



Improving the Surface Roughness, Material Consumption and Abrasion Ability of Additive Manufacturing Products by Segmentation Design

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Kazemi M.¹ MSc,
Rahimi A.*¹ PhD

How to cite this article

Kazemi M, Rahimi A. Improving the Surface Roughness, Material Consumption and Abrasion Ability of Additive Manufacturing Products by Segmentation Design. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):689-699.

ABSTRACT

Additive manufacturing technology significantly simplifies the production of complex 3D parts directly by the computer-aided design model. However, additive manufacturing processes have unique flexibility. They still have restrictions that don't allow engineers to generate some specific geometric shapes, easily. Some of these restrictions are the consumption of materials to supports, the poor abrasion resistance and the inferior surface finish of some surfaces with certain angles. One of the methods to overcome these problems is designing by segmentation. The proposed methodology consists of two steps: 1) segmenting of the 3D model and 2) exploring the best orientation for each segment. In the first step, engineers consider the possible number of segments and the connection method of segments. In this paper, a series of segments is obtained by recognition of features and separating them with one or more appropriate planes. In the second step, the best fabrication orientation should be chosen. The criterion for optimization is that the support volume, abrasion ability, and surface roughness should be minimum. The operation is performed automatically by the algorithm created based on principles of the Particle swarm optimization algorithm using visual C#. Experimental tests show that segmentation design improves additive manufacturing processes from the aspects of material consumption, abrasion volume, and surface quality. This paper presents an original approach to improving the efficiency of additive manufacturing technologies that make the additive manufacturing closer to maturity.

Keywords Additive Manufacturing; Material Consumption; Surface Roughness; Abrasion Resistance; Segmentation Design

CITATION LINKS

[1] A decomposition-based approach to layered ... [2] Production planning in additive manufacturing and 3D ... [3] Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D Printed ... [4] Supports effect on tensile strength of the stereolithography ... [5] Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital ... [6] Design for additive manufacturing: A method to explore unexplored regions of the design ... [7] Costs and cost effectiveness of additive ... [8] An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites via fused deposition modeling process: In-melt simultaneous ... [9] Volume decomposition of CAD models for rapid prototyping ... [10] Support-free interior carving for 3D ... [11] An assembly-level design for additive manufacturing ... [12] Evaluation of the surface roughness of additive manufacturing parts based on the modelling of cusp ... [13] Scanning-projection based stereolithography: Method and ... [14] Improving rapid prototyping processing speeds by adaptive ... [15] Partitioning 3D surface meshes using watershed ... [16] Automatic subdivision and refinement of large components for rapid prototyping ... [17] An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL ... [18] Chopper: partitioning models into 3D-printable ... [19] Approximate pyramidal shape ... [20] Assembly based part design to improve the additive manufacturing productivity: process time, cost and surface ... [21] Adaptive slicing using stepwise uniform ... [22] Functionality-based part orientation for additive ... [23] Feature based fabrication in layered ... [24] What are feature ... [25] Particle swarm ... [26] Surface deviation modeling of LMT processes- A comparative ... [27] Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision ... [28] Introduction to optimum ... [29] Introducing hierarchical particle swarm optimization to optimal part orientation in fused deposition ... [30] Introducing hierarchical particle swarm optimization to optimal part orientation in fused deposition ... [31] Force and effort analysis of unfastening actions in disassembly ...

¹Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: No. 35, Hafez Street, Valiasr Square, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 64543431
Fax: -
rahimi@aut.ac.ir

Article History

Received: December 28, 2018
Accepted: July 14, 2019
ePublished: March 01, 2020

بهبود مقدار ماده مصرفی، مقاومت سایشی و صافی سطح در تولید قطعات ساخت افزایشی به روش طراحی بر اساس تقسیم‌بندی

مهدی کاظمی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

عبدالرضا رحیمی PhD*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

تکنولوژی ساخت افزایشی تا حد زیادی تولید قطعات سه‌بعدی پیچیده از روی مدلشان را آسان‌تر کرده است. اگرچه فرآیندهای ساخت افزایشی انعطاف‌پذیری منحصر به فردی دارند، اما محدودیت‌هایی نیز دارند که باعث می‌شود محققان نتوانند هر شکل هندسی مشخصی را به راحتی بسازند. برخی از این محدودیت‌ها عبارتند از: مصرف ماده به‌منظور ایجاد ساختار پشتیبان، صافی سطح نامناسب برخی از سطوح با زوایای خاص و غیره. یکی از روش‌های غلبه بر این مشکلات، طراحی بر اساس تقسیم‌بندی قطعات است. روش پیش‌بینی‌شده متشکل از دو گام است: ۱- تقسیم مدل سه‌بعدی قطعه و ۲- یافتن بهترین جهت ساخت برای هر بخش جدا شده. در گام اول محققان به دنبال حداقل تقسیمات ممکن به وسیله تشخیص فیچرها و جداسازی آنها با صفحات مناسب و همچنین نحوه اتصال این قسمت‌ها هستند که در گام بعدی بهترین جهت ساخت برای هر بخش جدا شده بایستی انتخاب شود. معیار انتخاب بهترین حالت تقسیم‌بندی و بهترین جهت‌های ساخت این است که حجم ساختار پشتیبان، زبری سطح میانگین و قدرت سایشی سطح بایستی حداقل شود. الگوریتمی که این کار را انجام می‌دهد، بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ایجاد شده است که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی سی‌شارپ، نوشته شده است. به‌منظور صحت‌گذاری بر عملکرد الگوریتم ارائه‌شده، آزمایش‌های عملی نیز انجام شدند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که طراحی بر اساس تقسیم‌بندی، کارایی فرآیندهای ساخت افزایشی را از دیدگاه‌های ذکر شده بهبود می‌بخشد. این تحقیق روشی نو برای بهبود عملکرد و کارایی تکنولوژی‌های ساخت افزایشی ارائه کرده است که در جهت نزدیک شدن این تکنولوژی‌ها به مرحله بلوغ، گام بزرگی خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: ساخت افزایشی، مقدار ماده مصرفی، زبری سطح، قدرت سایشی، طراحی بر اساس تقسیم‌بندی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۳

*نویسنده مسئول: rahimi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

اخیراً، طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر پیشرفت زیادی داشته است؛ به گونه‌ای که محققان نه تنها می‌توانند طراحی و آنالیز یک محصول را به کمک کامپیوتر انجام دهند، بلکه همچنین می‌توانند از روی مدل سه‌بعدی آن یک نمونه واقعی نیز بسازند^[1]. این تکنولوژی ساخت از روی مدل سه‌بعدی که به صورت لایه به لایه روی هم اضافه می‌شوند، ساخت افزایشی نام دارد. اصل اساسی و مزیت اصلی تکنولوژی‌های ساخت افزایشی این است که محصول می‌تواند مستقیماً از روی مدل سه‌بعدی و بدون نیاز به برنامه‌ریزی فرآیند ساخته شود^[2, 3]. تکنولوژی‌های ساخت افزایشی، تولید قطعات سه‌بعدی پیچیده از روی مدلشان را به شکل قابل توجهی

ساده‌تر کرده‌اند^[4]. دیگر فرآیندهای ساخت به یک آنالیز دقیق از هندسه محصول نیاز دارند؛ در حالی که فرآیندهای ساخت افزایشی تنها به اطلاعات اولیه در مورد ابعاد محصول و مشخصات مواد مورد استفاده نیاز دارند^[5].

ساخت قطعات با هندسه پیچیده مهم‌ترین مزیت فرآیندهای ساخت افزایشی است^[6]. در فرآیندهای ساخت سنتی، ساخت یک قطعه پیچیده به شکل یکپارچه مشکل است، بنابراین قطعه پیچیده باید به بخش‌های مختلف تقسیم شود^[7]. اما در مقابل، فرآیندهای ساخت افزایشی این اجازه را به طراحان می‌دهند که بدون توجه به مشکلات مونتاژ، طراحی را انجام دهند؛ زیرا این فرآیندها محصول را لایه به لایه می‌سازند^[8]. با این حال، سادگی در بخش طراحی باعث نمی‌شود که نرخ تولید فرآیندهای ساخت افزایشی نسبت به فرآیندهای سنتی بیشتر باشد. به این دلیل است که ساخت افزایشی به‌منظور افزایش بهره‌وری نیاز به یکپارچه‌سازی مراحل طراحی و ساخت دارد.

