



## تخمین زمان ساخت در فرآیندهای ساخت افزودنی بر مبنای جهت گیری قطعه

امیرحسین گل محمدی<sup>1</sup>، سعید خدایگان<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران  
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 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  
 جهت گیری ساخت قطعه  
 زبان استاندارد متلی (STL)

### چکیده

یکی از مهمترین عواملی که در ساخت قطعات با روش ساخت افزودنی باید مورد توجه قرار گیرد، الگوی جهت گیری 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 جهت گیری بهینه قطعات است. در این مقاله روشی جدید برای تخمین زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی ارائه می شود که می تواند زمان تخمینی ساخت قطعه در جهت گیری های مختلف را محاسبه کند. براساس روش پیشنهادی، رابطه ای کاربردی براساس تعداد لایه ها و مقدار مواد تکیه گاهی استخراج می گردد. روش ارائه شده علاوه بر کاهش هزینه های محاسباتی نسبت به روش های پیشین، روشی کارآمد برای تعیین جهت گیری بهینه قطعات نیز می باشد. در پایان، به منظور نمایش توانایی و همچنین صحت سنجی روش پیشنهادی، زمان ساخت یک قطعه در دو نوع جهت گیری مختلف براساس روش پیشنهادی تخمین زده می شود و با نتایج حاصل از شبیه سازی فرآیند در نرم افزارهای منکاتی و رپتیرهاست مقایسه می شود. میانگین خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت گیری نوع اول در مقایسه با نرم افزارهای منکاتی و رپتیرهاست به ترتیب برابر 5 و 9 درصد و در جهت گیری نوع دوم 7 و 8 درصد می باشد. همچنین سرعت محاسبه نتایج برای قطعه مورد مطالعه با استفاده از روش پیشنهادی به ترتیب حدود 100 و 140 برابر سریع تر از نرم افزارهای 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

پیش بینی بسیاری از آینده پژوهان عرصه فناوری به عنوان آینده ساخت و تولید معرفی می شود [1]. با معرفی اولین دستگاه تجاری ساخت افزودنی در سال 1986 این فرآیند ساخت به عنوان یک فناوری کلیدی مطرح شده است که موجب کوتاه شدن زمان ساخت، ساخت قطعات با اشکال پیچیده و رسیدن به دقت ابعادی بالاتر می شود [2]. فرآیندهای ساخت افزودنی بر خلاف ماشین کاری یک فرآیند افزایشی است به طوری که قطعه با اضافه شدن

در توصیف فناوری ساخت افزودنی<sup>1</sup>، نمونه سازی سریع<sup>2</sup> یا چاپ سه بعدی<sup>3</sup> بر کسی پوشیده نیست که به چه میزان این فناوری هر روز رو به گسترش است و به چه میزان در آینده صنعت نقش آفرین خواهد بود. این فناوری به

<sup>1</sup> Additive Manufacturing  
<sup>2</sup> Rapid Prototyping  
<sup>3</sup> 3D Printing

### Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مواد روی هم، و شکل گیری لایه به لایه ساخته می شود [3].

برای نمونه سازی با استفاده از این روش پس از طراحی قطعه در نرم افزارهای طراحی<sup>1</sup> باید فرمت STL از قطعه مورد نظر ایجاد شود. پس از آن برای تنظیم پارامترهای دستگاه مانند ضخامت لایه های ساخت، سرعت پاشش پودر، قدرت لیزر و تعیین جهت گیری ساخت، قطعه باید در یکی از نرم افزارهای دستگاه چاپ گر وارد شود. پس از آن قطعه از چپش لایه ها بر روی یکدیگر ایجاد می شود. در نهایت نیز عملیات پس پردازش مانند عملیات پرداخت و حذف مواد تکیه گاهی برای رسیدن به قطعه مطلوب انجام می شود [4].

از شناخته شده ترین فرآیندهای ساخت افزودنی می توان به فرآیند استریولیتوگرافی (SLA)، تفجوشی انتخابی با لیزر<sup>2</sup> (SLS)، ذوب انتخابی با لیزر<sup>3</sup> (SLM) اشاره کرد. این دسته بندی ها معمولاً بر اساس جنس ماده مورد استفاده برای ساخت قطعه انجام می شود. برای مثال در فرآیند استریولیتوگرافی از رزین و در فرآیندهای تفجوشی انتخابی با لیزر و ذوب انتخابی با لیزر از مواد پودری استفاده می شود [5].

