



## موقعیت‌دهی سطوح با فرم آزاد به کمک ناحیه‌بندی سطح و الگوریتم ژنتیک

امیر افشاری<sup>1</sup>، حسین امیرآبادی<sup>2\*</sup>، جواد زحمتی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، hamirabadi@birjand.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

سطوح با فرم آزاد معمولاً با استفاده از روابط سطوح پارامتریک مانند بزیر، بی اسپیلاین و نریز توصیف می‌شوند. سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر از نریز برای توصیف هندسه‌های پیچیده استفاده می‌کنند. سطوح با فرم آزاد که به عنوان سطوح پیچیده شناخته می‌شوند در صنایع مختلفی همچون کشتی‌سازی و قالب‌سازی کاربرد وسیعی دارند، از این رو بازرسی این سطوح از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. با توجه به اینکه سطوح با فرم آزاد مورد اندازه‌گیری و مدل‌های طراحی در دو سیستم مختصات متفاوت هستند، پیدا کردن وجه تشابه این سطوح و قرار دادن آن‌ها در یک سیستم مختصات یکسان جهت مقایسه این سطوح امری ضروری می‌باشد که به این فرایند موقعیت‌دهی می‌گویند. در این تحقیق روشی بر مبنای ویژگی‌ها و انحناهای سطح برای موقعیت‌دهی و تطبیق‌پذیری اتوماتیک سطوح با فرم آزاد جهت بازرسی این سطوح توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات معرفی گردیده است. در این روش سطح اندازه‌گیری با مدل طراحی در دو مرحله موقعیت‌دهی می‌گردند. در مرحله اول موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی) که بر مبنای ارتباط و تشابه بین انحناهای سطوح با فرم آزاد و ناحیه‌بندی این سطوح به نواحی مقعر، محدب و زینی می‌باشد، صورت می‌گیرد. مرحله دوم موقعیت‌دهی ظریف (دقیق) می‌باشد که توسط الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود و تشابه را به صورت نقطه‌به‌نقطه بررسی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، دقت موقعیت‌دهی با استفاده از روش پیشنهادی برای قطعه آلومینیومی به ابعاد 50×50 میلی‌متر در حدود 0/02 میلی‌متر بوده است که این مقدار در مقایسه با مقدار به‌دست‌آمده توسط روش تکرار نزدیک‌ترین نقطه برای همان قطعه، 56 درصد کمتر می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 25 اردیبهشت 1397  
پذیرش: 28 تیر 1397  
ارائه در سایت: آذر 1397

## کلیدواژگان:

سطوح با فرم آزاد  
موقعیت‌دهی  
تقسیم‌بندی سطح  
بازرسی

## Free-form surface localization using surface partitioning and genetic algorithm

Amir Afshari, Hossain Amirabadi\*, Javad Zahmati

Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran.

\* P.O.B. 97175/376 Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper  
Received 15 May 2018  
Accepted 19 July 2018  
Available Online December 2018

## Keywords:

Free-form surfaces  
Localization  
Surface Partitioning  
Inspection

## Abstract

Free-form surfaces are usually described using the relationships of parametric surfaces such as Bezier, B-Spline and NURBS. The computer-aided design systems use NURBS to describe complex (complicated) geometries. Free-form surfaces known as complex (complicated) surfaces are widely used in a variety of industries such as ship-building and molding, inspection of these surfaces is therefore of high importance (very important). Considering that measured free-form surfaces and design models are located in two different coordinate systems, finding the similarity of free-form surfaces and placing them in an identical coordinates system is necessary to compare these surfaces, this process is called localization. This paper introduces a feature and curvature based method for the automatic localization and comparison of free-form surfaces for inspection with coordinate measuring machine (CMM). This method localizes the measurement surface to the design model through two steps. The first step is general localization which is accomplished based on the relation and similarity between curvatures of free-form surfaces and zoning these surfaces to concave, convex and saddle areas. The second step is fine localization based on genetic algorithm which considers correspondence in the form of point to point. The simulation results show that the localization accuracy of the proposed method for the 50 × 50 mm aluminum workpiece of was about 0.02 mm, which is 56 percent less than the value obtained from the iterative closest point method.