اگرچه فرآیندهای ساخت افزایشی انعطاف‌پذیری بالایی دارند ولی هنوز محدودیت‌هایی نیز دارند که باعث می‌شود محققان نتوانند برخی اشکال هندسی خاص را به راحتی بسازند^[9]. با وجود اینکه دقت سیستم‌های مختلف ساخت افزایشی متفاوت است، ولی بعضی مشکلات عمومی در همه سیستم‌ها وجود دارد. از جمله این مشکلات، مصرف ماده برای ساختن ساختار پشتیبان که در نهایت از قطعه اصلی جدا خواهند شد^[10]، صافی سطح نامطلوب برخی سطوح با زوایای خاص، برخی مشخصات مکانیکی نامطلوب و غیره هستند^[11]. یکی از روش‌های غلبه بر این مشکلات، طراحی بر اساس تقسیم‌بندی است. در این روش، مدل سه‌بعدی قطعه مورد نظر به چندین قسمت مختلف تقسیم می‌شود.

شکل ۱- الف، یک قطعه نمونه و جهت‌گیری آن روی سینی ساخت دستگاه را نشان می‌دهد و شکل ۱- ب، تقسیمات آن قطعه و همچنین جهت‌های ساخت آنها را نشان می‌دهد که به صورت همزمان ساخته می‌شوند. اولاً، قطعه نشان داده شده در شکل ۱- الف، تقریباً سه برابر بلندتر از قطعات شکل ۱- ب است. دوماً، ساخت برخی از بخش‌های قطعه شکل ۱- الف به ساختار پشتیبان نیاز دارد، اما بخش‌های نشان داده شده در شکل ۱- ب به ساختار پشتیبان نیاز ندارند. سوماً، زاویه بردار نرمال تمامی سطوح نسبت به افق در شکل ۱- ب برابر صفر یا ۹۰ درجه است اما در شکل ۱- الف چندین سطح وجود دارد که زاویه بردار نرمالشان نزدیک به ۴۵ درجه است. به دلیل ویژگی ذاتی محصولات ساخت افزایشی که به صورت لایه به لایه ساخته می‌شوند، زمانی که زاویه سطوح ۴۵ درجه باشد، صافی سطح افت خواهد کرد^[12]. از سوی دیگر، در این تحقیق نشان داده می‌شود که زاویه سطح نزدیک به ۴۵ درجه باعث افزایش قدرت سابندگی سطح می‌شود و در نتیجه سطح مقابلش را سریع‌تر سایش می‌دهد. بدین ترتیب مشخص می‌شود که طراحی بر اساس تقسیم‌بندی باعث بهبود در چهار پارامتر زمان ساخت، مقدار ماده مورد استفاده برای ساخت، صافی سطح و نرخ سایشی سطح می‌شود.

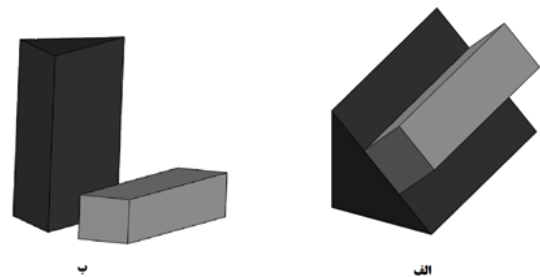
نحوه انتخاب مناسب‌ترین حلقه و تقسیم‌بندی سلسله مراتبی ارایه شد^[17]. لوئو و همکاران، چارچوبی ارایه کردند که چوپر نام داشت. چوپر می‌توانست قطعات بزرگ را به قسمت‌های کوچک‌تر تقسیم کند، به‌طوری که هر قسمت می‌توانست در محفظه ساخت دستگاه جای گیرد. ایشان چند معیار مناسب برای تقسیم‌بندی را به شکل فرمول‌هایی درآوردند که شامل قابلیت مونتاژ و دارا بودن تعداد تقسیمات کم بود^[18]. هو و همکاران، تقسیم قطعه به بخش‌های هرمی‌شکل را بررسی کردند و اولین الگوریتم ساختاریافته را برای اینگونه تقسیم‌بندی ارایه دادند. روش ارایه‌شده در تحقیق ایشان برای اشکال دوبعدی و سه‌بعدی سوراخ‌دار یا بدون سوراخ با مرزهای چندضلعی و هموار، می‌توانست به‌کار گرفته شود^[19]. وه و همکاران یک روش تقسیم‌بندی برای بهبود زمان ساخت و صافی سطح در فرآیندهای ساخت افزایشی پیشنهاد کردند. ایشان همچنین دستورالعمل‌های متنوعی برای مونتاژ قسمت‌های مختلف ارایه دادند^[20].

در این تحقیق، روش تقسیم‌بندی برای کاهش مواد مصرفی (با کاهش حجم ساختار پشتیبان)، بهبود صافی سطح و کاهش قدرت سایشی، قطعات DLP به‌کار گرفته می‌شود. هدف این تحقیق، تقسیم قطعه به بخش‌های کوچک‌تر و سپس ساخت همزمان این بخش‌ها روی مناسب‌ترین سطح، روی سینی ساخت دستگاه است. در راستای دستیابی به این هدف، کم‌بودن تعداد تقسیمات مطلوب است و مورد تاکید قرار گرفته است که شکل ۱، نمونه‌ای از اعمال این روش را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تکنولوژی فرآیند DLP، یک تکنولوژی جدیدتر نسبت به سایر فرآیندهای ساخت افزایشی است و همچنین مطابق با مروری بر ادبیات انجام‌گرفته در بالا، هیچ پژوهشگری بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند DLP را مورد بررسی قرار نداده است و همه پژوهشگران، سایر فرآیندها ساخت افزایشی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. علاوه‌بر این تفاوت بزرگ، سایر تفاوت‌های الگوریتم ارایه‌شده در این پژوهش با الگوریتم‌های قبلی عبارتند از: - هیچ پژوهشی وجود ندارد که تقسیم‌بندی قطعات و بهینه‌سازی جهت ساخت را همزمان مورد مطالعه قرار داده باشد و همه پژوهش‌های ذکرشده، فقط یکی از این دو مورد را بررسی قرار داده‌اند؛ ولی در تحقیق حاضر هر دو مورد مذکور به‌طور همزمان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

- چون در فرآیند DLP، هر لایه در یک لحظه، ساخته می‌شود؛ بنابراین زمان ساخت یک قطعه فقط تابعی از ارتفاع قطعه است و ارتباطی با شکل هر لایه ندارد. این موضوع مهم، یکی از تفاوت‌های اساسی بین الگوریتم حاضر با سایر الگوریتم‌های ارایه‌شده است.

- در الگوریتم‌های قبلی، صافی سطح فقط تابعی از اثر پله پله‌ای فرآیندهای ساخت افزایشی در نظر گرفته شده است؛ در حالی که در الگوریتم حاضر علاوه‌بر اثر پله پله‌ای، تاثیر ساختار پشتیبان روی صافی سطح نیز در نظر گرفته شده است.

- با توجه به اینکه در این پژوهش، قطعات تقسیم‌بندی می‌شوند و سپس به‌طور همزمان روی سینی ساخت دستگاه ساخته می‌شوند،



شکل ۱) ساخت یک قطعه به‌صورت یکپارچه (الف) و ساخت همان قطعه به روش تقسیم‌بندی (ب)

در این تحقیق، فرآیندهایی از ساخت افزایشی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که در آنها هر لایه در یک لحظه (Layer- Wise Processes) ساخته می‌شوند. زمان ساخت در این فرآیندها بسیار متأثر از ارتفاع قطعه است. یکی از مهم‌ترین این فرآیندها، فرآیند DLP (Digital Light Processing) است. فرآیند DLP شبیه به فرآیند استریولیتوگرافی است؛ با این تفاوت که فرآیندی است که در آن شکل کلی هر لایه در یک زمان واحد روی رزین تابانده می‌شود^[13]. این تحقیق به‌طور خاص روی فرآیند DLP تمرکز دارد. محققان زیادی روی ساخت قطعات بزرگ (بزرگ‌تر از اندازه سینی ساخت دستگاه) روی دستگاه‌های ساخت افزایشی تحقیق کرده‌اند. در این راستا، روش‌های مختلفی برای تقسیم قطعات بزرگ به بخش‌های کوچک‌تر و همچنین روش‌هایی برای چسباندن این بخش‌ها به یکدیگر ارایه شده است.

