H. Golmohammadi, S. Khodaygan, Build Time Estimation in Additive Manufacturing Processes based on Part Orientations , *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 9-16, 2017 (in Persian)

مواد روی هم، و شکل‌گیری لایه به لایه ساخته می‌شود [3].

برای نمونه‌سازی با استفاده از این روش پس از طراحی قطعه در نرم‌افزارهای طراحی [1] باید فرمت STL از قطعه موردنظر ایجاد شود. پس از آن برای تنظیم پارامترهای دستگاه مانند ضخامت لایه‌های ساخت، سرعت پاشش پودر، قدرت لیزر و تعیین جهت‌گیری ساخت، قطعه باید در یکی از نرم‌افزارهای دستگاه چاپ‌گر وارد شود. پس از آن قطعه از چینش لایه‌ها بر روی یکدیگر ایجاد می‌شود. در نهایت نیز عملیات پس پردازش مانند عملیات پرداخت و حذف مواد تکیه‌گاهی برای رسیدن به قطعه مطلوب انجام می‌شود [4].

از شناخته شده‌ترین فرآیندهای ساخت افزودنی می‌توان به فرآیند استریولیتوگرافی[2](SLA)، تف‌جوشی انتخابی با لیزر[3] (SLS)، ذوب انتخابی با لیزر[4](SLM)اشاره کرد. این دسته بندی‌ها معمولاً براساس جنس ماده مورد استفاده برای ساخت قطعه انجام می‌شود. برای مثال در فرآیند استریولیتوگرافی از رزین و در فرآیندهای تف‌جوشی انتخابی با لیزر و ذوب انتخابی با لیزر از مواد پودری استفاده می‌شود [5].

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد یکی از مهمترین عملیات‌هایی که در ساخت قطعات با روش ساخت افزودنی وجود دارد الگوی جهت‌گیری قطعه است که خواص و ویژگی‌های قطعه را تغییر می‌دهد [6]. به‌طوری‌که جهت‌گیری ساخت قطعات حتی بر روی خواص مکانیکی قطعه از جمله استحکام کششی نهایی قطعه و میانگین نرخ کرنش پلاستیک قطعهٔ ساخته شده نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد [7]. به همین دلیل قبل از شروع به ساخت قطعه باید جهت‌گیری بهینه مربوط به ساخت قطعه برای دستگاه چاپ‌گر تعریف شود [8].

در این بین زمان ساخت یکی از عواملی است که به طور کامل تابعی از الگوی جهت‌گیری ساخت قطعه است. در گذشته مطالعاتی در رابطه با تخمین زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی انجام شده است. گیاناتیس و همکاران روشی برای محاسبهٔ زمان ساخت قطعه مبتنی بر حجم و سطح قطعه ارائه کردند که نیازی به لایه زنی قطعه ندارد در این روش ضخامت لایه‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبهٔ کل طول حرکت لیزر از مقدار حجم قطعه و مفهوم سطح عمودی استفاده شده‌است [9]. صنعتی‌نژاد و همکاران الگوریتمی جدید برای تخمین زمان ساخت قطعه ارائه دادند که می‌تواند در مسائل بهینه‌سازی نیز مورد استفاده قرار گیرد. مهمترین مشخصهٔ روش آن‌ها این است که می‌تواند برای ضخامت لایه‌های ثابت و متغیر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین روش ارائه شده توسط آن‌ها زمان محاسبات را کاهش می‌دهد [10]. الکساندر برای محاسبهٔ دقیق زمان ساخت روشی بر اساس مساحت سطح مقطع بعد از لایه‌بندی، سرعت پاشش پودر و افزایش و کاهش قدرت لیزر ارائه کرد. مدل ارائه شده توسط وی زمان را زیر زمان واقعی تخمین می‌زد [11]. در راستای بهینه‌سازی چند هدفهٔ جهت‌گیری قطعه، پندی مدلی برای تخمین زمان ساخت قطعه ارائه داد که در مدل پیشنهادی وی زمان ساخته قطعه برمبنای حاصل ضرب تعداد لایه‌ها در زمان تولید هر لایه محاسبه می‌شود. زمان تولید هر لایه نیز مجموع زمان‌های مربوط به مساحت سطح هر مقطع و مقدار مواد تکیه‌گاهی آن در نظر گرفته شده است [12]. چنگ و همکاران روشی برای جهت‌گیری بهینه قطعه به‌منظور دست‌یابی به دقت ابعادی قطعه و کاهش زمان ساخت پیشنهاد کرده‌اند. منبع ایجاد خطا که منجر به کاهش دقت ابعادی قطعه می‌شود اثر پله پله‌ای، انقباض و اعوجاج است که معمولاً در تولید لایه به لایه قطعه رخ می‌دهد. هدف مورد بررسی، کاهش زمان ساخت بود که با کاهش تعداد لایه‌های ساخت به‌وسیله‌ی جهت‌گیری مناسب قطعه انجام شده است. همچنین کاهش تعداد لایه‌های ساخت منجر به کاهش اثر پله پله‌ای نیز گردید. به‌طوریکه ابتدا چند جهت‌گیری برای رسیدن به دقت ابعادی قطعه انتخاب شد، سپس از بین آن‌ها یک یا دو جهت‌گیری برای رسیدن به زمان مطلوب ساخت انتخاب شد [13]. سالیوان و همکاران مطالعاتی تجربی برای بررسی تأثیر الگوریتم اسکن و سرعت لیزر بر روی زمان ساخت پرداختند، همچنین زمان تأخیر حرکت لیزر در تخمین زمان ساخت قطعه در کار آنان در نظر گرفته شده است [14]. کمپل و همکاران با استفاده از تبدیل قطعات به ترکیبی از اشکال حجمی پایه مانند استوانه و مخروط در فرآیند استریولیتوگرافی مدلی برای محاسبهٔ زمان براساس حجم تبدیل شده و فضای خالی زیر قطعه که منجر به استفاده از مواد تکیه‌گاهی می‌شود، ارائه دادند. مدل ارائه شده حدود ده درصد اختلاف با زمان واقعی را نشان داده‌است [15]. در مقاله ارائه شده توسط ژانگ و همکاران روشی برای تخمین زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی با استفاده از تئوری خاکستری[5] ارائه شده‌است. ورودی‌های این سیستم خاکستری عوامل مربوط به دستگاه ساخت قطعه مانند توان لیزر، عوامل مربوط به ویژگی‌های قطعه طراحی شده، عوامل مربوط به چگونگی ساخت قطعه مانند جهت‌گیری ساخت و خروجی این سیستم تخمین زمان ساخت قطعه می‌باشد [16]. چوی یک مدل پارامتری برای محاسبهٔ زمان ساخت قطعه در فرآیند SLS ارائه داد. مدل ارائه شده توسط وی فقط براساس سرعت لیزر، ارتفاع قطعه و دمای محفظهٔ ساخت بود که به دلیل نادیده گرفتن شیوهٔ ساخت قطعه مانند جهت‌گیری ساخت و مقدار مواد تکیه‌گاهی دارای دقت پایینی است [17].