## 1- مقدمه

فرم آزاد ساخته‌شده نسبت به مدل طراحی و یا مشخص کردن مجموعه‌ای از ویژگی‌های سطح انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه سطوح با فرم آزاد مورد اندازه‌گیری و مدل‌های طراحی در دو سیستم مختصات متفاوت هستند، قرار دادن آن‌ها در یک سیستم مختصات یکسان جهت مقایسه این سطوح امری ضروری

با افزایش کاربرد سطوح با فرم آزاد در صنایع مختلف از قبیل طراحی و ساخت قالب‌های ریختگی، الگوها، صنایع خودروسازی و صنایع فضایی، فرایند بازرسی این سطوح بسیار حائز اهمیت گردیده است. فرایند بازرسی برای تعیین مقدار انحراف سطح با

Please cite this article using:

A. Afshari, H. Amirabadi, J. Zahmati, Free-form surface localization using surface partitioning and genetic algorithm, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 22-31, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌باشد که به این فرایند موقعیت‌دهی<sup>1</sup> می‌گویند. در حقیقت، موقعیت‌دهی کردن تبدیلی (دوران و انتقال) است که برای تطابق مدل ماشین‌کاری با مدل طراحی انجام می‌شود و همچنین موقعیت‌دهی دقیق مبنایی جهت تحلیل خطا فراهم خواهد ساخت [1].

مدل‌های دارای فرم آزاد معمولاً با استفاده از روابط سطوح پارامتریک توصیف می‌شوند. این سطوح پارامتریک مورد استفاده معمولاً سطوح بیزیر<sup>2</sup>، بی‌اسپلاین<sup>3</sup> و نریز<sup>4</sup> می‌باشند. سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر پیشرفته از نریز برای توصیف هندسه‌های پیچیده استفاده می‌کنند. در این مقاله از رویه نریز به عنوان هندسه مدل‌سازی اصلی استفاده شده است زیرا توسط بیشتر سیستم‌های طراحی و تولید به کمک کامپیوتر<sup>5</sup> و استانداردهای تبادل اطلاعات پشتیبانی می‌شوند [2].

در ادامه، ابتدا به بررسی پژوهش‌های انجام گرفته پیرامون ناحیه‌بندی سطوح با فرم آزاد به نواحی متعدد پرداخته شده و سپس در مورد تحقیقات به عمل آمده در زمینه موقعیت‌دهی سطوح با فرم آزاد بحث شده است.

البر و همکاران [3] از روشی ترکیبی که در آن از عامل‌های عددی و نمادی استفاده شده بود، برای ناحیه‌بندی سطح با فرم آزاد به نواحی مختلف و تعیین کردن مرزهای کلی روی انحناهای سطح استفاده کردند. چن و همکاران [4] روشی را برای تقسیم کردن سطح پیشنهاد کردند که در آن یک سطح با فرم آزاد به تکه سطح‌های ساده تقسیم می‌شود. در این روش هر یک از تکه سطح‌ها می‌تواند با دقت بر روی ماشین اندازه‌گیری مختصات 3+2 محور اندازه‌گیری شود. آن‌ها در کار خود از روش متوسط فازی برای طبقه‌بندی کلیه نقاط شبکه‌بندی سطح در تکه سطح‌ها استفاده کردند. در روش استفاده‌شده توسط آنان مرز تکه سطح با استفاده از دیاگرام ورونوی مشخص شده است. دیاگرام ورونوی ابزار محاسباتی پایه در محاسبات هندسی است، که در کاربردهایی مثل خوشه‌بندی، برنامه‌ریزی حرکت، یادگیری و بازیابی سطوح مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین عیب دیاگرام ورونوی این است که با افزایش ابعاد مسئله، ساخت و ذخیره‌سازی این دیاگرام‌ها از نظر محاسباتی غیر قابل اجرا خواهد شد.