بررسی های انجام شده نشان می دهد یکی از مهمترین عملیات هایی که در ساخت قطعات با روش ساخت افزودنی وجود دارد الگوی جهت گیری قطعه است که خواص و ویژگی های قطعه را تغییر می دهد [6]. به طوری که جهت گیری ساخت قطعات حتی بر روی خواص مکانیکی قطعه از جمله استحکام کششی نهایی قطعه و میانگین نرخ کرنش پلاستیک قطعه ساخته شده نیز می تواند تأثیر گذار باشد [7]. به همین دلیل قبل از شروع به ساخت قطعه باید جهت گیری بهینه مربوط به ساخت قطعه برای دستگاه چاپ گر تعریف شود [8].

در این بین زمان ساخت یکی از عواملی است که به طور کامل تابعی از الگوی جهت گیری ساخت قطعه است. در گذشته مطالعاتی در رابطه با تخمین زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی انجام شده است. گیانانیس و همکاران روشی برای محاسبه زمان ساخت قطعه مبتنی بر حجم و سطح قطعه ارائه کردند که نیازی به لایه زنی قطعه ندارد در این روش ضخامت لایه ها ثابت در نظر گرفته می شود. برای محاسبه کل طول حرکت لیزر از مقدار حجم قطعه و مفهوم سطح عمودی استفاده شده است [9]. صنعتی نژاد و همکاران الگوریتمی جدید برای تخمین زمان ساخت قطعه ارائه دادند که می تواند در مسائل بهینه سازی نیز مورد استفاده قرار گیرد. مهمترین مشخصه روش آن ها این است که می تواند برای ضخامت لایه های ثابت و متغیر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین روش ارائه شده توسط آن ها زمان محاسبات را کاهش می دهد [10]. الکساندر برای محاسبه دقیق زمان ساخت روشی بر اساس مساحت سطح مقطع بعد از لایه بندی، سرعت پاشش پودر و افزایش و کاهش قدرت لیزر ارائه کرد. مدل ارائه شده توسط وی زمان را زیر زمان واقعی تخمین می زد [11]. در راستای بهینه سازی چند هدفه جهت گیری قطعه، پندی مدلی برای تخمین زمان ساخت قطعه ارائه داد که در مدل پیشنهادی وی زمان ساخته قطعه بر مبنای حاصل ضرب تعداد لایه ها در زمان تولید هر لایه محاسبه می شود. زمان تولید هر لایه نیز مجموع زمان های مربوط به مساحت سطح هر مقطع و مقدار مواد تکیه گاهی آن در نظر گرفته شده است [12]. چنگ و همکاران روشی برای جهت گیری بهینه قطعه به منظور دستیابی به دقت ابعادی قطعه و کاهش زمان ساخت پیشنهاد

کرده اند. منبع ایجاد خطا که منجر به کاهش دقت ابعادی قطعه می شود اثر پله پله ای، انقباض و اعوجاج است که معمولاً در تولید لایه به لایه قطعه رخ می دهد. هدف مورد بررسی، کاهش زمان ساخت بود که با کاهش تعداد لایه های ساخت به وسیله جهت گیری مناسب قطعه انجام شده است. همچنین کاهش تعداد لایه های ساخت منجر به کاهش اثر پله پله ای نیز گردید. به طوریکه ابتدا چند جهت گیری برای رسیدن به دقت ابعادی قطعه انتخاب شد، سپس از بین آن ها یک یا دو جهت گیری 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 محاسبه زمان بر اساس حجم تبدیل شده و فضای خالی زیر قطعه که منجر به استفاده از مواد تکیه گاهی می شود، ارائه دادند. مدل ارائه شده حدود ده درصد اختلاف با زمان واقعی را نشان داده است [15]. در مقاله ارائه شده توسط ژانگ و همکاران روشی برای تخمین زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی با استفاده از تئوری خاکستری<sup>4</sup> ارائه شده است. ورودی های این سیستم خاکستری عوامل مربوط به دستگاه ساخت قطعه مانند توان لیزر، عوامل مربوط به ویژگی های قطعه طراحی شده، عوامل مربوط به چگونگی ساخت قطعه مانند جهت گیری ساخت و خروجی این سیستم تخمین زمان ساخت قطعه می باشد [16]. چوی یک مدل پارامتری برای محاسبه زمان ساخت قطعه در فرآیند SLS ارائه داد. مدل ارائه شده توسط وی فقط بر اساس سرعت لیزر، ارتفاع قطعه و دمای محفظه ساخت بود که به دلیل نادیده گرفتن شیوه ساخت قطعه مانند جهت گیری ساخت و مقدار مواد تکیه گاهی دارای دقت پایینی است [17].