در این مقاله، روش جدیدی جهت تخمین زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی بر مبنای جهت‌گیری‌های مختلف قطعه معرفی شده است. استفاده از روش پیشنهادی منجر به یک رابطهٔ تحلیلی می‌شود که می‌توان از آن جهت تعیین جهت‌گیری بهینه در کمینه‌سازی زمان ساخت افزودنی استفاده کرد. از جمله مزایای این روش می‌توان به کاهش هزینهٔ محاسباتی و افزایش سرعت محاسبهٔ زمان ساخت قطعه اشاره کرد. همچنین بیشتر نرم‌افزارهای رایج دستگاه‌های چاپگر سه‌بعدی توانایی محاسبهٔ زمان ساخت در تمام جهت‌گیری‌ها را نداشته اما روش پیشنهادی در کار حاضر این محدودیت را ندارد و می‌تواند زمان ساخت در تمام جهت‌گیری‌ها در فضای سه‌بعدی را محاسبه کند. در بخش 2، مفاهیم پایه مربوط به فرمت STL فایل مورد استفاده جهت مدل‌سازی نمونه جهت ساخت افزودنی مرور می‌گردد. در بخش 3، روش پیشنهادی برای تخمین زمان ساخت برمبنای جهت‌گیری قطعه ارائه می‌شود. در بخش4، به منظور نمایش توانایی روش و صحت‌سنجی نتایج حاصل از روش پیشنهادی، زمان ساخت یک قطعه نمونه براساس روش پیشنهادی تخمین زده می‌شود و با نتایج نرم‌افزار منکاتی[6] و رپتیرهاست[7] مقایسه می‌شود. در پایان، جمع‌بندی مقاله در بخش5 ارائه می‌گردد.

2- فرمت STL

برای ساخت قطعه در دستگاه چاپ‌گر سه‌بعدی به طور معمول از فرمت STL

[1] CAD Software
[2] Stereo Lithography
[3] Selective Laser Sintering
[4] Selective Laser melting
[5] Grey theory
[6] MankatiUM
[7] Repetier-Host

جدول 1 جمع‌بندی مقالات منتشر شده مرتبط با کار حاضر

Table 1 Summary of published articles associated with related work

محققان	هدف	پارامترهای مؤثر در تعیین زمان ساخت	نحوهٔ صحت‌سنجی نتایج
گیاناتیس و همکاران [9]	محاسبهٔ زمان ساخت قطعه	محاسبهٔ حجم و سطح قطعه، عدم نیاز به لایه‌زنی، ضخامت لایه‌ها ثابت	نمونه‌سازی تجربی قطعه با فرآیند SLA
صنعتی‌نژاد و همکاران [10]	محاسبهٔ زمان ساخت قطعه	طول حرکت لیزر، سرعت حرکت لیزر، سطح مقطع هر لایه	نرم‌افزار ویزکم آرپی
الکساندر و همکاران [11]	بهینه‌سازی فرآیند ساخت افزودنی به منظور کمینه کردن زمان و مقدار مواد تکیه‌گاهی مصرفی	محاسبهٔ سرعت پاشش پودر، محاسبهٔ افزایش و کاهش قدرت لیزر	----------
پندی و همکاران [12]	بهینه‌سازی فرآیند ساخت افزودنی به منظور کمینه کردن زمان و زبری سطح	سطح مقطع هر لایه، مقدار مواد تکیه‌گاهی	شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار متلب
چنگ و همکاران [13]	بهینه‌سازی فرآیند ساخت افزودنی به منظور کمینه کردن زمان و اثر پله پله‌ای	ارتفاع ساخت قطعه، تعداد لایه‌ها	شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار متلب
سالیوان و همکاران [14]	محاسبهٔ زمان ساخت قطعه	الگوریتم اسکن، سرعت لیزر	نمونه‌سازی تجربی
کمپل و همکاران [15]	محاسبهٔ زمان ساخت قطعه	اشکال حجمی پایه برای تبدیل قطعه، فضای خالی زیر قطعه	نمونه‌سازی تجربی
ژانگ و همکاران [16]	محاسبهٔ زمان ساخت قطعه	توان لیزر، جهت‌گیری ساخت	شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار متلب
چوی و همکاران [17]	محاسبهٔ زمان ساخت قطعه	سرعت لیزر، ارتفاع ساخت، قدرت لیزر، دمای محفظهٔ ساخت	نمونه‌سازی تجربی

قطعه استفاده می‌شود. عبارت STL معمولاً به اختصار برای عبارت استریولیتروگرافی استفاده می‌شود. همچنین در برخی از مطالعات برای عبارت‌های "زبان مثلث استاندارد[1]" و یا "زبان موزاییکی استاندارد[2]" نیز استفاده شده‌است [18]. وقتی که قطعه طراحی شده به فرمت STL تبدیل می‌شود تمام مدل به تعداد زیادی مثلث در فضای سه‌بعدی تقسیم می‌شود. "شکل 1a" قطعهٔ طراحی شده در نرم‌افزار طراحی و "شکل 1b" فرمت STL این قطعه را نشان می‌دهد. به زبان ساده فرمت STL قطعه، از یک سری مثلث‌های مرتبط برای دوباره ساختن هندسه سطح یک مدل جامد استفاده می‌کند. برای ساخت سطح قطعه هرچه تعداد مثلث‌ها بیشتر باشد سایز فایل بزرگ‌تر شده و قطعه دقیق‌تر می‌شود. در فایل‌های STL بزرگ‌تر زمان بیشتری صرف لایه‌بندی و ایجاد مقاطع می‌شود. البته این امر اثر ناچیزی بر زمان ساخت قطعه دارد [19]. از یک فایل STL می‌توان لیست کامل مختصات رئوس مثلث‌ها و بردار عمود بر هریک از این مثلث‌ها را استخراج کرد.