رومان و همکاران [5] از روش میانگین فازی C و ویژگی‌های

هندسی سطح برای ناحیه‌بندی سطح با فرم آزاد روی ماشین 2+3 محور استفاده کردند. در کار آن‌ها مرزهای تکه سطح به وسیله روش نزدیک‌ترین همسایگی در سطح U و V مشخص شده بود. آن‌ها همچنین در سال 2007 روش طبقه‌بندی میانگین k را برای تقسیم کردن یک سطح نسبت به تیکه سطح‌ها معرفی کردند. در این کار آن‌ها از روش کمترین فاصله داخل ناحیه برای شناسایی مرزهای نواحی استفاده کردند [6].

هیو و همکاران [7] یک برنامه اندازه‌گیری به کمک رایانه را برای بهینه ساختن اندازه‌گیری نقاط شاخص بر اساس اطلاعات خطوط ریلی سطوح با فرم آزاد مانند تیغه پره پیشنهاد کردند. برنامه پیشنهاد شده، سطوح با فرم آزاد را به نواحی متعدد اندازه‌گیری بر اساس خطوط ریلی سطوح تیغه و بردار مماس پراب تقسیم‌بندی می‌کرد.

تونگ و همکاران [8] یک رویکرد کاربردی برای ناحیه‌بندی سطوح با فرم آزاد ارائه کردند که اساس کار آن بر مبنای انحنای سطح بود. آن‌ها سطح با فرم آزاد را بر مبنای انحنای سطح به نواحی مقعر و محدب تقسیم‌بندی کردند. در این پژوهش از کدهای زنجیری در حوزه پردازش تصویر برای تعیین کردن مرز هر ناحیه استفاده شد.

ساهو و منگ [9] تلاش کردند تا تبدیلی برای موقعیت‌دهی سطوح دارای شکل هندسی مشخص (ساده) پیدا کنند که با حل مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی با متغیرهای سه زاویه چرخشی برحسب درجه و سه کمیت انتقالی برحسب میلی‌متر در طول سه محور به دست می‌آیند. بالاسوبرامانین و گو [10] با رویکرد شبکه عصبی اقدام به حل مسئله موقعیت‌یابی کردند.

هانگ، گو و زرنیک [11] رویکرد شبه معکوس را برای پیدا کردن ماتریس انتقال T با بهبود قابل توجه در محاسبه بهره‌وری و کارایی آن استفاده کردند. اینسورث و همکاران [1] از تکنیک بهبود یافته کار ساهوو و منگ در سال 1991 برای حل مشکل موقعیت‌دهی بهره بردند. آن‌ها در کار خود از روش دستی برای پیدا کردن تعدادی از نقاط متناظر از سطح ماشین‌کاری و مدل طراحی استفاده کردند.

لی و همکاران [12] برای موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی)، الگوریتم‌هایی که بر اساس ویژگی‌های سطح فرایند موقعیت‌دهی را انجام می‌دهند، پیشنهاد دادند. بدین صورت که در مرحله اول مدل طراحی و داده‌های اندازه‌گیری شده، تحلیل و ویژگی‌هایی از سطح توسط عملیات قطعه‌بندی<sup>6</sup> اتوماتیک

<sup>1</sup> Localization

<sup>2</sup> Bezier

<sup>3</sup> B-spline

<sup>4</sup> Non Uniform Rational B-spline (NURBS)

<sup>5</sup> CAD/CAM

<sup>6</sup> Segmentation process

برای موقعیت‌دهی قطعاتی که دارای شکل هندسی مشخصی می‌باشند عملیات موقعیت‌دهی به این صورت انجام می‌شود که ویژگی‌هایی از قطعه را با استراتژی مناسب اندازه‌گیری کرده سپس توسط عملیات نرم‌افزاری، موقعیت‌دهی و انتقال مختصات انجام می‌شود. در حالی که در قطعات دارای فرم آزاد موقعیت‌دهی با استفاده از ابزارهای خاص همچون قیدوبندها یا دیگر تجهیزات فیزیکی (ماشین اندازه‌گیری مختصات مجهز به میز دورانی) انجام می‌شود. با این حال به دلیل نیاز به تولید ویژگی‌های مرجع و سطوح دقیق روی این قیدوبندها، این تجهیزات راه‌حل بهینه‌ای برای غلبه بر معضل موقعیت‌دهی نیستند. همچنین طراحی و ساخت قیدوبندهای جدید مستلزم صرف زمان و هزینه‌های زیاد است [17,16].