در این مقاله، روش جدیدی جهت تخمین زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی بر مبنای جهت گیری های مختلف قطعه معرفی شده است. استفاده از روش پیشنهادی منجر به یک رابطه تحلیلی می شود که می توان از آن جهت تعیین جهت گیری بهینه در کمینه سازی زمان ساخت افزودنی استفاده کرد. از جمله مزایای این روش می توان به کاهش هزینه محاسباتی و افزایش سرعت محاسبه زمان ساخت قطعه اشاره کرد. همچنین بیشتر نرم افزارهای رایج دستگاه های چاپگر سه بعدی توانایی محاسبه زمان ساخت در تمام جهت گیری ها را نداشته اما روش پیشنهادی در کار حاضر این محدودیت را ندارد و می تواند زمان ساخت در تمام جهت گیری ها در فضای سه بعدی را محاسبه کند. در بخش 2، مفاهیم پایه مربوط به فرمت STL فایل مورد استفاده جهت مدل سازی نمونه جهت ساخت افزودنی مرور می گردد. در بخش 3، روش پیشنهادی برای تخمین زمان ساخت بر مبنای جهت گیری قطعه ارائه می شود. در بخش 4، به منظور نمایش توانایی روش و صحت سنجی نتایج حاصل از روش پیشنهادی، زمان ساخت یک قطعه نمونه بر اساس روش پیشنهادی تخمین زده می شود و با نتایج نرم افزار منکاتی<sup>5</sup> و رپتیه است<sup>6</sup> مقایسه می شود. در پایان، جمع بندی مقاله در بخش 5 ارائه می گردد.

## 2- فرمت STL

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

<sup>5</sup> Grey theory

<sup>6</sup> MankatiUM

<sup>7</sup> Repetier-Host

<sup>1</sup> CAD Software

<sup>2</sup> Stereo Lithography

<sup>3</sup> Selective Laser Sintering

<sup>4</sup> Selective Laser melting

جدول 1 جمع بندی 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	نحوه صحت سنجی نتایج
گیانائیس و همکاران [9]	محاسبه زمان ساخت قطعه	محاسبه حجم و سطح قطعه، عدم نیاز به لایه زنی، ضخامت لایه ها	نمونه سازی تجربی قطعه با فرآیند SLA
صنعتی نژاد و همکاران [10]	محاسبه زمان ساخت قطعه	طول حرکت لیزر، سرعت حرکت لیزر، سطح مقطع هر لایه	نرم افزار ویزکم آرپی
الکساندر و همکاران [11]	بهینه سازی فرآیند ساخت افزودنی به منظور کمینه کردن زمان و مقدار مواد تکیه گاهی مصرفی	محاسبه سرعت پاشش پودر، محاسبه افزایش و کاهش قدرت لیزر	-----
پندی و همکاران [12]	بهینه سازی فرآیند ساخت افزودنی به منظور کمینه کردن زمان و زبری سطح	سطح مقطع هر لایه، مقدار مواد تکیه گاهی	شبیه سازی فرآیند در نرم افزار متلب
چنگ و همکاران [13]	بهینه سازی فرآیند ساخت افزودنی به منظور کمینه کردن زمان و اثر پله پله ای	ارتفاع ساخت قطعه، تعداد لایه ها	شبیه سازی فرآیند در نرم افزار متلب
سالیوان و همکاران [14]	محاسبه زمان ساخت قطعه	الگوریتم اسکن، سرعت لیزر	نمونه سازی تجربی
کمپل و همکاران [15]	محاسبه زمان ساخت قطعه	اشکال حجمی پایه برای تبدیل قطعه، فضای خالی زیر قطعه	نمونه سازی تجربی
ژانگ و همکاران [16]	محاسبه زمان ساخت قطعه	توان لیزر، جهت گیری ساخت	شبیه سازی فرآیند در نرم افزار متلب
چوی و همکاران [17]	محاسبه زمان ساخت قطعه	سرعت لیزر، ارتفاع ساخت، قدرت لیزر، دمای محفظه ساخت	نمونه سازی تجربی

زمان ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی تابع بسیاری از عوامل از جمله قدرت دستگاه، سرعت اسکن، نوع هاشورزنی لایه ها، فاصله هاشور، سرعت پاشش پودر، جهت گیری قطعه تعداد لایه های ساخت قطعه و مقدار مواد تکیه گاهی مصرفی می باشد. در این بخش، روش جدیدی برای تخمین زمان ساخت قطعه در جهت گیری های مختلف ارائه می شود.