3- روش پیشنهادی برای تخمین زمان در فرآیندهای ساخت افزودنی

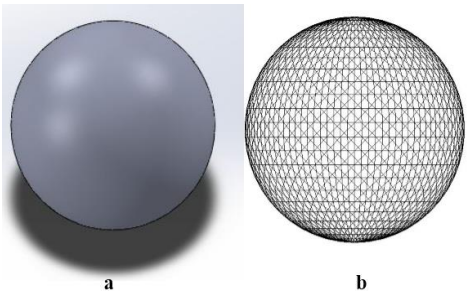

Fig. 1 (a) CAD part, (b) STL format

شکل 1 (a) قطعهٔ طراحی شده در نرم افزار طراحی، (b) فرمت STL قطعه

زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی تابع بسیاری از عوامل از جمله قدرت دستگاه، سرعت اسکن، نوع هاشورزنی لایه‌ها، فاصله هاشور، سرعت پاشش پودر، جهت‌گیری قطعه تعداد لایه‌های ساخت قطعه و مقدار مواد تکیه‌گاهی مصرفی می‌باشد. در این بخش، روش جدیدی برای تخمین زمان ساخت قطعه در جهت‌گیری‌های مختلف ارائه می‌شود.

3-1- ارائه فرمول‌بندی جهت تخمین زمان در فرآیند ساخت افزودنی

جهت‌گیری ساخت قطعه می‌تواند مستقیماً بر روی تعداد لایه‌های ساخت قطعه و مقدار مواد تکیه‌گاهی مصرفی مؤثر باشد. برای مثال همان‌طور که در "شکل 2a" مشاهده می‌شود در ساخت یک استوانه با روش ساخت افزودنی تعداد لایه‌های قطعه در حالت ایستاده بیشتر از تعداد لایه‌های قطعه که در حالت خوابیده است.

مقدار مواد تکیه‌گاهی مورد استفاده برای ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی نیز در جهت‌گیری‌های مختلف متفاوت است. از آن‌جا که در فرآیندهای ساخت افزودنی، قطعات به صورت لایه لایه ساخته می‌شوند، لایه‌ها در قسمت‌هایی از قطعه که حالت برآمده، آویزان یا زیر آن‌ها خالی باشد، نیاز به تکیه‌گاه دارند. البته تکیه‌گاه یا پایه در تمام فرآیندها مورد نیاز نیست. به عنوان مثال فرآیند SLA نیازمند وجود تکیه‌گاه برای ساخت قطعه است در حالی که فرآیند SLS نیاز به تکیه‌گاه ندارد. در صورت نیاز، تکیه‌گاه به عنوان بخشی از قطعه به مدل CAD اضافه شده و پس از ساخت از قطعه جدا می‌شوند [20].

در صورتی‌که این مواد تکیه‌گاهی مورد استفاده قرار نگیرند، قطعه پس از گذشت مدتی از زمان ساخت، واژگون می‌شود. همان‌گونه که در "شکل 2b" نشان داده شده است در استوانهٔ ایستاده بر روی قاعده نیازی به استفاده از مواد تکیه‌گاهی نیست ولی در حالتی‌که استوانه به‌صورت مایل جهت‌گیری شده است برای ساخت قطعه باید از مواد تکیه‌گاهی استفاده شود.

برای ارائهٔ روشی برای تخمین زمان ساخت قطعه در جهت گیری‌های مختلف، زمان تابعی از تعداد لایه‌های مورد نیاز برای ساخت قطعه و مقدار مواد تکیه‌گاهی مورد استفاده در نظر گرفته شده‌است.

[1] Standard Triangle Language
[2] Standard Tessellation Language

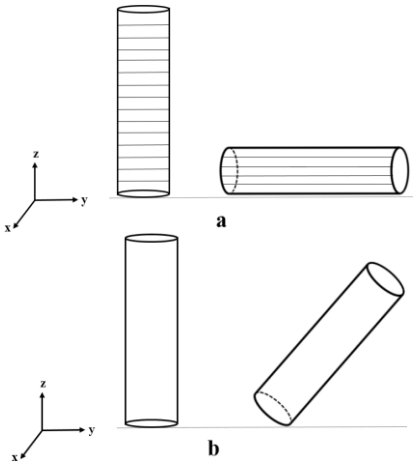

Fig. 2 Part in different orientations, (a) effect of orientation on the number of layers, (b) effect of orientation on the amount of support material

شکل 2 قطعه در جهت‌گیری‌های مختلف، (a) تأثیر جهت‌گیری بر تعداد لایه‌ها، (b) تأثیر جهت‌گیری بر مقدار مواد تکیه‌گاهی

$$\text{Time} = f(n, \text{Support}) \tag{1}$$

برای محاسبهٔ تعداد لایه‌های مورد نیاز جهت ساخت قطعه و مقدار مواد تکیه گاهی از فرمت STL استفاده می‌شود. بدین منظور تابعی برای استخراج مشخصات هندسی قطعهٔ مورد نظر ایجاد شده به نحوی‌که ورودی این تابع قطعهٔ طراحی شده در فرمت STL بوده و خروجی آن مختصات رئوس هر یک از از مثلث‌ها و مؤلفه‌های بردار نرمال هریک از این المان‌ها می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 3" قابل مشاهده است برای المان i اُم از فرمت STL قطعه، می‌توان مختصات رئوس و مؤلفه‌های بردار نرمال را توسط تابع تعریف شده را به‌دست آورد.

برای تعیین تعداد لایه‌های موردنظر در ساخت قطعه از رابطه (2) استفاده می‌شود. در این رابطه h ارتفاع ساخت قطعه، d ضخامت هرلایه و n تعداد لایه برای ساخت کل قطعه است.

$$n = \frac{h}{d} \tag{2}$$

همان‌طور که در "شکل 4" نشان داده شده برای به‌دست آوردن ارتفاع ساخت قطعه باید تفاضل بیشترین و کمترین مؤلفهٔ سوم مختصات رئوس مثلث‌ها را محاسبه کرد.

$$h = z_{\max} - z_{\min} \tag{3}$$

در رابطهٔ (3)، z_{max} بزرگ‌ترین مؤلفهٔ سوم رئوس مثلث‌ها و z_{min} کوچکترین مؤلفهٔ سوم این رئوس است.