وقتی هیچ ویژگی با هندسه ساده و مشخص وجود نداشته باشد از خود سطح دارای فرم آزاد جهت موقعیت‌دهی استفاده می‌شود، بنابراین از یک روند نرم‌افزاری جهت موقعیت‌دهی داده‌های اندازه‌گیری شده با مدل طراحی استفاده می‌شود. در این مقاله برخلاف روش‌هایی که تاکنون صورت پذیرفته است و با فرض بر اینکه هیچ ویژگی با هندسه مشخص (ساده) برای موقعیت‌دهی سطح با فرم آزاد اندازه‌گیری و مدل طراحی وجود ندارد، عملیات موقعیت‌دهی با ترکیب ناحیه‌بندی<sup>6</sup> سطوح با فرم آزاد (نواحی محدب، مقعر و زینی) و الگوریتم ژنتیک، انجام گرفته است.

## 2- رویه نربز

با توجه به اینکه در این مقاله از رویه نربز به عنوان هندسه مدل‌سازی اصلی استفاده گردیده لذا در این بخش به بررسی رویه نربز پرداخته شده است. سطح نربز با استفاده از  $(n+1) \times (m+1)$  نقطه کنترلی تعریف می‌شود که در رابطه نربز این نقاط به صورت  $P_{i,j}$  نمایش داده می‌شوند. رویه نربز با درجات  $(k, l)$  در فضای پارامتریک  $(u, v)$  تعریف می‌گردد [2]. در رابطه (1) معادله رویه نربز نمایش داده شده است.

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} h_{i,j} P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} h_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)} \quad (1)$$

در این رابطه  $P_{i,j}$  نقاط کنترلی هستند که شبکه کنترلی دو سویه را شکل می‌دهند،  $h_{i,j}$  وزن‌ها و  $N_{i,k}(u)$  و  $N_{j,l}(v)$  توابع پایه بی‌اسپیلاین تعریف شده در بردارهای گره‌ای به ترتیب در جهات  $U, V$  می‌باشند. مقدار  $N_{i,k}(u)$  طبق رابطه بازگشتی (2) تعیین

استخراج می‌شوند. سپس در مرحله دوم این ویژگی‌ها ارزیابی و مراکز هرکدام از ویژگی‌ها برای داده‌های اسمی و اندازه‌گیری محاسبه می‌شود. سپس این دو مجموعه مراکز برای محاسبه ماتریس انتقال جهت موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی) استفاده خواهند شد.

ون و همکاران [13] فرایند موقعیت‌دهی را با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز شبه توده ذرات<sup>1</sup> و روش بخش‌بندی سطح<sup>2</sup> انجام دادند. آن‌ها در مرحله اول توسط الگوریتم بهینه‌ساز شبه توده ذرات پارامترهای انتقال را جهت موقعیت‌دهی بین سیستم مختصات اندازه‌گیری و سیستم مختصات مدل طراحی، به دست آوردند، سپس در مرحله دوم با استفاده از روش بخش‌بندی سطح، نزدیک‌ترین نقاط در هر دو سیستم مختصات را پیدا کردند. آن‌ها از این روش جهت موقعیت‌دهی داده‌های واقعی (داده‌های ماشین اندازه‌گیری مختصات) استفاده نمودند؛ نتایج نشان داد الگوریتم پیشنهادی آن‌ها نسبت به الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه<sup>3</sup> که در نرم‌افزارهای ماشین اندازه‌گیری مختصات استفاده می‌شود، 10 تا 20 درصد دقیق‌تر بوده و انحرافات بالا و پایین (انحراف داده‌های اندازه‌گیری نسبت به مدل طراحی بعد از موقعیت‌دهی) آن نیز پایین‌تر می‌باشد.