### 3-1- ارائه فرمول بندی جهت تخمین زمان در فرآیند ساخت افزودنی

جهت گیری ساخت قطعه می تواند مستقیماً بر روی تعداد لایه های ساخت قطعه و مقدار مواد تکیه گاهی مصرفی مؤثر باشد. برای مثال همان طور که در "شکل 2a" مشاهده می شود در ساخت یک استوانه با روش ساخت افزودنی تعداد لایه های قطعه در حالت ایستاده بیشتر از تعداد لایه های قطعه که در حالت خوابیده است.

مقدار مواد تکیه گاهی مورد استفاده برای ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی نیز در جهت گیری های مختلف متفاوت است. از آن جا که در فرآیندهای ساخت افزودنی، قطعات به صورت لایه لایه ساخته می شوند، لایه ها در قسمتهایی از قطعه که حالت برآمده، آویزان یا زیر آن ها خالی باشد، نیاز به تکیه گاه دارند. البته تکیه گاه یا پایه در تمام فرآیندها مورد نیاز نیست. به عنوان مثال فرآیند SLA نیازمند وجود تکیه گاه برای ساخت قطعه است در حالی که فرآیند SLS نیاز به تکیه گاه ندارد. در صورت نیاز، تکیه گاه به عنوان بخشی از قطعه به مدل CAD اضافه شده و پس از ساخت از قطعه جدا می شوند [20].

در صورتی که این مواد تکیه گاهی مورد استفاده قرار نگیرند، قطعه پس از گذشت مدتی از زمان ساخت، واژگون می شود. همان گونه که در "شکل 2b" نشان داده شده است در استوانه ایستاده بر روی قاعده نیازی به استفاده از مواد تکیه گاهی نیست ولی در حالتی که استوانه به صورت مایل جهت گیری شده است برای ساخت قطعه باید از مواد تکیه گاهی استفاده شود.

برای ارائه روشی برای تخمین زمان ساخت قطعه در جهت گیری های مختلف، زمان تابعی از تعداد لایه های مورد نیاز برای ساخت قطعه و مقدار مواد تکیه گاهی مورد استفاده در نظر گرفته شده است.

قطعه استفاده می شود. عبارت STL معمولاً به اختصار برای عبارت استریولیتروگرافی استفاده می شود. همچنین در برخی از مطالعات برای عبارت های "زبان مثلث استاندارد" و یا "زبان موزاییکی استاندارد" نیز استفاده شده است [18]. وقتی که قطعه طراحی شده به فرمت STL تبدیل می شود تمام مدل به تعداد زیادی مثلث در فضای سه بعدی تقسیم می شود. "شکل 1a" قطعه طراحی شده در نرم افزار طراحی و "شکل 1b" فرمت STL این قطعه را نشان می دهد. به زبان ساده فرمت STL قطعه، از یک سری مثلث های مرتبط برای دوباره ساختن هندسه سطح یک مدل جامد استفاده می کند. برای ساخت سطح قطعه هرچه تعداد مثلث ها بیشتر باشد ساینز فایل بزرگ تر شده و قطعه دقیق تر می شود. در فایل های STL بزرگ تر زمان بیشتری صرف لایه بندی و ایجاد مقاطع می شود. البته این امر اثر ناچیزی بر زمان ساخت قطعه دارد [19]. از یک فایل STL می توان لیست کامل مختصات رئوس مثلث ها و بردار عمود بر هر یک از این مثلث ها را استخراج کرد.

### 3- روش پیشنهادی برای تخمین زمان در فرآیندهای ساخت افزودنی

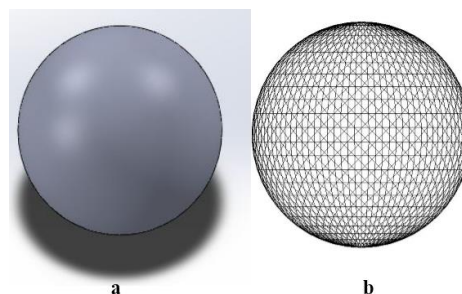


Fig. 1 (a) CAD part, (b) STL format

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

<sup>1</sup> Standard Triangle Language

<sup>2</sup> Standard Tessellation Language

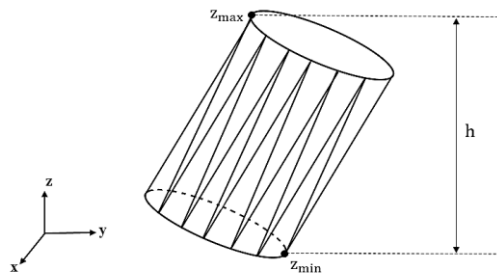


Fig. 4 Determination number of layers by height of fabrication

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 مؤلفه 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 محفظه ساخت مهم می‌باشد چرا که هرچه ارتفاع این سطوح از کف محفظه 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 محاسبه مقدار مواد تکیه‌گاهی برای فرمت STL استوانه 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.