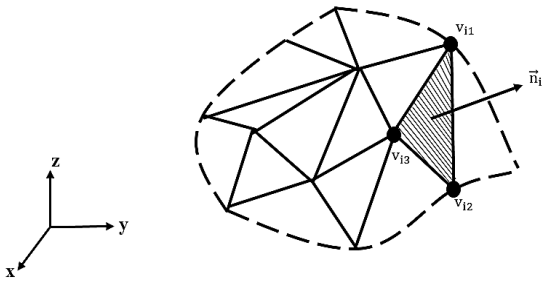

Fig. 3 Vertices coordinates of triangles and components of normal vector

شکل 3 مختصات رئوس و مؤلفه‌های بردار نرمال استخراج شده

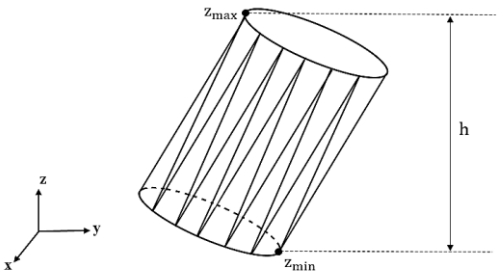

Fig. 4 Determination number of layers by height of fabrication

شکل 4 تعیین تعداد لایه‌ها با استفاده از ارتفاع ساخت

در این روش ضخامت لایه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است بنابراین تعداد لایه‌های موردنیاز برای ساخت قطعه تنها تابعی از ارتفاع ساخت قطعه می‌باشد. برای تعیین مقدار مواد تکیه‌گاهی، وجوهی از قطعه که پس از تعیین جهت-گیری رو به پایین هستند نیاز به مواد تکیه‌گاهی دارند. بدین منظور برای تعیین این سطوح از بردارهای نرمال سطوح مثلثی استفاده شده است. بردار-هایی که مؤلفهٔ سوم آن‌ها منفی است متعلق به سطوحی هستند که رو به پایین هستند و نیاز به مواد تکیه‌گاهی دارند. این سطوح A_{down} نام‌گذاری شده‌اند. همچنین ارتفاع هر یک از این سطوح از کف محفظهٔ ساخت مهم می‌باشد چرا که هرچه ارتفاع این سطوح از کف محفظهٔ ساخت بیشتر باشد مقدار مواد تکیه‌گاهی بیشتری موردنیاز است. برای نمونه در "شکل 5" مشخص است که به علت بیشتر بودن میانگین ارتفاع سطوح رو به پایین در "شکل 5a" مقدار مواد تکیه‌گاهی بیشتری نسبت به "شکل 5b" موردنیاز است.

به‌عنوان مثال برای محاسبهٔ مقدار مواد تکیه‌گاهی برای فرمت STL استوانهٔ نشان داده شده در "شکل 6" ابتدا مختصات رئوس و مؤلفه‌های بردار نرمال هر یک از مثلث‌ها استخراج می‌شود. برای مثلث مشخص شده مختصات رئوس و مؤلفه‌های بردار نرمال به‌صورت زیر در اختیار است.

$$\begin{aligned} \vec{n} &= (n_1, n_2, n_3) \\ v_1 &= (x_1, y_1, z_1) \\ v_2 &= (x_2, y_2, z_2) \\ v_3 &= (x_3, y_3, z_3) \end{aligned} \tag{4}$$

از آن‌جا که مؤلفهٔ سوم بردار نرمال سطح مشخص شده منفی است لذا این سطح جزء سطوح رو به پایین محسوب شده و برای ساخت به مواد تکیه‌گاهی نیاز دارد.

برای تعیین ارتفاع این سطوح از کف محفظهٔ ساخت، میانگین ارتفاع سه رأس سطوح رو به پایین محاسبه می‌شود؛

$$Z_{\text{dowm}} = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \tag{5}$$

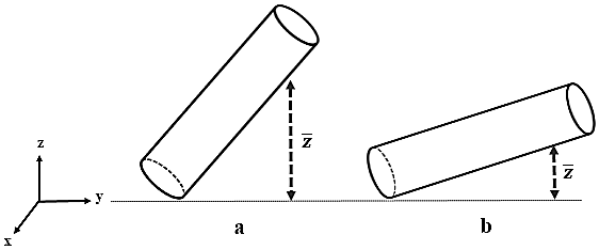

Fig. 5 Effect of orientation on average height of surfaces, (a) higher average height, (b) lower average height

شکل 5 تأثیر جهت‌گیری بر میانگین ارتفاع سطوح، (a) میانگین ارتفاع بزرگ‌تر، (b) میانگین ارتفاع کوچک‌تر

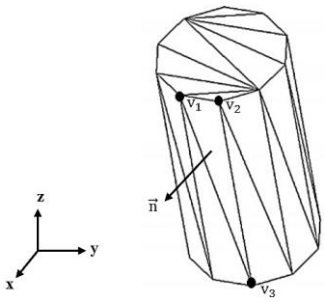

Fig. 6 Vertices coordinates and components of normal vector for a triangles

شکل 6 مختصات رئوس و مؤلفه‌های بردار نرمال برای یکی از مثلث‌ها

همچنین برای محاسبهٔ مساحت این سطوح نیز از رابطه (6) استفاده می‌شود که برابر با نصف اندازه ضرب خارجی دو برداری است که با تفاضل مختصات رئوس مثلث‌ها به‌دست آمده‌است؛

$$A_{\text{down}} = 0.5|(v_1 - v_3) \times (v_2 - v_3)| \tag{6}$$

در نتیجه مقدار مواد تکیه‌گاهی موردنیاز قطعه را می‌توان از رابطهٔ (7) محاسبه کرد. در این رابطه m تعداد مثلث‌هایی از فرمت STL قطعه است که به‌عنوان سطوح رو به پایین تعریف شده‌اند.

$$\text{Support} = \frac{\sum_{i=1}^{m} Z_{\text{down}} A_{\text{down}}}{\sum_{i=1}^{m} A_{\text{down}}} \left(1 + \sum_{i=1}^{m} |n_3|\right) \tag{7}$$

به منظور در نظر گرفتن تأثیر میزان انحراف قطعه از راستای عمود بر کف محفظهٔ ساخت بر مقدار مواد تکیه‌گاهی مصرفی، مجموع قدر مطلق مؤلفه‌های سوم بردارهای عمود بر سطوح رو به پایین نیز در رابطهٔ (7) استفاده شده است.