مهراد و همکاران [14] دو روش را برای موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی) و ظریف (دقیق) پیشنهاد دادند. آن‌ها با استفاده از تشابه بین انحنا و فاصله نقاط اندازه‌گیری و نقاط متناظر آن‌ها روی مدل طراحی، موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی) را انجام دادند. همچنین با استفاده از عدم قطعیت فرایند اندازه‌گیری و موقعیت‌دهی، موقعیت‌دهی ظریف (دقیق) را انجام دادند.

هی و همکاران [15] یک الگوریتم بهینه‌ساز ترکیبی را جهت موقعیت‌دهی دقیق‌تر داده‌های اندازه‌گیری با مدل طراحی پیشنهاد دادند. آن‌ها دو الگوریتم معروف نلدر - مید<sup>4</sup> و الگوریتم الگوریتم تکامل دیفرانسیلی<sup>5</sup> را با هم ترکیب نموده و از آن جهت موقعیت‌دهی داده‌های اندازه‌گیری یک سطح با فرم آزاد با مدل طراحی استفاده کردند. سپس الگوریتم پیشنهادی خود را با الگوریتم مرسوم حداقل مربعات مقایسه و اثربخشی الگوریتم پیشنهادی خود را به اثبات رساندند.

<sup>1</sup> Quasi particle swarm optimization(QPSO)

<sup>2</sup> Surface subdivide method

<sup>3</sup> ICP=Iterative Closest Point

<sup>4</sup> Nelder-Mead (NM) algorithm

<sup>5</sup> Differential Evolution (DE) algorithm

<sup>6</sup> Partitioning

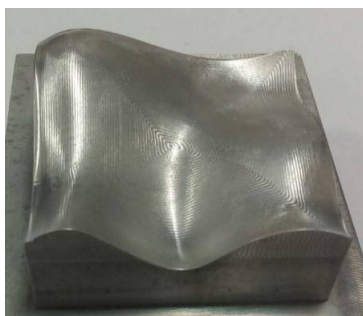


Fig.1 The machined free-form surface

شکل 1 سطح با فرم آزاد ماشین کاری شده



Fig.2 Sampling from a free-form surface to extract the machining model

شکل 2 نمونه‌برداری از سطح با فرم آزاد جهت استخراج مدل ماشین کاری

#### 4-1-1- گام‌های اساسی برای ناحیه‌بندی سطح با فرم آزاد

##### 4-1-1- استخراج ابر نقاط از سطح با فرم آزاد

مطابق توضیحات ارائه شده در بخش یک، در این مقاله از رویه نریز جهت ایجاد سطح با فرم آزاد مربوطه استفاده شده است.

در این پژوهش به منظور استخراج ابر نقاط از سطح با فرم آزاد از نرم‌افزار راینو<sup>4</sup> و با تعداد 1300 نقطه با توزیع یکنواخت بر روی سطح با فرم آزاد مورد نظر استفاده شده است و مختصات نقاط تولید شده به صورت مجزا (x و y و z) در فایل اکسل ذخیره گردید تا به‌عنوان ورودی الگوریتم ناحیه‌بندی سطح با فرم آزاد در نرم‌افزار متلب<sup>5</sup> استفاده گردد. در شکل 3 ابر نقاط استخراج شده از سطح با فرم آزاد نمایش داده شده است.

#### 4-1-2- محاسبه انحنای گوسی و انحنای میانگین برای هر

##### نقطه

بعد از استخراج ابر نقاط از مدل مربوطه، با استفاده از روابط (3) و (4) انحنای گوسی و انحنای میانگین برای هر نقطه محاسبه می‌شوند.