اخیراً مطالعه تقسیم‌بندی خودکار و روش لایه‌بندی به یک جنبه مهم از فرآیندهای ساخت افزایشی تبدیل شده است. به‌عنوان مثال، کروز و همکاران، روشی ارایه دادند که مدل سه‌بعدی را به چندین تکه عمودی تقسیم می‌کرد و هر تکه به‌صورت جداگانه متناسب با صافی سطح مورد نیازش لایه‌بندی می‌شد^[14]. مانگان و ویٹاکر^[15]، روشی برای تقسیم‌بندی ارایه کردند که بر اساس گوشه‌های مدل عمل می‌کرد. این روش قبلاً برای تقسیم‌بندی تصاویر استفاده می‌شد. در پژوهشی، روشی پیشنهاد کردند که بر اساس لبه‌های مدل کار می‌کرد. لبه‌ها با همدیگر منحنی‌هایی را تشکیل می‌دادند که به‌عنوان مرز بین فیچرهای (Features) مدل ارزیابی می‌شدند. این روش می‌توانست صفحات برشی مناسب را بیابد، ولی ایراد آن، این بود که برای فیچرها، لبه‌های ناپیوسته استخراج می‌کرد و در نتیجه حلقه‌های ناقص به‌دست می‌آمد^[15]. ایلیئکین و همکاران، تحقیقی روی تقسیم مدل قطعات ساخت افزایشی ترتیب دادند که هدف اصلی ایشان، حداقل کردن حجم ساختار پشتیبان به‌کمک الگوریتم تقسیم‌بندی بود^[1]. مدلین و همکاران، تقسیم‌بندی قطعات اندازه‌بزرگ ساخت افزایشی را مورد مطالعه قرار دادند که هدف ایشان برقراری امکان ساخت قطعات پیچیده و بزرگ روی دستگاه‌های ساخت افزایشی که محفظه ساخت آنها از ابعاد قطعه کوچک‌تر است، بود^[16]. هائو و همکاران، روشی را تشریح کردند که به‌کمک آن، مدل‌های ساخت افزایشی بزرگ بدون نیاز به افزایش حجم محفظه ساخت دستگاه می‌توانند ساخته شوند. در تحقیق ایشان،

جهت ساخت جدید دارای هیچ سطحی با زاویه ۴۵ درجه نباشند [22]. برای مثال قطعه نشان داده شده در شکل ۱- الف، دارای چهار سطح است که زاویه بردار نرمالشان نسبت به افق ۴۵ درجه است ولی با جدا کردن آنها و یافتن جهت ساخت مناسب برای هر کدام، دیگر هیچ سطحی با زاویه ۴۵ درجه باقی نمانده است (شکل ۱- ب). این مراحل به صورت خودکار (در موارد لزوم می‌تواند به صورت دستی باشد) توسط الگوریتمی که توسط ویژوال سی‌شارپ ایجاد شده است، انجام می‌پذیرد.

۲-۱- روش تقسیم‌بندی

این بخش در مورد تقاطع فیچرها بحث می‌کند و حلقه تقاطع فیچرها (ILF; Interaction Loop of Features) را برای یافتن تقاطع فیچرهای قطعات ساخت افزایشی معرفی می‌کند. برای جدا کردن فیچرهای یک مدل سه بعدی، یافتن تقاطع فیچرها یک موضوع بسیار حائز اهمیت است [23, 24]. در ادامه این بخش، توضیح داده شده است که چگونه می‌توان تقاطع فیچرها را با یکدیگر یافت. تقاطع فیچرها به شرایطی اطلاق می‌شود که دو فیچر با یکدیگر جزء مشترک (مانند صفحه یا لبه مشترک) داشته باشند. دو فیچر f_a و f_b با هم تقاطع دارند اگر $f_a \cap f_b \neq 0$ باشد. این فیچرها به عنوان فیچرهای همسایه شناخته می‌شوند. وقتی دو فیچر با هم تقاطع داشته باشند، حلقه تقاطع فیچرها تشکیل می‌شود. این حلقه دارای جهتی است که نشان می‌دهد فیچر مربوطه در کدام سمت حلقه قرار گرفته است، بدین صورت که جهت حلقه‌ها به گونه‌ای تعیین می‌شود که جهت بردار نرمال به دست آمده از این حلقه‌ها به سمت بیرون فیچر باشد. عملیات استخراج فیچرها و تعیین حلقه‌ها و همچنین جهت‌های آنها با کدنویسی (کدهای API) در محیط VSTA (Visual Studio Tools for Application) در نرم افزار سالیدورکز (SOLIDWORKS) به دست می‌آید؛ بدین معنی که حلقه‌ها و جهت‌های آنها به عنوان خروجی‌های نرم افزار سالیدورکز خواهند بود. در شکل ۲، فیچرهای f_a و f_b با هم تقاطع دارند. دو ILF استخراج شده‌اند که هر دوی آنها دارای جهت نیز هستند. این جهت‌ها را می‌توان با کپی کردن لبه فیچرها در ILF به دست آورد. بنابراین زمانی که دو فیچر با هم تقاطع داشته باشند، منحنی (حلقه) بسته ایجاد شده به عنوان ILF شناخته می‌شود. زمانی که یک حلقه تقاطع، از تقاطع دو فیچر حاصل شده باشد، به آن حلقه تقاطع معمولی اطلاق می‌شود و زمانی که از تقاطع تعداد سه یا بیشتری از فیچرها به دست آمده باشد، حلقه تقاطع ترکیبی نامیده می‌شود (شکل ۳).

برخی مواقع آی‌ال‌اف‌ها نمی‌توانند یک منحنی بسته باشند که در این موارد یک لبه تقاطع فیچر (IEF; Interaction Edge of Features) وجود خواهد داشت (شکل ۳- ج). در این شرایط می‌توان با ایجاد تداخل در فیچرهای دو سمت IEF یک ILF متناظر با آن به دست آورد [23]. شکل ۴ مراحل عملیات مربوط به این کار را نشان می‌دهد.

در این مرحله، آی‌ال‌اف‌های مجاور در داخل یک خوشه قرار

بنابراین جهت بهینه ساخت هر قسمت وابسته به قسمت‌های دیگر نیز است. مثلاً اگر یک قسمت با ارتفاع زیاد وجود داشته باشد، تاثیر ارتفاع بر زمان ساخت قسمت‌های کم‌ارتفاع‌تر دیگر اهمیتی نخواهد داشت. این مورد در الگوریتم‌های قبلی در نظر گرفته نشده است.

- هیچ پژوهشی وجود ندارد که همزمان سه پارامتر مقدار ماده مصرفی، مقاومت سایشی سطح و صافی سطح را بهینه‌سازی کند. علاوه بر این، حتی در برخی پژوهش‌هایی که دو مورد مقدار ماده مصرفی و صافی سطح را مورد بررسی قرار داده‌اند نیز روش متفاوتی (مانند توخالی کردن قطعه) برای این کار در پیش گرفته شده است. در حالی که روش استفاده شده در این پژوهش هیچ تغییری در شکل سه بعدی قطعه وارد نمی‌کند.

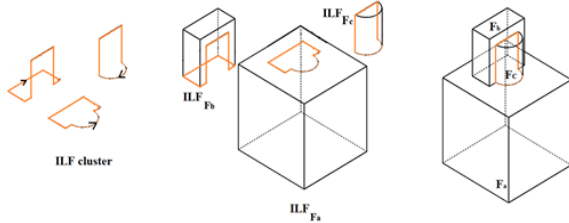
به طور کلی می‌توان اینگونه بیان کرد که نوآوری و مزایای الگوریتم ارائه شده در این پژوهش نسبت به الگوریتم‌های قبلی، انجام همزمان عملیات تقسیم‌بندی و یافتن جهت ساخت بهینه در یک الگوریتم، بهینه‌سازی همزمان سه پارامتر، تمرکز ویژه روی فرآیند DLP، بررسی اثر ساختار پشتیبان روی صافی سطح است که هیچ کدام از این موارد در الگوریتم‌های قبلی وجود نداشت.