3-2- تعیین جهت‌گیری‌های مختلف قطعات تحت فرآیندهای ساخت افزودنی

برای ایجاد جهت‌گیری‌های مختلف قطعه از ماتریس دوران اویلر استفاده شده است [21]. به‌طوری‌که با ضرب این ماتریس دوران در مختصات رئوس مثلث‌ها و بردارهای نرمال بر این سطوح می‌توان این مقادیر را در جهت‌گیری‌های مختلف به‌دست آورد.

نحوهٔ دوران قطعه حول محورهای مختصات برای قرارگیری در راستای جهت‌های مختلف در "شکل 7" آورده شده است.

ماتریس دوران اویلر و عناصر این ماتریس به ترتیب در روابط (8- الف) و (8- ب) نشان داده شده است [21].

$$R = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \tag{8- الف}$$

به‌طوری‌که؛

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \cos(\beta)\cos(\gamma) \\
a_{12} &= -\cos(\beta)\sin(\gamma) \\
a_{13} &= \sin(\beta) \\
a_{21} &= \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\gamma) \\
a_{22} &= -\sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\gamma) \\
a_{23} &= -\cos(\beta)\sin(\alpha) \\
a_{31} &= -\cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\gamma) \\
a_{32} &= \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \sin(\alpha)\cos(\gamma) \\
a_{33} &= \cos(\beta)\cos(\alpha)
\end{aligned} \tag{8-ب}$$

جائیکه α ، β و γ به ترتیب زوایای دوران حول محورهای x، y و z می‌باشند. به این ترتیب، زمان تخمینی ساخت قطعه در جهت‌گیری‌های مختلف از رابطهٔ (9) قابل تخمین است؛

$$\begin{aligned}
&\text{Time} \equiv (z_{\max} - z_{\min})(1 + \text{Support}) \\
&z_{\max} - z_{\min} = f(\alpha, \beta, \gamma) \\
&\text{Support} = g(\alpha, \beta, \gamma)
\end{aligned} \tag{9}$$

به‌طوری‌که مقادیر $z_{\max} - z_{\min}$ و Support تابعی از جهت‌گیری قطعه یعنی زوایای دوران α ، β و γ هستند.

3-3- ارائه فلوچارت روش پیشنهادی برای تخمین زمان

مطابق الگوریتم پیشنهادی، پس از دریافت فرمت STL قطعه و تعیین روند استراتژی تغییر جهت‌گیری قطعه، مختصات رئوس و مؤلفه‌های بردار نرمال بر هر یک از سطوح مثلثی تعیین می‌شود. زمان تخمینی ساخت قطعه پس از محاسبهٔ تعداد لایه‌ها و مقدار مواد تکیه‌گاهی موردنیاز برای ساخت قطعه براساس یک رابطهٔ تحلیلی محاسبه می‌شود. فلوچارتی از الگوریتم پیشنهادی شامل مراحل محاسبهٔ زمان ساخت قطعه در "شکل 8" نشان داده شده است. خروجی این فلوچارت زمان‌های محاسبه شده به صورت گسسته در جهت-گیری‌های متفاوت است که براساس این داده‌ها می‌توان با استفاده از روش-های متامدلینگ مانند روش کریجینگ تابع زمان برحسب زوایای دوران حول محورهای مختصات را تعیین کرد. پس از محاسبهٔ ضرایب مدل کریجینگ و ساخت مدل می‌توان از تابع زمان به عنوان یکی از توابع هدف در مسائل بهینه‌سازی استفاده کرد و با استفاده از روش‌های بهینه کردن توابع مانند الگوریتم ژنتیک، تاگوچی و ... جهت‌گیری بهینه قطعات را تعیین کرد [22].

4- مطالعهٔ موردی

برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی جهت تخمین زمان ساخت قطعه‌ای مانند "شکل 9a" در نرم‌افزار کتیا[1] طراحی شده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی برای تخمین زمان ساخت با نتایج شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست در دو نوع جهت‌گیری مختلف مقایسه شده است. جهت استفاده از این نرم‌افزارها برای محاسبهٔ زمان ساخت قطعه باید فرمت STL از قطعهٔ موردنظر ایجاد شود.

در جهت‌گیری نوع اول، قطعهٔ موردنظر حول محور y به اندازه β و به صورت پاد ساعت‌گرد دوران داده شده‌است. به بیان دیگر زوایای α و γ برابر صفر در نظر گرفته شده و زاویهٔ β مقدار دهی شده‌است. مقادیر زمان ساخت