می‌شود.

$$N_{i,k}(u) = (u - u_i) \frac{N_{i,k-1}(u)}{u_{i+k-1} - u_i} + (u_{i+k} - u) \frac{N_{i+1,k-1}(u)}{u_{i+k} - u_{i+1}}$$

$$N_{i,1} = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

### 3- معرفی قطعه کار دارای سطح با فرم آزاد و اندازه‌گیری

#### توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات

برای تولید G کدهای لازم به‌منظور ماشین‌کاری قطعه آلومینیومی به ابعاد 50×50 میلی‌متر با استفاده از ماشین فرز 3 محور کنترل عددی مدل FP4MP واپاشگر زیمنس ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز، از نرم‌افزار ماشین‌کاری اتودسک پاورمیل<sup>1</sup> استفاده شد. در شکل 1 سطح با فرم آزاد ماشین‌کاری شده، نمایش داده شده است. بعد از انجام عملیات ماشین‌کاری سطح با فرم آزاد، قطعه ماشین‌کاری شده جهت نمونه‌برداری و استخراج مدل ماشین‌کاری از سطح با فرم آزاد مورد نظر، به‌وسیله ماشین اندازه‌گیری مختصات با سیستم پراب تماسی مدل رنی شاو<sup>2</sup> نمونه‌برداری شده است. این نمونه‌برداری با تعداد 1300 نقطه نمونه با توزیع یکنواخت و با پراب به قطر 3 میلی‌متر و طول سوزن 20 میلی‌متر انجام شده است. بعد از انجام عملیات نمونه‌برداری از سطح با فرم آزاد، مختصات x، y و z نقاط نمونه توسط نرم‌افزار موجود در ماشین اندازه‌گیری مختصات ذخیره شده و در ادامه توسط نرم‌افزار کتیا<sup>3</sup>، مقداری دوران و جابجایی فرضی در مدل ماشین‌کاری نسبت به مدل طراحی ایجاد گردیده تا شرایط واقعی جهت موقعیت‌دهی مدل طراحی و مدل ماشین‌کاری برای سطوح با فرم آزاد شبیه‌سازی گردد. در شکل 2 نمونه‌برداری از سطح با فرم آزاد جهت استخراج مدل ماشین‌کاری نمایش داده شده است.

#### 4- ناحیه‌بندی سطوح با فرم آزاد

منظور از ناحیه‌بندی سطح، تقسیم کردن سطح با فرم آزاد به تعداد نواحی مختلفی می‌باشد که هر یک از آن‌ها دارای خصوصیات یکسانی هستند [8]. در این مقاله ناحیه‌بندی سطح با فرم آزاد بر پایه‌ی انحنای گوسی و انحنای میانگین انجام گرفته است و سطح با فرم آزاد با توجه به محدب، مقعر و یا زینی بودن، ناحیه‌بندی می‌شود. در پژوهش‌های انجام گرفته جهت کاهش تعداد نواحی و کمتر شدن زمان عملیاتی، نواحی صاف و محدب با یکدیگر ترکیب شده‌اند.

<sup>1</sup> Autodesk Power mill Ultimate 2017

<sup>2</sup> RENISHAW MH20i

<sup>3</sup> CATIA V5R18

<sup>4</sup> Rhinoceros

<sup>5</sup> Matlab R2015a

سطح می‌باشند که از این ماتریس می‌توان در فرایند موقعیت‌دهی سطوح با فرم آزاد که در بخش بعدی به آن اشاره می‌شود، استفاده کرد. ماتریس ناحیه‌بندی از سه دسته عدد تشکیل می‌شود که این اعداد شامل صفر، 1 و -1 می‌باشند. مکان‌هایی که با عدد صفر مشخص شده‌اند نواحی زینی را نشان می‌دهند و مکان‌هایی که با عدد 1 نشان داده شده‌اند جزء نواحی محدب می‌باشند و عدد -1 نشان‌دهنده ناحیه مقعر است. در شکل‌های 4 و 5 سطح با فرم آزاد ناحیه‌بندی شده و قسمتی از ماتریس ناحیه‌بندی سطح نمایش داده شده است.

در شکل 6 روند نمای الگوریتم ناحیه‌بندی سطح با فرم آزاد نمایش داده شده است.