۲- شرح مساله و روش حل آن

روشی که در این بخش ارائه می‌شود شامل دو مرحله است: ۱) تقسیم مدل سه بعدی ۲) یافتن مناسب‌ترین جهت ساخت برای هر قسمت. در مرحله اول، محققان حالات مختلف تقسیم‌بندی و همچنین روش مونتاژ این قسمت‌ها را بررسی می‌کنند. در این تحقیق، تقسیم‌بندی به روش تشخیص فیچرها و جدا کردن آن به وسیله یک یا چند صفحه مناسب انجام می‌پذیرد. در مرحله دوم، محققان جهت‌های ممکن برای ساخت هر فیچر را مورد ارزیابی قرار می‌دهند و در نهایت بهترین جهت ساخت را انتخاب می‌کنند. معیارهای انتخاب بهترین تقسیم‌بندی و بهترین جهت ساخت عبارتند از: کاهش ساختار پشتیبان، افزایش صافی سطح و کاهش قدرت سایشی.

افزایش حجم ساختار پشتیبان نه تنها باعث افزایش مصرف مواد می‌شود بلکه از سوی دیگر نیز باعث کاهش کیفیت سطحی می‌شود؛ زیرا در هنگام جداسازی از قطعه اثر آنها روی سطوح باقی خواهد ماند [20]. در نتیجه ساختار پشتیبان کمتر باعث کاهش حجم مواد مصرفی و همچنین کاهش زبری سطح می‌شود. بنابراین محققان باید به دنبال بهترین تقسیمات و همچنین بهترین جهت ساخت برای حداقل کردن ساختار پشتیبان باشند.

به دلیل خاصیت ذاتی تکنولوژی‌های ساخت افزایشی، ساخت سطوح مایل بدون اثر پله پله‌ای امکان‌ناپذیر است [21]. با این وجود، به کمک یک طرح‌ریزی مناسب که بر اساس تقسیم قطعات انجام می‌گیرد، از طریق حذف شیب سطوح این مشکل می‌تواند برطرف شود. برای نیل به این هدف، فیچرهایی از قطعه که دارای سطوحی با زاویه ۴۵ درجه (یا نزدیک به آن) نسبت به افق هستند از قطعه جدا می‌شوند و سپس این قطعات به شکلی چرخانده می‌شوند که در



شکل (۵) خوشه یک ILF ترکیبی

۲-۲- مدل سازی ریاضی پارامترهای هدف

مقدار ماده‌ای که برای ساختن قطعات ساخت افزایشی مصرف می‌شود، به جهت ساخت آنها بستگی دارد؛ به دلیل اینکه مقدار ساختار پشتیبان در جهت‌های ساخت مختلف، متفاوت خواهد بود. علاوه بر این، صافی سطح و قدرت سایشی سطح نیز به جهت ساخت وابسته است.

طراحی بر اساس تقسیم‌بندی در مورد قطعات ساخت افزایشی باید توسط الگوریتم PSO مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور، روشی برای انتخاب بهترین حالت تقسیم‌بندی پیشنهاد می‌شود. اصلی‌ترین هدف این ارزیابی، انتخاب حالت تقسیم‌بندی بهینه است که کمترین مقدار $F(x)$ را حاصل می‌کند. $F(x)$ معیاری برای ارزیابی است که فرم تنظیم‌شده (Normalized Form) سه پارامتر هدف را پوشش می‌دهد. این پارامترها، مقدار ماده مصرفی $(M(x))$ ، صافی سطح $(R(x))$ و قدرت سایشی سطح $(A(x))$ هستند. برای اینکه مقادیر این پارامترها قابل مقایسه باشند، فرم تنظیم‌شده آنها برای محاسبه $F(x)$ به کار گرفته می‌شوند. تمامی فاکتورهای موثر دیگر مانند تنظیمات ماشین و مشخصات مواد برای تمامی حالات، یکسان نگه داشته می‌شود. رابطه ۱، ارتباط بین پارامترهای اشاره‌شده را نشان می‌دهد.

(۱) $F(x) = c_1 * M'(x) + c_2 * R'(x) + c_3 * A'(x)$
در این رابطه c_1 و c_2 و c_3 ضرایب وزنی هستند. همچنین $M'(x)$ و $R'(x)$ و $A'(x)$ به ترتیب فرم‌های تنظیم‌شده $M(x)$ و $R(x)$ و $A(x)$ هستند. $M(x)$ مقدار کل ماده مصرف‌شده را نشان می‌دهد که توسط رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

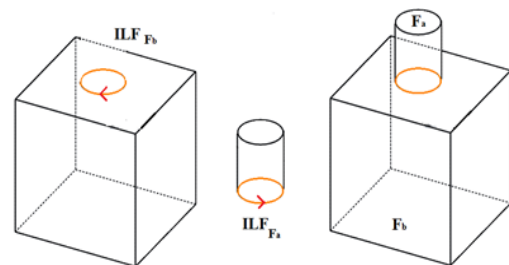
(۲) $M(x) = M_p + M_s$
در این رابطه، M_p و M_s به ترتیب مقدار ماده مصرفی برای ساخت بدنه اصلی قطعه و مقدار ماده مصرفی برای ایجاد ساختار پشتیبان هستند. $R(x)$ نماد میانگین زبری سطح کلیه سطوح قطعه است. با الگوگرفتن از مدل‌هایی که در مراجع ارایه شده است، زبری سطح میانگین در این پژوهش توسط رابطه (۳) محاسبه خواهد شد [26].

$$S(x) = \frac{R_{ss} + R_{su}}{\sum_{i=1}^n f_i A_i} \quad (3)$$

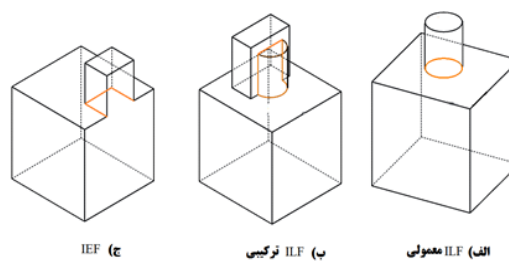
در این رابطه، R_{ss} زبری سطحی را نشان می‌دهد که توسط اثر پله پله‌ای ایجاد می‌شود و R_{su} زبری سطحی را نشان می‌دهد که حذف ساختار پشتیبان در سطوح مربوطه را ایجاد می‌کند. A مساحت هر

می‌گیرند، بنابراین در داخل یک خوشه ILF، آی‌ال‌اف‌ها به هم متصل هستند. در شکل ۲، فیچرهای f_a و f_b متقاطع هستند، پس خوشه ILF حاوی ILF_{f_a} و ILF_{f_b} است که دارای جهت‌های مخالف هم هستند. وقتی که یک ILF از نوع ترکیبی است، خوشه ILF احتمالاً شامل بیش از یک ILF خواهد بود. به عنوان مثال در شکل ۵، خوشه ILF دارای سه تا ILF است.