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

از آن‌جا که مؤلفه 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 محفظه ساخت، میانگین ارتفاع سه رأس سطوح رو به پایین محاسبه می‌شود؛

$$Z_{down} = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \quad (5)$$

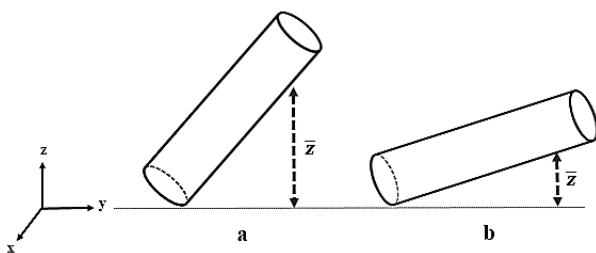


Fig. 5 Effect of orientation on average height of surfaces, (a) higher average height, (b) lower average height

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

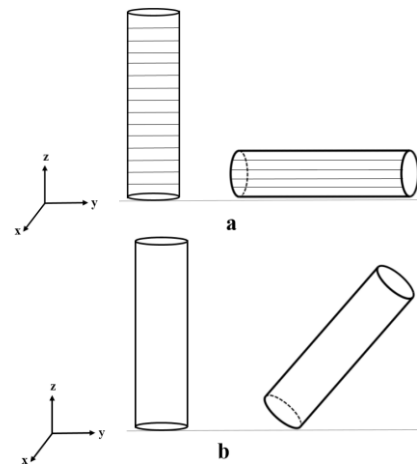


Fig. 2 Part in different orientations, (a) effect of orientation on the number of layers, (b) effect of orientation on the amount of support material

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

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

برای محاسبه تعداد لایه‌های مورد نیاز جهت ساخت قطعه و مقدار مواد تکیه‌گاهی از فرمت STL استفاده می‌شود. بدین منظور تابعی برای استخراج مشخصات هندسی قطعه مورد نظر ایجاد شده به نحوی که ورودی این تابع قطعه طراحی شده در فرمت STL بوده و خروجی آن مختصات رئوس هر یک از مثلث‌ها و مؤلفه‌های بردار نرمال هر یک از این المان‌ها می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 3" قابل مشاهده است برای المان  $i$  ام 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 هر لایه و  $n$  تعداد لایه برای ساخت کل قطعه است.

$$n = \frac{h}{d} \quad (2)$$

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

$$h = z_{\max} - z_{\min} \quad (3)$$

در رابطه (3)،  $z_{\max}$  بزرگ‌ترین مؤلفه سوم رئوس مثلث‌ها و  $z_{\min}$  کوچک‌ترین مؤلفه سوم این رئوس است.

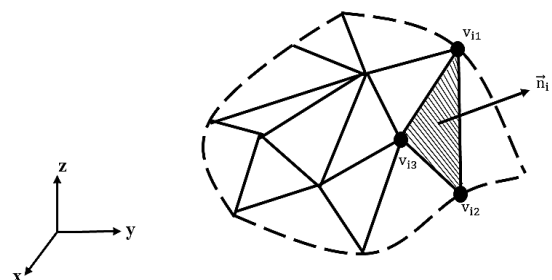


Fig. 3 Vertices coordinates of triangles and components of normal vector

شکل 3 مختصات رئوس و مؤلفه‌های بردار نرمال استخراج شده

جائیکه  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب زوایای دوران حول محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشند. به این ترتیب، زمان تخمینی ساخت قطعه در جهت‌گیری‌های مختلف از رابطه (9) قابل تخمین است:

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

به طوری که مقادیر  $z_{\max} - z_{\min}$  و Support تابعی از جهت‌گیری قطعه یعنی زوایای دوران  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  هستند.

### 3-3- ارائه فلوجارت 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 محاسبه تعداد لایه‌ها و مقدار مواد تکیه‌گاهی موردنیاز برای ساخت قطعه براساس یک رابطه تحلیلی محاسبه می‌شود. فلوجارتی از الگوریتم پیشنهادی شامل مراحل محاسبه زمان ساخت قطعه در "شکل 8" نشان داده شده است. خروجی این فلوجارت 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 محاسبه 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- مطالعه موردی

برای صحت‌سنجی روش پیشنهادی جهت تخمین زمان ساخت قطعه‌ای مانند "شکل 9a" در نرم‌افزار کنیا<sup>1</sup> 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 محاسبه زمان ساخت قطعه باید فرمت STL از قطعه موردنظر ایجاد شود.