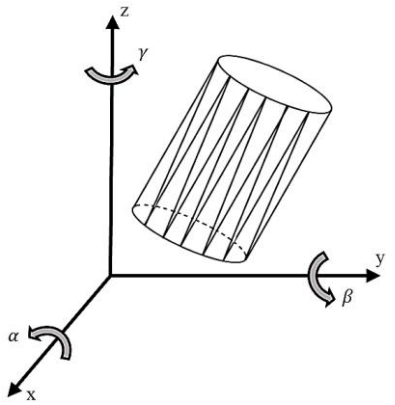

Fig. 7 Determining the Orientations by rotation angles

شکل 7 تعیین جهت‌گیری‌های مختلف قطعه با استفاده از زوایای دوران

[1] CATIA

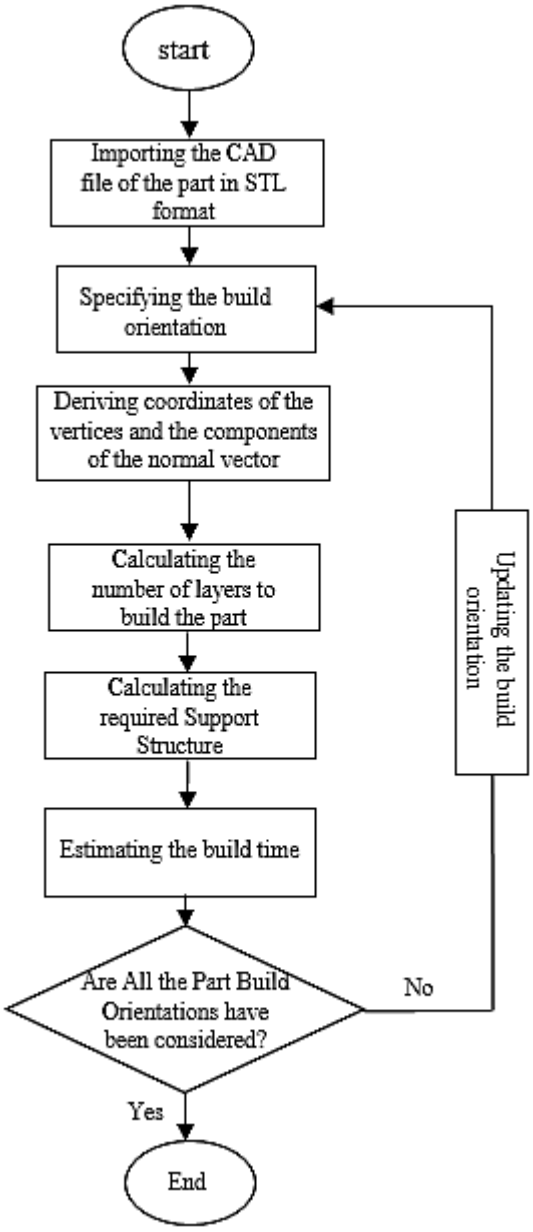

Fig. 8 Algorithm of time calculation

شکل 8 الگوریتم پیشنهادی برای محاسبهٔ زمان قطعه

قطعهٔ موردنظر با استفاده از نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست و روش پیشنهادی محاسبه شده که نتایج در جدول 2 قابل مشاهده است.

ذکر این نکته ضروری است که خروجی رابطهٔ (9) ، تخمین کمی از زمان ساخت برای تشخیص جهت‌گیری بهینهٔ قطعه به منظور کمینه کردن زمان ساخت قطعه هستند. برای تبدیل رابطهٔ (9) به یک تساوی کافی است این رابطه در یک ثابت مانند K ضرب شود.

$$\text{Time} = K(z_{\max} - z_{\min})(1 + \text{Support}) \quad (10)$$

به‌طوری‌که K ثابت کالیبراسیون زمانی برای بیان مقادیر زمانی در واحدهای ثانیه یا دقیقه و یا ساعت است. برای به‌دست آوردن این ضریب از نسبت میانگین بیشینه زمان محاسبه شده توسط دو نرم‌افزار و بیشینه عدد استخراج شده توسط رابطهٔ (9) استفاده می‌شود.

نتایج حاصل از روش پیشنهادی از ضرب کردن ضریب ثابت K در اعداد به‌دست آمده توسط رابطهٔ (9) استخراج شده است. برای مشاهدهٔ بهتر زمان‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزارهای منکاتی، رپتیرهاست و روش پیشنهادی زمان‌های ساخت برحسب زاویهٔ دوران حول محور y (زاویهβ) در "شکل 10" نشان داده شده است.

با توجه به "شکل 10"، کمترین زمان ساخت نسبت به جهت‌گیری نوع اول قطعه در زوایای 0 و 45 درجه رخ می‌دهد.

در جهت‌گیری نوع دوم، قطعه به یک اندازه و به صورت پاد ساعت‌گرد حول محورهای مختصات دوران داده می‌شود. نتایج مربوط به نوع دوم از جهت‌گیری ساخت قطعه با روش افزودنی، در "شکل 11" و جدول 3 ارائه شده است. مطابق با نتایج حاصل، کمترین زمان ساخت نسبت در جهت‌گیری نوع قطعه در زوایای 45 و 0 درجه رخ می‌دهد که روش پیشنهادی با تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری این نتایج را ارائه می‌نماید.

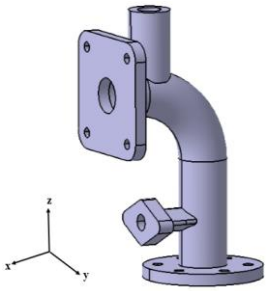

Fig. 9 Designed part in CATIA

شکل 9 قطعهٔ طراحی شده در نرم‌افزار کتیا

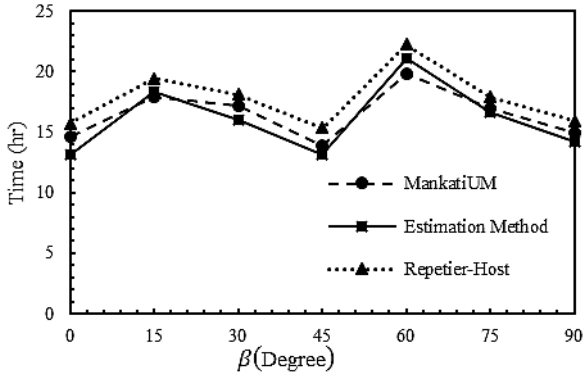

Fig. 10 Calculated time for build part in the first type of orientation

شکل 10 زمان محاسبه شده برای ساخت قطعه در جهت‌گیری نوع اول

جدول 2 زمان محاسبه شده برای ساخت قطعه در جهت‌گیری نوع اول

Table 2 Calculated time for build part in the first type of orientation

زاویه (درجه)	نرم‌افزار منکاتی (ساعت)	نرم‌افزار رپتیرهاست (ساعت)	روش پیشنهادی (ساعت)
0	14.63	15.73	13.13
15	17.93	19.44	18.36
30	17.21	18.12	15.98
45	13.91	15.32	13.15
60	19.84	22.24	21.04
75	16.96	17.87	16.60
90	14.95	15.91	14.20

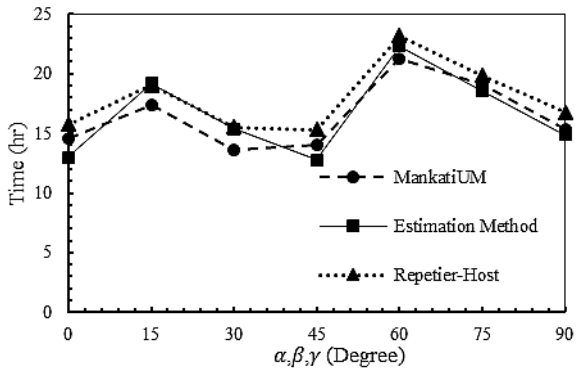

Fig. 11 Calculated time for build part in the second type of the part orientation