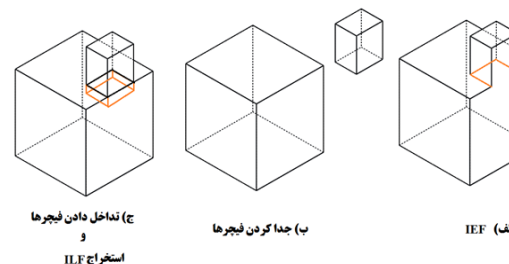
حال که قطعه تقسیم‌بندی شد، نوبت به انتخاب بهترین جهت ساخت در راستای به دست آوردن بهترین مقادیر برای توابع هدف (مقدار مصرف مواد، صافی سطح و قدرت سایشی سطح) می‌رسد. انتخاب جهت ساخت مناسب برای بهبود پارامترهای هدف ذکرشده، ضروری است. در این تحقیق، به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به موضوع مذکور پرداخته می‌شود. بنابراین، برای حل این مساله، الگوریتم PSO (که از نوع گرادینان اصلاح‌شده تصادفی است) به منظور به دست آوردن جواب‌های با کیفیت در زمان کوتاه‌تر و همگرایی پایدارتر نسبت به سایر الگوریتم‌ها، به کار گرفته می‌شود. الگوریتم PSO تنها به اپراتورهای ریاضی مقدماتی نیاز دارد و احتیاج به زمان و حافظه زیادی ندارد [25]. اخیراً، انواع تطبیقی زیادی از الگوریتم PSO توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است، بنابراین الگوریتم مذکور در این تحقیق نیز به کار گرفته می‌شود.



شکل (۲) جهت‌های آی‌ال‌اف‌ها



شکل (۳) انواع آی‌ال‌اف‌ها و IEF



شکل (۴) عملیات تبدیل IEF به ILF

به دست آوردن فرم‌های تنظیم شده پارامترها وجود دارد که قدرتمندترین در رابطه (۸) ارایه شده است [28]:

$$f_i^{norm}(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{min}}{f_i^{max} - f_i^{min}} \quad (۸)$$

مقدار $f_i^{norm}(x)$ بین صفر و یک خواهد بود. در این رابطه، $f_i(x)$ مقدار پارامتر هدف i ام را نشان می‌دهد و f_i^{max} و f_i^{min} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر هدف i ام را نشان می‌دهند. مقادیر توابع هدف برای همه قسمت‌ها (تکه‌های ایجاد شده) در تمامی زوایای ساخت، محاسبه شده و سپس f_i^{max} و f_i^{min} از بین این مقادیر استخراج می‌شوند.

در این تحقیق، ضرایب C_1 و C_2 و C_3 با توجه به اهمیت توابع هدف مربوطه به ترتیب $0/3$ ، $0/4$ و $0/3$ در نظر گرفته شده‌اند. البته مقادیر مربوط به این ضرایب در صورت تغییر میزان اهمیت توابع هدف، به راحتی می‌تواند اصلاح شود.

۲-۳- چرخش تکه‌های ایجاد شده

جهت‌های ساخت مختلف برای هر تکه با چرخاندن آن حول دو محور x و y به دست می‌آید. جهت ساختی که مطابق فرمول ۱ بهترین مقدار را برای تابع هدف حاصل می‌کند، به عنوان بهترین جهت انتخاب می‌شود. ماتریس دوران به منظور چرخاندن تکه‌ها به اندازه α حول محور x و به اندازه β حول محور y به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

در نتیجه مختصات هر نقطه روی قطعه نیز توسط این ماتریس، دوران داده می‌شود. متغیرهای تصمیم برای انتخاب جهت ساخت بهینه α و β هستند. بنابراین α و β متغیرهای اصلی الگوریتم PSO هستند که در ادامه مفصل حول آن بحث می‌شود.

۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

بهینه‌سازی ازدحام ذرات، یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که از رفتار اجتماعی پرندگان الهام گرفته شده است [29]. PSO تشابهات زیادی با تکنیک‌های محاسباتی تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک دارد. سیستم با یک جمعیت تصادفی شروع به کار می‌کند و سپس با به روز کردن نسل‌ها به دنبال شرایط بهینه می‌شود. اگرچه برخلاف الگوریتم ژنتیک، PSO دارای اپراتورهای تکاملی مانند تقاطع یا جهش نیست. در PSO راه‌حل‌های بالقوه، ذره نامیده می‌شوند که در فضای مساله به دنبال ذرات بهینه فعلی پرواز می‌کنند. همه ذرات دارای مقادیر شایستگی هستند و توسط تابع شایستگی که بایستی بهینه شود، محاسبه می‌شوند [30]. همچنین ذرات دارای بردار سرعت نیز هستند که جهت پرواز آنها را مشخص می‌کند.

در هر تکرار، هر ذره با دنبال کردن دو مقدار بهینه به روزرسانی می‌شود. اولی، بهترین جوابی (بهترین مقدار شایستگی) است که آن ذره تا

سطح، i شماره هر سطح و n_f تعداد سطوح را نشان می‌دهند. R_{ss} را می‌توان توسط رابطه (۴) محاسبه کرد.

$$R_{ss} = \sum_{i=1}^{n_f} A_i * R_{fi} \quad (۴)$$

در این رابطه، R_{fi} مقدار زبری مربوط به سطح شماره i است که توسط اثر پله پله‌ای ایجاد شده است. R_{fi} را می‌توان از رابطه (۵) محاسبه کرد.

$$R_{fi} = \frac{TH_i * \cos \alpha}{4} \quad (۵)$$

در این رابطه، α زاویه حاده بین بردار نرمال سطح و راستای عمودی است [27]. شکل ۶، روش محاسبه R_{ss} را نشان می‌دهد. R_{su} نیز از رابطه (۶) قابل محاسبه است.

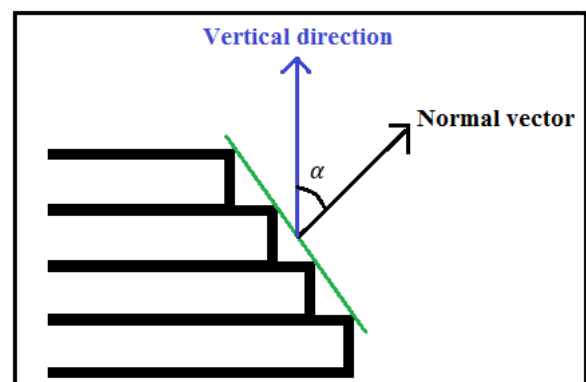
$$R_{su} = r_{su} * A_{su} \quad (۶)$$

در این رابطه، r_{su} ضریبی است برای زبری سطح مربوط به سطوحی که دارای ساختار پشتیبان بودند و A_{su} مجموع مساحت‌های سطوحی است که ساختار پشتیبان داشتند.

$A(x)$ ، قدرت سایشی یک سطح را نشان می‌دهد. قدرت سایشی سطح یک قطعه DLP را می‌توان توسط مدل‌های ارایه شده در مراجع موجود محاسبه کرد. مدل استفاده شده برای صافی سطح به صورت رابطه (۷) است.

$$A(x) = \frac{x * W}{H} \sin(2\beta) \quad (۷)$$

در این رابطه، x مسافت طی شده در حرکت نسبی بین دو قطعه، W مقدار بار عمودی که دو سطح را بر هم می‌فشارد، H سختی سطح قطعه و β زاویه بردار نرمال سطح نسبت به افق را نشان می‌دهد.



شکل ۶ روش محاسبه R_{ss}

بعد از محاسبه $M(x)$ ، $R(x)$ و $A(x)$ ، باید فرم‌های تنظیم شده آنها به دست آید؛ زیرا پارامترهای مختلف واحدهای متفاوتی دارند و بزرگی مقادیرشان بسیار متفاوت از همدیگر خواهد بود که مقایسه بین آنها را غیرممکن می‌کند. بنابراین ضروری است که فرم‌های تنظیم شده پارامترهای هدف را به گونه‌ای ایجاد کنیم که بزرگی مقادیرشان به هم نزدیک و قابل مقایسه باشد. روش‌های زیادی برای

حلقه تقاطع فیچرها برای فیچرهای متقاطع، مطابق آنچه که در بخش ۲-۱ تشریح شد، استخراج می‌شوند.
مرحله ۲: خوشه‌های ال‌اف‌ها را تشکیل بده.
کد لازم برای خوشه‌بندی الگوریتم در شکل ۸ نشان داده شده است.

```
Pseudo code for clustering
set each ILF(i) as an exclusive ILF-cluster(i).
for (int i = 0; i < n; i++)
{
    for (int j = i+1; j < n+1; j++)
    {
        intersect ILF-cluster(i) and ILF-cluster(j).
        if (ILF-cluster(i) and ILF-cluster(j) share at least one common edge)
        {
            merge ILF-cluster(i) and ILF-cluster(j) into one ILF cluster.
            set the new merged ILF-cluster as ILF-cluster(j).
            set the ILF-cluster(i) as NULL.
        }
    }
}
return the non-null ILF-cluster.
```

شکل ۸) کد الگوریتم برای خوشه‌بندی

مرحله ۳: تکه‌ها را از همدیگر جدا کن.
آل‌اف‌های به‌دست‌آمده برای تقسیم‌بندی قطعات به‌کار گرفته می‌شوند.