در جهت‌گیری نوع اول، قطعه موردنظر حول محور  $y$  به اندازه  $\beta$  و به صورت پاد ساعت‌گرد دوران داده شده‌است. به بیان دیگر زوایای  $\alpha$  و  $\gamma$  برابر صفر در نظر گرفته شده و زاویه  $\beta$  مقدار دهی شده‌است. مقادیر زمان ساخت

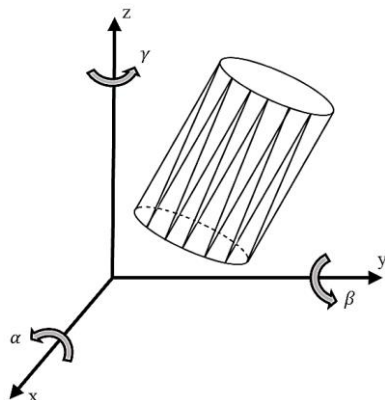


Fig. 7 Determining the Orientations by rotation angles

شکل 7 تعیین جهت‌گیری‌های مختلف قطعه با استفاده از زوایای دوران

<sup>1</sup> CATIA

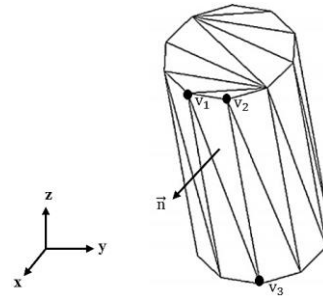


Fig. 6 Vertices coordinates and components of normal vector for a triangles

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

همچنین برای محاسبه 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 به دست آمده‌است:

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

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

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

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

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

#### افزودنی

برای ایجاد جهت‌گیری‌های مختلف قطعه از ماتریس دوران اوپلر استفاده شده است [21]. به طوری که با ضرب این ماتریس دوران در مختصات رئوس مثلث‌ها و بردارهای نرمال بر این سطوح می‌توان این مقادیر را در جهت‌گیری‌های مختلف به دست آورد.

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

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

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

به طوری که:

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

زمان‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزارهای منکاتی، رپتیرهاست و روش پیشنهادی زمان‌های ساخت برحسب زاویه دوران حول محور  $y$  (زاویه  $\beta$ ) 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 به 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.