شکل 11 زمان محاسبه شده برای ساخت قطعه در جهت‌گیری نوع دوم

جدول 3 زمان محاسبه شده برای ساخت قطعه در جهت‌گیری نوع دوم

Table 3 Calculated time for build part in the second type of the part orientation

زاویه (درجه)	نرم‌افزار منکاتی (ساعت)	نرم‌افزار رپتیرهاست (ساعت)	روش پیشنهادی (ساعت)
0	14.63	15.73	12.97
15	17.37	19.04	19.19
30	13.61	15.51	15.37
45	14.03	15.32	12.79
60	21.28	23.17	22.31
75	19.13	19.82	18.53
90	15.39	16.76	14.89

با استفاده از مقادیر زمان محاسبه شده در 14 جهت‌گیری مختلف (مجموع دو نوع جهت‌گیری) توسط روش پیشنهادی، به کمک روش کریجینگ می‌توان تابع زمان برحسب زوایای دوران حول محورهای مختصات را استخراج کرد.

$$\begin{aligned}\text{Time} &= 16.02\, e^{(-(\gamma+0.02)^2-(\beta+1.65)^2-(\alpha-1.60)^2)}\\ &+ 3.65\, e^{(-(\alpha+0.63)^2-(\gamma+0.47)^2-(\beta-1.64)^2)}\\ &- 12.51\, e^{(-(\gamma+0.75)^2-(\alpha+1.62)^2-(\beta-0.79)^2)}\\ &+ 8.56 e^{(-(\beta+0.16)^2-(\alpha+0.84)^2-(\gamma-1.08)^2)}\\ &- 4.12 e^{(-(\beta+0.42)^2-(\gamma+1.66)^2-(\alpha-0.01)^2)}\\ &+ 1.87 e^{(-(\beta+0.85)^2-(\gamma+1.33)^2-(\alpha-1.15)^2)}\\ &- 9.44 e^{(-(\gamma+1.03)^2-(\beta+0.52)^2-(\alpha+0.05)^2)}\\ &+ 13.63 e^{(-(\alpha-0.61)^2-(\beta+0.34)^2-(\gamma+0.09)^2)}\\ &- 15.05 e^{(-(\alpha+1.27)^2-(\gamma+1.40)^2-(\beta+0.76)^2)}\\ &+ 2.12 e^{(-(\beta-1.48)^2-(\alpha-0.59)^2-(\gamma-0.52)^2)} + 11.5 \end{aligned} \tag{11}$$

با تعیین تابع زمان برای قطعهٔ پیشنهادی برحسب زوایای دوران می‌توان از آن به عنوان یکی از توابع هدف در مسائل بهینه‌سازی استفاده کرد و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی جهت‌گیری بهینه قطعات را تعیین کرد.

برای مقایسهٔ بهتر نتایج، با استفاده از روابط (12- الف) و (12- ب) خطای نسبی زمان‌های محاسبه شده توسط روش پیشنهادی محاسبه می‌شود.

$$E_r = \frac{|\text{Time}_{\text{Estimation}} - \text{Time}_{\text{MankatiUM}}|}{\text{Time}_{\text{MankatiUM}}} \times 100 \tag{12-الف}$$

$$E_r = \frac{|\text{Time}_{\text{Estimation}} - \text{Time}_{\text{Repetier}}|}{\text{Time}_{\text{Repetier}}} \times 100 \tag{12-ب}$$

"شکل‌های 12 و 13" به ترتیب خطای نسبی روش پیشنهادی در مقایسه با نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست در جهت‌گیری نوع اول و دوم را نشان می‌دهد.

میانگین خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت‌گیری نوع اول در مقایسه با نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست به ترتیب برابر 5 و 9 درصد و در جهت-گیری نوع دوم 7 و 8 درصد می‌باشد.

از مزایای روش ارائه شده در این مقاله سرعت محاسبهٔ زمان نسبت به نرم‌افزارهای موجود می‌باشد. جدول مدت زمان محاسبهٔ نتایج در هر دو نوع جهت‌گیری را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که سرعت محاسبهٔ نتایج برای قطعهٔ پیشنهادی با استفاده از روش ارائه شده در کار حاضر حدود 140 برابر سریع‌تر از نرم‌افزار منکاتی، و حدود 100 برابر سریع‌تر از نرم‌افزار رپتیرهاست است که با پیچیده-تر شدن و افزایش ابعاد قطعهٔ طراحی شده زمان محاسبهٔ نتایج می‌تواند بسیار مهم باشد.

5- نتیجه گیری

جهت‌گیری ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی بر روی خواص قطعه از جمله استحکام، چروک خوردگی، زمان ساخت، صافی سطح، مقدار مواد تکیه‌گاهی مورد استفاده تأثیرگذار است. در این مقاله روشی جدید برای تخمین زمان ساخت قطعه در جهت‌گیری‌های مختلف ارائه گردید. براساس

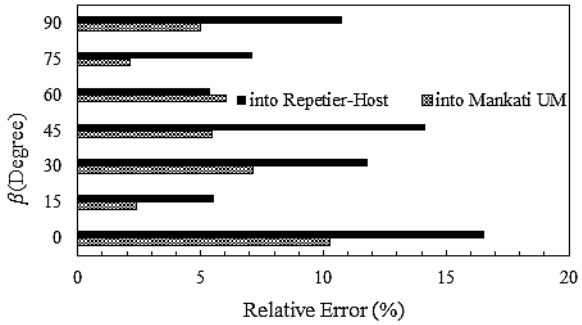

Fig. 12 Proposed method relative error in in the first type of orientation

شکل 12 خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت‌گیری نوع اول

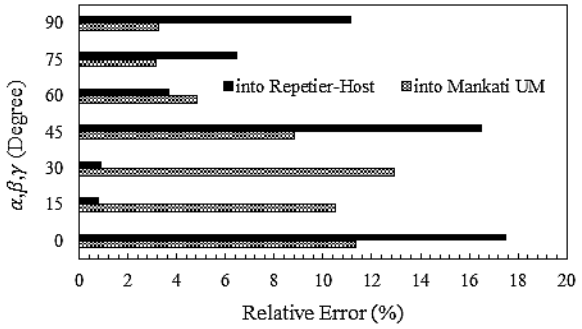

Fig. 13 Proposed method relative error in in the second type of orientation

شکل 13 خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت‌گیری نوع دوم

جدول 4 سرعت محاسبهٔ نتایج روش پیشنهادی

Table 4 calculation cost of proposed method

نوع جهت‌گیری	روش پیشنهادی	نرم‌افزار MankatiUm	نرم‌افزار Repetier-Host
جهت‌گیری نوع اول	کمتر از یک ثانیه	70 (s)	40 (s)
جهت‌گیری نوع دوم	کمتر از یک ثانیه	210 (s)	150 (s)