مرحله ۴: بهترین جهت ساخت را برای هر تکه پیدا کن.
بعد از اینکه قطعه تقسیم‌بندی شد، نوبت به یافتن جهت ساخت بهینه به‌منظور به‌دست‌آوردن بهترین مقادیر پارامترهای هدف می‌رسد. بدین منظور زیربخش‌های ذیل باید انجام شوند.

مرحله ۴-۱: مدل‌های ایجادشده برای پارامترهای هدف را بگیر.
همه پارامترهای هدف مدل‌سازی ریاضی می‌شوند و نهایتاً یک مدل ریاضی کلی که در برگزیده تأثیر تمامی پارامترها باشد، استخراج می‌شود.

مرحله ۴-۲: الگوریتم PSO را استخراج کن.
بهترین جهت ساخت برای هر تکه با استفاده از الگوریتم PSO به‌دست می‌آید.

مرحله ۵: نتایج نهایی تحویل بده.
خروجی الگوریتم جامع، بهترین حالت تقسیم‌بندی و بهترین جهت ساخت برای هر تکه خواهد بود.

۲-۶- روش‌های مونتاژ بخش‌های جدادشده

تاکنون روش‌هایی برای اتصال قسمت‌های جدادشده، ارائه شده است که برخی از آنها عبارتند از: فیچرهای داخلی، اتصال‌دهنده‌های خارجی و استفاده از چسب‌ها[31]. در روش فیچرهای داخلی، تکه‌ها دارای فیچرهای اتصال اضافی خواهند بود[30]. اتصال دهنده‌های خارجی، قطعات مجزایی مانند پیچ‌ها هستند. در روش اتصال با چسب، یک ماده واسطه چسبناک مانند سیلیکون و چسب برای

الان تجربه کرده است. این مقدار شایستگی ذخیره می‌شود و p -best نامیده می‌شود. مقدار بهینه دوم که توسط ذرات دنبال می‌شود، بهترین مقدار شایستگی است که توسط تمامی ذرات تا الان تجربه شده است. این مقدار بهینه، بهینه سراسری یا g -best نامیده می‌شود. بعد از یافتن دو مقدار بهینه اشاره‌شده، ذره موقعیت و سرعت خود را به‌ترتیب توسط روابط (۹) و (۱۰) به‌روز می‌کند.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (9)$$

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (g(t) - x_i(t)) \quad (10)$$

در این روابط، v سرعت ذره، i شماره ذره، ω فاکتور اینرسی، x موقعیت فعلی، p بهینه شخصی، g بهینه سراسری، r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین صفر و یک و c_1 و c_2 فاکتورهای یادگیری (معمولاً $c_1 = c_2 = 1$ است) هستند. جمله دوم سمت راست تساوی در رابطه (۱۰)، ذره را تحریک می‌کند تا در جهت مقدار بهینه شخصی خود حرکت کند، اما جمله سوم از مشخصه تعاونی ذره برای جستجوی مقدار بهینه سراسری بهره گرفته و ذره به آن جهت سوق می‌دهد. با این تفسیر، جمله سوم تمامی ذرات را به‌سوی مقدار بهینه سراسری هدایت می‌کند. تکه کد نشان‌داده‌شده در شکل ۷، روش اجرایی الگوریتم تشریح‌شده را برای مساله موجود در این تحقیق به نمایش درآورده است.

```
Pseudo code
For each particle
    Initialize particle
END

Do
    For each particle
        Calculate fitness value
        If the fitness value is better than the best fitness value (pBest) in history
            set current value as the new pBest
    End

    Choose the particle with the best fitness value of all the particles as the gBest
    For each particle
        Calculate particle velocity according equation 8
        Update particle position according equation 7
    End
While maximum iterations or minimum error criteria is not attained
```

شکل ۷) مراحل اجرایی الگوریتم ارائه‌شده

۲-۵- الگوریتم جامع

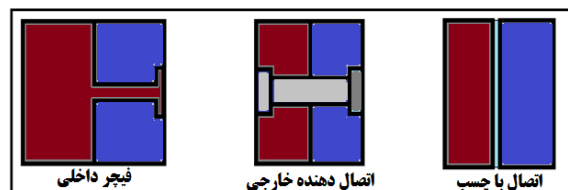
در این بخش، الگوریتم جامعی که شامل تمامی عملیات اشاره‌شده در بخش‌های قبل می‌شود، به شکل مرحله به مرحله تبیین می‌شود. ورودی الگوریتم، مشخصات هندسی مدل سه‌بعدی قطعه (اعم از مختصات رئوس، لبه‌ها و صفحات) است که توسط کدهای API در محیط VSTA نرم‌افزار سالی‌دورکز استخراج شده و در اختیار الگوریتم قرار می‌گیرند.

مرحله ۱: تمامی آل‌اف‌ها را به‌دست آور.

مونتاژ تکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۹، تصاویر شماتیک روش‌های مختلف مونتاژ را ارائه می‌دهد.



شکل ۱۱) دستگاه Digi Dent DLP



شکل ۹) روش‌های مختلف اتصال بخش‌های جدا شده

پارامترهای مربوط به تنظیمات دستگاه و مشخصات ماده مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده‌اند. شکل ۱۰-ب، خروجی الگوریتم ارائه شده به عنوان حالت بهینه را نشان می‌دهد. جدول ۲، تمامی اطلاعات آماری مربوط به آزمایش‌های عملی انجام شده روی دو قطعه نمونه را نشان می‌دهد.

در مورد آزمایشات مقاومت سایشی سطح باید اشاره شود که انجام تست مقاومت سایشی نیاز به نمونه‌های استاندارد دارد و امکان انجام تست مقاومت سایشی روی قطعات پیچیده با فرم دلخواه وجود ندارد. از سوی دیگر در این پژوهش مطابق رابطه (۷)، تاثیر زاویه بردار نرمال سطح روی مقاومت سایشی مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین، ابتدا تاثیر زاویه بردار نرمال سطح توسط آزمایش استاندارد مقاومت سایشی پین روی دیسک مورد آزمایش قرار گرفته است و سپس زوایای بردارهای نرمال سطوح قطعات نمونه استخراج شده‌اند. در نهایت نتایج آزمایش‌های عملی صورت گرفته به قطعات نمونه این پژوهش تعمیم داده شده است.

برای انجام تست‌های مقاومت سایشی پین روی دیسک، نمونه‌ها از جنس رزین دیتاکس (Detax Resin) که مشخصات آن در جدول ۳ آمده است، ساخته شدند. زوایای بردار نرمال سطوح در ۷ مقدار مختلف بین صفر و ۴۵ درجه آزمایش شدند. مشخص است که نتایج این آزمایش‌ها را می‌توان به سطوحی با بردار نرمال‌هایی با زوایای ۴۵ تا ۹۰ درجه تعمیم داد، زیرا واضح است که به عنوان مثال زاویه بردار نرمال ۳۷/۵ با زاویه ۵۲/۵ تفاوتی ندارد چون هر دو ۷/۵ درجه با زاویه ۴۵ درجه فاصله دارند و شکل و اندازه پله‌های ایجاد شده توسط این زوایا یکسان هستند. نمونه‌های آزمایشی مطابق با استاندارد ASTM G99-2017 ساخته شدند. آزمایش‌ها توسط پین‌هایی با قطر ۷/۸۵ میلی‌متر انجام شدند (شکل ۱۲). روی دستگاه تست سایش پین روی دیسک (شکل ۱۳)، نمونه‌ها یک مسیر حرکتی مارپیچ دارند که سرعتی خطی آنها ثابت نگه داشته می‌شود و سایر شرایط انجام تست مقاومت سایشی از قرار زیر است:

- تنش عمودی: ۸۸۰ کیلو پاسکال (معادل نیروی ۴/۳۴ کیلوگرم)؛

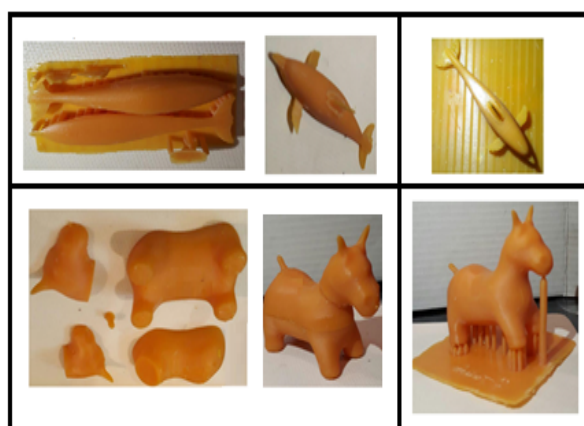
- سرعت خطی: ۱۰ متر بر دقیقه؛

- رطوبت محیطی: ۴۵ تا ۵۵٪.