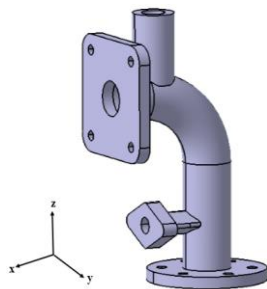


Fig. 9 Designed part in CATIA

شکل 9 قطعه طراحی شده در نرم‌افزار کتیا

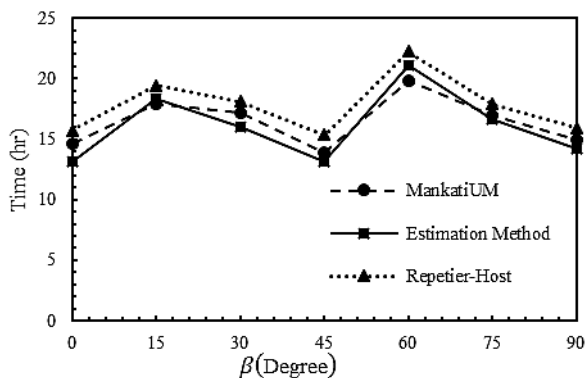


Fig. 10 Calculated time for build part in the first type of orientation

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

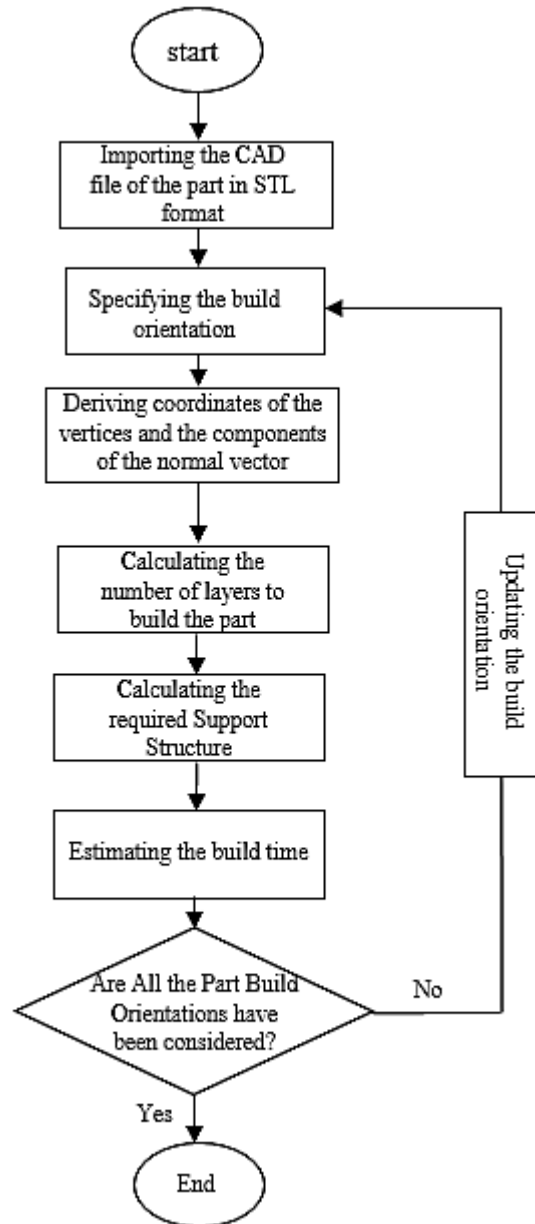


Fig. 8 Algorithm of time calculation

شکل 8 الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه زمان قطعه

قطعه 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 رابطه (9)، تخمین کمی از زمان ساخت برای تشخیص جهت‌گیری بهینه قطعه به منظور کمینه کردن زمان ساخت قطعه هستند. برای تبدیل رابطه (9) به یک تساوی کافی است این رابطه در یک ثابت مانند  $K$  ضرب شود.

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

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

نتایج حاصل از روش پیشنهادی از ضرب کردن ضریب ثابت  $K$  در اعداد به دست آمده توسط رابطه (9) استخراج شده است. برای مشاهده بهتر

میانگین خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت گیری نوع اول در مقایسه با نرم افزارهای منکاتی و رپتیهاست به ترتیب برابر 5 و 9 درصد و در جهت گیری نوع دوم 7 و 8 درصد می باشد.

از مزایای روش ارائه شده در این مقاله سرعت محاسبه زمان نسبت به نرم افزارهای موجود می باشد. جدول مدت زمان محاسبه نتایج در هر دو نوع جهت گیری را نشان می دهد.

مشاهده می شود که سرعت محاسبه نتایج برای قطعه پیشنهادی با استفاده از روش ارائه شده در کار حاضر حدود 140 برابر سریع تر از نرم افزار منکاتی، و حدود 100 برابر سریع تر از نرم افزار رپتیهاست است که با پیچیده تر شدن و افزایش ابعاد قطعه طراحی شده زمان محاسبه نتایج می تواند بسیار مهم باشد.

5- نتیجه گیری

جهت گیری ساخت قطعه در فرآیندهای ساخت افزودنی بر روی خواص قطعه از جمله استحکام، چروک خوردگی، زمان ساخت، صافی سطح، مقدار مواد تکیه گاهی مورد استفاده تأثیرگذار است. در این مقاله روشی جدید برای تخمین زمان ساخت قطعه در جهت گیری های مختلف ارائه گردید. بر اساس

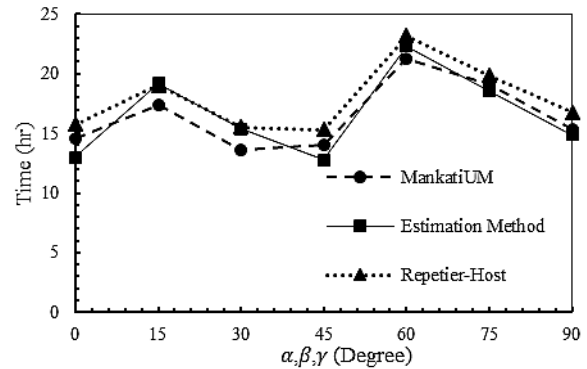


Fig. 11 Calculated time for build part in the second type of the part orientation

شکل 11 زمان محاسبه شده برای ساخت قطعه در جهت گیری نوع دوم

جدول 3 زمان محاسبه شده برای ساخت قطعه در جهت گیری نوع دوم

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

زاویه (درجه)	نرم افزار منکاتی (ساعت)	نرم افزار رپتیهاست (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