روش پیشنهادی، رابطه تحلیلی و کاربردی براساس تعداد لایه‌ها و مقدار مواد تکیه‌گاهی استخراج شد. مطابق الگوریتم پیشنهادی، پس از دریافت فرمت STL قطعه و تعیین روند استراتژی تغییر جهت‌گیری قطعه، زمان تخمینی ساخت قطعه پس از محاسبهٔ تعداد لایه ها و مقدار مواد تکیه‌گاهی موردنیاز برای ساخت قطعه براساس یک رابطهٔ تحلیلی محاسبه می شود.

به منظور نمایش توانایی و صحت‌سنجی روش پیشنهادی، زمان ساخت یک قطعهٔ نمونه براساس روش پیشنهادی تخمین زده شد و با نتایج شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست مقایسه گردید. میانگین خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت‌گیری نوع اول در مقایسه با نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست حداکثر 9 درصد و در جهت‌گیری نوع دوم حداکثر 8 درصد می‌باشد. همچنین سرعت محاسبهٔ نتایج برای قطعهٔ مورد مطالعه با استفاده از روش پیشنهادی حداقل حدود 100 برابر سریع‌تر از نرم‌افزارهای رپتیرهاست و منکاتی است. مقایسهٔ جواب‌ها نشان داد که نتایج روش پیشنهادی به منظور تخمین زمان ساخت با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای منکاتی و رپتیرهاست انطباق خوبی دارد. براساس روش پیشنهادی، نتایج حاصل برخلاف روش‌های پیشین در قالب یک رابطه تحلیلی ارائه می‌شود که می‌تواند به عنوان یک تابع هدف در طراحی بهینهٔ فرآیندهای ساخت افزودنی مورد استفاده قرار گیرد.

6- مراجع

[1] M. Weiyin, H. Peiren, An adaptive slicing and selective hatching strategy for layered manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89, No. 1, pp. 191–197, 1999.

[2] P. F. Jacobs, *Stereolithography and other RP&M Technologies: from Rapid Prototyping to Rapid Tooling: Society of Manufacturing Engineers*, First Edittion, pp. 13-14, Minnesota: Society of Manufacturing Engineers, 1995.

[3] E. Sabourin, S. Houser, J. Helge Bohn, Accurate exterior, fast interior layered manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 44-52, 1997.

[4] R. Paul, S. Anand, Optimal part orientation in rapid manufacturing process for achieving geometric tolerances, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 30, No. 4, pp. 214-222, 2011.

[5] S. Khalilpourazary , A. Khanjani, *Rapid Prototype and Rapid Tooling on the Base of CAD/CAM Technology*, First Edition, pp. 47-48, Tehran: Naghous Publication, 2005. (in Persian).

[6] P. Pandey, S. Dhande, Part deposition orientation studies in layered manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, No. 1, pp. 125-131, 2007.

[7] P. Hanzl, M. Zetek, T. Bakša, T. Kroupa, The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM Parts, *Procedia Engineering*, Vol. 100, No. 1, pp. 1405-1413, 2015.

[8] G. Moroni, W. Syam, S. Petrò, Functionality-based part orientation for additive manufacturing, *Procedia CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 217-222, 2015.

[9] J. Giannatsis, V. Dedoussis, L. Laios, A study of the build-time estimation problem for Stereolithography systems, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 17, No. 4, pp. 295-304, 2001.

[10] A. S. Nezhad, M. Vatani, F. Barazandeh, A. Rahimi, Build time estimator for determining optimal part orientation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 12, pp. 1905-1913, 2010.

[11] P. Alexander, S. Allen, D. Dutta, Part orientation and build cost determination in layered manufacturing, *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 5, pp. 343-356, 1998.

[12] P. M. Pandey, K. Thrimurthulu, N. V. Reddy, Optimal part deposition orientation in FDM by using a multicriteria genetic algorithm, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 19, pp. 4069-4089, 2004.

[13] W. Cheng, J. Y. H. Fuh, A. Y. C. Nee, Y. S. Wong, H. T. Loh, T. Miyazawa, Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 12-23, 1995.

[14] P. A. Sullivan, C. C. Chen, Predicting total build-time and the resultant cure depth of the 3D stereolithography process, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 27-40, 1996.

[15] I. Campbell, J. Combrinck, D. deBeer, L. Barnar, Stereolithography build time estimation based on volumetric calculations, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 14, No. 5, pp. 271-279, 2008.

[16] Y. Zhang, A. Bernard, J. Valenzuela, K. Karunakaran, Fast adaptive modeling method for build time estimation in additive manufacturing, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 10, No.1, pp. 49-60, 2015.

[17] S. H. Choi, S. Samavedam, Modelling and optimisation of rapid prototyping, *Computers in Industry*, Vol. 47, No. 1, pp. 39-53, 2002.

[18] A. Dolenc, I. Mäkelä, Rapid prototyping from a computer scientist's point of view, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 18-25, 1996.

[19] P. Pandey, N. Venkata Reddy, S. G. Dhande, Slicing procedures in layered manufacturing: A review, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 5, pp. 274-288, 2003.

[20] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, K. E. Evans, A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 9, pp. 1247–1254, 2013.

[21] J. Angeles, The role of the rotation matrix in the teaching of planar kinematics, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 89, No. 1, pp. 28-37, 2015.

[22] J. Payandehpeyman, Gh. Majzoobi, R. Bagheri, Deriving parameters of pressure-dependent yield surface for polymeric composites using kriging-based optimization method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 280-290, 2016. (in Persian فارسی)