### 5- موقعیت‌دهی سطوح با فرم آزاد

برای مقایسه دو سطح با فرم آزاد به منظور بازرسی این سطوح می‌بایست سطح تولیدشده (مدل ماشین‌کاری) و مدل طراحی به‌واسطه‌ی موقعیت‌دهی در سیستم مختصات یکسانی قرار گیرند. به‌طور کل دو مرحله برای موقعیت‌دهی نیاز می‌باشد: موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی)<sup>1</sup> و موقعیت‌دهی ظریف (دقیق)<sup>2</sup>

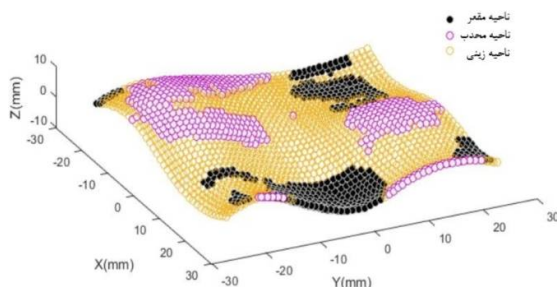


Fig. 4 Partitioned free-form surface

شکل 4 سطح با فرم آزاد ناحیه‌بندی شده

123x16 double

	1	2	3	4	5	6	7	8
9	0	0	-1	0	0	0	1	0
10	0	0	-1	0	0	0	1	0
11	0	-1	-1	0	0	0	1	0
12	0	-1	-1	0	0	-1	1	0
13	0	-1	-1	0	-1	-1	1	0
14	0	-1	-1	0	-1	-1	1	0
15	0	-1	0	0	-1	-1	1	0
16	0	-1	0	1	-1	-1	1	0
17	0	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
18	-1	-1	-1	0	0	-1	0	-1
19	-1	-1	0	0	0	1	0	-1
20	0	-1	0	0	0	1	0	0
21	0	0	0	0	-1	1	0	0

Fig. 5 Part of the surface partitioning matrix

شکل 5 بخشی از ماتریس ناحیه‌بندی سطح (عدد صفر نمایانگر ناحیه زینی، عدد 1- نمایانگر ناحیه مقعر و عدد -1 نمایانگر ناحیه محدب)

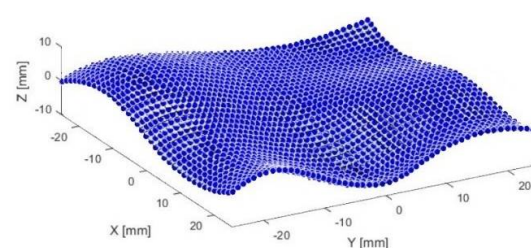


Fig. 3 Cloud points extracted from the free-form surface

شکل 3 ابر نقاط استخراج شده از سطح با فرم آزاد

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} = K_{\min} K_{\max} \quad (3)$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{EN - 2FM + GL}{EG - F^2} \right) = \frac{1}{2} (K_{\min} + K_{\max}) \quad (4)$$

برای به دست آوردن انحناهای گوسی  $K$  و انحناهای میانگین  $H$  نیاز است اجزای  $E, F, G, L, M, N$  با توجه به روابط (5) و (6) محاسبه گردند که در ادامه نحوه به دست آوردن آن‌ها آورده شده است.

$$E = \frac{\partial S}{\partial U} \frac{\partial S}{\partial U}; F = \frac{\partial S}{\partial U} \frac{\partial S}{\partial V}; G = \frac{\partial S}{\partial V} \frac{\partial S}{\partial V} \quad (5)$$

$$L = n \frac{\partial^2 S}{\partial U^2}; M = n \frac{\partial^2 S}{\partial U \partial V}; N = n \frac{\partial^2 S}{\partial V^2} \quad (6)$$

همچنین مقادیر  $K_{\min}$  و  $K_{\max}$  که انحناهای اصلی می‌باشند از روابط (7) و (8) محاسبه می‌گردند.