نتایج آزمایش‌های مقاومت سایشی در جدول ۴ نشان داده شده است.

۳- مطالعه موردی

به منظور صحت‌گذاری بر عملکرد الگوریتم ارائه شده، دو قطعه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. این قطعات نمونه با دو روش متفاوت (با استفاده از روش تقسیم‌بندی ارائه شده در این تحقیق و بدون استفاده از آن) ساخته می‌شود. شکل ۱۰-الف، قطعات ساخته شده بدون استفاده از الگوریتم تقسیم‌بندی را نشان می‌دهد و شکل ۱۰-ب، قطعات ساخته شده با استفاده از الگوریتم تقسیم‌بندی را قبل و بعد از سوار کردن تکه‌ها روی هم نشان می‌دهد. این قطعات توسط دستگاه Digi Dent DLP که حجم محفظه آن ۲۰۳×۲۵۴×۳۰ میلی‌متر است، ساخته شد (شکل ۱۱). ضخامت لایه‌ها ۵۰ میکرومتر و مدت زمان تابش لیزر برای ساخت هر لایه روی ۶ ثانیه تنظیم شدند. این دستگاه از نرم‌افزار Netfabb برای اجرای عملیات ساخت قطعه استفاده می‌کند. الگوریتم ارائه شده، پیشنهاد داد که این قطعات به صورت بخش‌های مشخص شده با جهت‌های ساخت نشان داده شده در شکل ۱۰-ب ساخته شود. هر بخش از قطعات به صورت یک فایل STL مجزا ذخیره می‌شود؛ بنابراین، این بخش‌ها می‌توانند به صورت همزمان یا جداگانه پرینت شوند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بخش‌های جدا شده می‌توانند به طور صحیح و با دقت خوبی روی همدیگر مونتاژ شوند.



ب

الف

شکل ۱۰) قطعات نمونه ساخته شده بدون الگوریتم تقسیم‌بندی (الف) و با الگوریتم تقسیم‌بندی و سوار کردن تکه‌ها (ب)

زاویه بردار نرمال	مسافت سایشی (متر)				
	۱۰۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰
۰	۷۹	۶۲	۴۷	۳۲	۲۴
۷/۵	۸۵	۶۹	۵۶	۳۸	۲۷
۱۵	۹۰	۷۳	۶۱	۴۲	۳۰
۲۲/۵	۹۳	۷۶	۶۶	۴۶	۳۴
۳۰	۱۰۰	۸۱	۷۱	۵۰	۳۸
۳۷/۵	۱۰۶	۸۵	۷۰	۵۲	۴۳
۴۵	۱۰۹	۸۹	۷۴	۵۳	۴۵

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روشی جدید برای تقسیم‌بندی قطعات به‌منظور افزایش بهره‌وری فرایندهای ساخت افزایشی ارائه شد. از طریق تقسیم‌بندی حجم قطعه، مقدار ماده مصرفی برای ساخت یک قطعه خاص، زبری سطح و قدرت ساینده‌گی سطح برای قطعات فرایندهای ساخت افزایشی، به‌ویژه فرایند DLP، می‌تواند به مقدار قابل توجهی کاهش یابد.

مزایای طراحی بر اساس تقسیم‌بندی برای قطعات ساخت افزایشی در این تحقیق نشان داده شد. طراحی بر اساس تقسیم‌بندی، از طریق کاهش ساختار پشتیبان، فرایندهای ساخت افزایشی را از نظر مقدار ماده مصرفی بهبود می‌بخشد و همچنین از طریق یافتن جهت ساخت مناسب، فرایندهای ساخت افزایشی را از نظر صافی سطح و قدرت سایشی سطح بهبود می‌دهد. الگوریتمی برای تقسیم‌بندی و یافتن بهترین جهت ساخت برای هر بخش ارائه شد که این الگوریتم بر اساس الگوریتم PSO و به‌کمک زبان برنامه‌نویسی سی‌شارپ ایجاد شد. به‌منظور صحت‌گذاری بر روابط تئوری ارائه‌شده و همچنین بررسی کارایی الگوریتم ارائه‌شده، دو قطعه نمونه مورد بررسی قرار گرفتند. قطعات نمونه یک بار بدون استفاده از الگوریتم تقسیم‌بندی و یک بار دیگر با استفاده از الگوریتم تقسیم‌بندی ساخته شدند. نتایج آزمایشات نشان داد که استفاده از الگوریتم تقسیم‌بندی به‌طور میانگین باعث کاهش مقدار ماده مصرفی به میزان ۱۱٪ و کاهش زبری سطح به میزان ۱۲/۶٪ و کاهش قدرت سایشی سطح به میزان ۱۳/۸٪ نسبت به حالتی که از الگوریتم تقسیم‌بندی استفاده نشود، می‌شود.

به‌منظور تحقیقات آتی می‌توان روی سایر فرایندهای ساخت افزایشی، تحقیق مشابه این تحقیق انجام داد؛ زیرا این تحقیق بر پایه فرایند DLP بود که کل یک سطح را همزمان ایجاد می‌کند (تکنولوژی لایه به لایه) ولی بسیاری از فرایندهای دیگر ساخت افزایشی از تکنولوژی نقطه به نقطه یا خط به خط بهره می‌برند. یکی از محدودیت‌های الگوریتم ارائه‌شده، این است که نحوه اتصال قسمت‌های ایجادشده را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین تعیین مکان و اندازه اتصال‌دهنده‌ها (زمانی که از فیچرهای داخلی برای اتصال قطعات استفاده شود) می‌تواند موضوعی جذاب برای جامع‌ترکردن الگوریتم حاضر باشد.

جدول ۱) تنظیمات دستگاه و مشخصات مواد

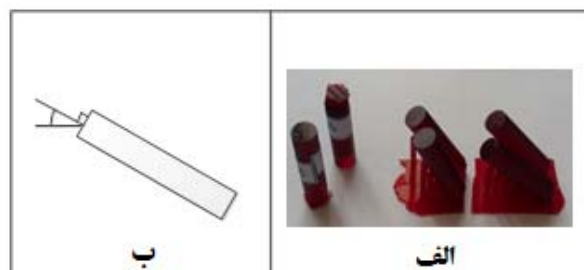
آیتم	مقدار
ضخامت لایه	۰/۵ میلی‌متر
چگالی ماده	۰/۰۱۲ گرم بر میلی‌متر مکعب
R_{su}	۰/۳

جدول ۲) اطلاعات آماری مربوط به آزمایش‌های عملی انجام‌شده روی دو قطعه نمونه

توابع هدف	مقدار ماده مصرفی (گرم)	سایش سطح ($10^{-4}g$)	صافی سطح میانگین (میلی‌متر)	F(x)
قطعه نمونه شماره ۱ (تعداد مثلث‌ها در فایل STL: ۵۹۳۴۸ و زمان پردازش (ثانیه): ۸۵)				
بدون الگوریتم تقسیم‌بندی	۹/۰۸	۹۷	۰/۰۲۱	-
با الگوریتم تقسیم‌بندی	۸/۶۴	۸۹	۰/۰۱۹	-
درصد بهبود	۴/۸	۹	۹/۵	۷/۸
قطعه نمونه شماره ۲ (تعداد مثلث‌ها در فایل STL: ۶۸۹۸۶ و زمان پردازش (ثانیه): ۹۴)				
بدون الگوریتم تقسیم‌بندی	۱۷/۷۹	۱۰۱	۰/۰۳۳	-
با الگوریتم تقسیم‌بندی	۱۴/۷۴	۸۷	۰/۰۲۷	-
درصد بهبود	۱۷/۱	۱۶/۱	۱۸/۲	۱۷/۲