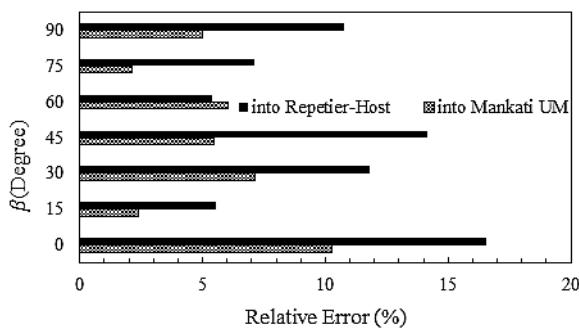


Fig. 12 Proposed method relative error in in the first type of orientation  
شکل 12 خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت گیری نوع اول

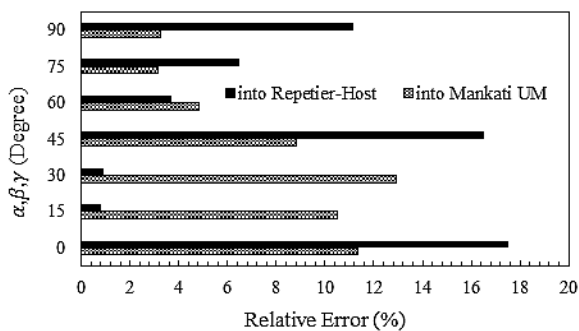


Fig. 13 Proposed method relative error in in the second type of orientation

شکل 13 خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت گیری نوع دوم

جدول 4 سرعت محاسبه نتایج روش پیشنهادی

Table 4 calculation cost of proposed method

نرم افزار - Repetier-Host	نرم افزار MankatiUm	روش پیشنهادی	نوع جهت گیری
40 (s)	70 (s)	کمتر از یک ثانیه	جهت گیری نوع اول
150 (s)	210 (s)	کمتر از یک ثانیه	جهت گیری نوع دوم

با استفاده از مقادیر زمان محاسبه شده در 14 جهت گیری مختلف (مجموعه نوع جهت گیری) توسط روش پیشنهادی، به کمک روش کریجینگ می توان تابع زمان بر حسب زوایای دوران حول محورهای مختصات را استخراج کرد.

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

با تعیین تابع زمان برای قطعه پیشنهادی بر حسب زوایای دوران می توان از آن به عنوان یکی از توابع هدف در مسائل بهینه سازی استفاده کرد و با استفاده از روش های بهینه سازی جهت گیری بهینه قطعات را تعیین کرد. برای مقایسه بهتر نتایج، با استفاده از روابط (12-الف) و (12-ب) خطای نسبی زمان های محاسبه شده توسط روش پیشنهادی محاسبه می شود.

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

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

"شکل های 12 و 13" به ترتیب خطای نسبی روش پیشنهادی در مقایسه با نرم افزارهای منکاتی و رپتیهاست در جهت گیری نوع اول و دوم را نشان می دهد.

- [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)

روش پیشنهادی، رابطه تحلیلی و کاربردی براساس تعداد لایه ها و مقدار مواد تکیه گاهی استخراج شد. مطابق الگوریتم پیشنهادی، پس از دریافت فرمت STL قطعه و تعیین روند استراتژی تغییر جهت گیری قطعه، زمان تخمینی ساخت قطعه پس از محاسبه تعداد لایه ها و مقدار مواد تکیه گاهی مورد نیاز برای ساخت قطعه براساس یک رابطه تحلیلی محاسبه می شود.

به منظور نمایش توانایی و صحت سنجی روش پیشنهادی، زمان ساخت یک قطعه نمونه براساس روش پیشنهادی تخمین زده شد و با نتایج شبیه سازی فرآیند در نرم افزارهای منکاتی و رپتیرهاست مقایسه گردید. میانگین خطای نسبی روش پیشنهادی در جهت گیری نوع اول در مقایسه با نرم افزارهای منکاتی و رپتیرهاست حداکثر 9 درصد و در جهت گیری نوع دوم حداکثر 8 درصد می باشد. همچنین سرعت محاسبه نتایج برای قطعه مورد مطالعه با استفاده از روش پیشنهادی حداقل حدود 100 برابر سریع تر از نرم افزارهای رپتیرهاست و منکاتی است. مقایسه جوابها نشان داد که نتایج روش پیشنهادی به منظور تخمین زمان ساخت با نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزارهای منکاتی و رپتیرهاست انطباق خوبی دارد. براساس روش پیشنهادی، نتایج حاصل برخلاف روش های پیشین در قالب یک رابطه تحلیلی ارائه می شود که می تواند به عنوان یک تابع هدف در طراحی بهینه 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 Edition, 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.