جدول ۳) مشخصات دستگاه Detax Freeprint® model Light-curing 3D resin

طول موج‌های قابل جذب	درصد انقباض	سختی شَر (Shore)	چگالی
UV ۴۱۰-۳۵۶ nm	۲	۸۵D	$1/15 g/cm^3$



شکل ۱۲) تعدادی از پین‌های ساخته‌شده توسط دستگاه DLP (الف) و شماتیک نشان‌دهنده زاویه بردار نرمال سطح پین (ب)



شکل ۱۳) دستگاه تست مقاومت سایشی پین روی دیسک

- Printed products. *Experimental Mechanics*. 2019;59(6):883-897.
- 4- Kazemi M, Rahimi AR. Supports effect on tensile strength of the stereolithography parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2015;21(1):79-88.
- 5- Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Johnson Matthey Technology Review. 2015;59(3):193-198.
- 6- Rosen DW, editors. Design for additive manufacturing: A method to explore unexplored regions of the design space. In 18th Solid Freeform Fabrication Symposium, 2007 Aug 1, Atlanta, Georgia. Austin: University of Texas at Austin; 2007. pp. 402-415.
- 7- Thomas DS, Gilbert SW. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2014.
- 8- Akhouni B, Behravesh AH, Bagheri Saed A. An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites via fused deposition modeling process: In-melt simultaneous impregnation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2019 Apr.
- 9- Chan CK, Tan ST. Volume decomposition of CAD models for rapid prototyping technology. *Rapid Prototyping Journal*. 2005;11(4):221-34.
- 10- Xie Y, Chen X. Support-free interior carving for 3D printing. *Visual Informatics*. 2017;1(1):9-15.
- 11- Rodrigue H, Rivette M. An assembly-level design for additive manufacturing methodology. Unknown City: Inside-Virtual Concept; 2010.
- 12- Kaji F, Barari A. Evaluation of the surface roughness of additive manufacturing parts based on the modelling of cusp geometry. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(3):658-663.
- 13- Emami MM, Barazandeh F, Yaghmaie F. Scanning-projection based stereolithography: Method and structure. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014;218:116-124.
- 14- Krause FL, Ciesla M, Klocke F, Wirtz H, Ulbrich A. Improving rapid prototyping processing speeds by adaptive slicing. 6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing. Nottingham: University of Nottingham; 1997 pp. 31-36.
- 15- Mangan AP, Whitaker RT. Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 1999;5(4):308-321.
- 16- Medellín H, Lim T, Corney J, Ritchie JM, Davies JB. Automatic subdivision and refinement of large components for rapid prototyping production. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2007;7(3):249-258.
- 17- Hao J, Fang L, Williams RE. An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL models. *Rapid Prototyping Journal*. 2011;17(2):116-127.
- 18- Luo L, Baran I, Rusinkiewicz S, Matusik W. Chopper: partitioning models into 3D-printable parts [Internet]. New York: Princeton; 2012 [Unknown Cited]. Available from: https://gfx.cs.princeton.edu/pubs/Luo_2012_CPM/.
- 19- Hu R, Li H, Zhang H, Cohen-Or D. Approximate pyramidal shape decomposition. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2014;33(6).
- 20- Oh Y, Behdad S. Assembly based part design to improve the additive manufacturing productivity: process time, cost and surface roughness. *ASME* 2016

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمانها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: مهدی کاظمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۵۰٪); عبدالرضا رحیمی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)

منابع مالی: این پژوهش توسط دانشگاه صنعتی امیرکبیر حمایت مالی شده است.

فهرست علائم

- ILF: حلقه تقاطع فیچر
 IEF: لبه تقاطع فیچر
 $M(x)$: مقدار ماده مصرفی
 $R(x)$: میزان زبری سطح
 $A(x)$: قدرت سایشی سطح
 M_p : مقدار ماده مصرفی برای ساخت خود قطعه
 M_s : مقدار ماده مصرفی برای ساخت ساختار پشتیبان
 R_{ss} : زبری سطح ناشی از اثر پله‌پله‌ای
 R_{su} : زبری سطح ناشی از حذف ساختار پشتیبان
 A : مساحت هر سطح
 i : شماره هر سطح
 n_f : تعداد سطوح
 R_{fi} : زبری سطح مربوط به سطح i
 α : زاویه حاده بین بردار نرمال سطح و راستای عمودی
 T_{su} : ضریبی برای زبری سطح مربوط به سطوحی که دارای ساختار پشتیبان بودند
 A_{su} : مجموع مساحت‌های سطوحی است که ساختار پشتیبان داشتند
 x : مسافت طی‌شده در حرکت نسبی بین دو قطعه
 W : مقدار بار عمودی که دو سطح را بر هم می‌فشارد
 H : سختی سطح قطعه
 β : زاویه بردار نرمال سطح نسبت به افق
 v : سرعت ذره
 ω : فاکتور اینرسی
 x : موقعیت فعلی
 $p - best$: بهینه شخصی
 $g - best$: بهینه سراسری
 r_1 و r_2 : اعداد تصادفی بین صفر و یک

منابع

- 1- Ilinkin I, Janardan R, Majhi J, Schwerdt J, Smid M, Sriram R. A decomposition-based approach to layered manufacturing. *Computational Geometry*. 2002;23(2):117-151.
- 2- Qiang L, Kucukkoc I, Zhang DZ. Production planning in additive manufacturing and 3D printing. *Computers & Operations Research*. 2017;83:157-172.
- 3- Akhouni B, Behravesh AH. Effect of filling pattern on the tensile and flexural mechanical properties of FDM 3D

LMT processes- A comparative analysis. Proceedings of the Fifth European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 1995 Jun, Helsinki, Finland. England: British Library Board; 1996. PP. 59-77.

27- Byun HS, Lee KH. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2006;22(1):69-80.

28- Arora JS. Introduction to optimum design. 4th edition. Amsterdam: Elsevier; 2017.

29- Golbon-Haghighi MH, Saeidi-Manesh H, Zhang G, Zhang Y. Pattern Synthesis for the Cylindrical Polarimetric Phased Array Radar (CPPAR). *Progress in Electromagnetics Research*. 2018;66:87-98.

30- Ghorpade A, Dashroa Y, Tiwari MK, Karunakaran KP. Introducing hierarchical particle swarm optimization to optimal part orientation in fused deposition modeling. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*; 2006 Sep 10-13; Philadelphia, Pennsylvania. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2008. pp. 233-240.

31- Sonnenberg M. Force and effort analysis of unfastening actions in disassembly processes [Dissertation]. New Jersey: Institute of Technology; 2001.

International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2016 Aug 21-24, Charlotte, USA. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2016.

21- Sabourin E, Houser SA, Helge Bøhn J. Adaptive slicing using stepwise uniform refinement. *Rapid Prototyping Journal*. 1996;2(4):20-26.

22- Moroni G, Syam WP, Petrò S. Functionality-based part orientation for additive manufacturing. *Procedia CIRP*. 2015;36:217-222.

23- Qian X, Dutta D. Feature based fabrication in layered manufacturing. *Journal of Mechanical Design*. 2001;123(3):337-345.

24- Michael J, Carthy Mc, editors. What are feature interactions. *Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference*, 1996 Aug 18-22, Irvine, California. New York: American Society of Mechanical Engineers; 1996.

25- Kennedy J, Eberhart R, editors. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 1995 Nov 27-1 Dec, Perth, WA, Australia. Neuhuherberg: International Conference on Neural Networks; 2002.

26- Reeves PE, Cobb RC. Surface deviation modeling of