$$K_{\max} = H + \sqrt{H^2 - K} \quad (7)$$

$$K_{\min} = H - \sqrt{H^2 - K} \quad (8)$$

### 4-1-3- دسته‌بندی نقاط برای تشکیل نواحی مقعر، محدب و

زینی

گام نهایی برای ناحیه‌بندی سطوح با فرم آزاد، دسته‌بندی نقاط محدب، مقعر و زینی مجاور هم برای تشکیل نواحی محدب، مقعر و زینی می‌باشد. بدین‌صورت که بعد از محاسبه مقادیر انحناهای گوسی و انحناهای میانگین برای تمام نقاط، در صورتی که انحناهای گوسی  $K$  بزرگ‌تر و یا مساوی صفر باشد و انحناهای میانگین  $H$  کوچک‌تر از صفر باشد آن نقاط جزء ناحیه محدب به شمار می‌روند و در ماتریس  $M1$  ذخیره می‌گردند. به همین‌روال اگر انحناهای گوسی  $K$  بزرگ‌تر و یا مساوی صفر باشد و انحناهای میانگین  $H$  بزرگ‌تر از صفر باشد آن نقاط جزء ناحیه مقعر به حساب می‌آیند و در ماتریس  $M2$  ذخیره می‌شوند. درنهایت اگر انحناهای گوسی  $K$  کوچک‌تر از صفر باشد، آن نقاط جزء ناحیه زینی شمرده می‌شوند و در ماتریس  $M3$  ذخیره می‌گردند.

خروجی‌های کد ناحیه‌بندی سطح شامل مختصات نقاط نواحی مقعر، محدب و زینی و همچنین ماتریس ناحیه‌بندی

<sup>1</sup> General localization

<sup>2</sup> Fine localization

**1-5- موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی)**

موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی) به منظور بازرسی سطوح با فرم آزاد توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات و همچنین جهت ایجاد تقریب خوب اولیه برای الگوریتم‌های موقعیت‌دهی ظریف ضروری است (در نرم‌افزارهای ماشین اندازه‌گیری مختصات با استفاده از دستور تنظیمات<sup>1</sup> می‌توان موقعیت‌دهی عمومی را انجام داد). موقعیت‌دهی عمومی عموماً با عملیات نرم‌افزاری به کمک اپراتور انجام می‌شود [16].

**2-5- موقعیت‌دهی ظریف (دقیق)**

بعد از تکمیل موقعیت‌دهی عمومی، جهت تطابق بیشتر مدل باسازی شده و مدل طراحی، موقعیت‌دهی ظریف انجام می‌شود. در ماشین اندازه‌گیری مختصات جهت موقعیت‌دهی ظریف سطوح با فرم آزاد از الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه استفاده می‌شود. این الگوریتم برای یافتن کمینه اختلاف مقادیر مدل‌های طراحی و ماشین‌کاری تلاش می‌کند [16].

**6- الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه**

الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه در ابتدا توسط بسل و مک کی [18] و چن و مدیونی [19] پیشنهاد شده است. این روش، روشی استاندارد برای موقعیت‌دهی ابر نقاط در بازرسی و مهندسی معکوس می‌باشد. در این روش ابتدا دو مجموعه نقاط به صورت مدل و داده وارد شده و ماتریس تبدیل به صورت  $(t)$  و  $(R)$  به دست آورده می‌شود که این پارامترها، ماتریس چرخش و بردار انتقال می‌باشند و برای این منظور بایستی تابع هدف در رابطه (9) حداقل گردد:

$$E(R, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|m_i - (Rd_i + t)\|^2 \quad (9)$$

در این رابطه مقدار  $N$  تعداد نقاط برای عملیات موقعیت‌دهی،  $m_i$  بردار هر نقطه داده،  $R$  ماتریس چرخش و  $t$  بردار جابه‌جایی دو مجموعه نقاط می‌باشند. الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه برای متناظر کردن نزدیک‌ترین نقاط مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به حدس اولیه مناسب، الگوریتم همگرا خواهد شد و تابع هدف حداقل خواهد گردید [20]. در شکل 7 روند نمای الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه نشان داده شده است [21].

**7- معرفی الگوریتم ژنتیک**

الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از روش‌های تصادفی بهینه‌سازی

توسط جان هالند [22] در سال 1975 ابداع شد. الگوریتم ژنتیک (GA) روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد که از طبیعت الهام گرفته شده و فرآیندهای آن بر اساس تکامل زیستی انجام می‌شود. الگوریتم ژنتیک مکرراً جمعیتی از راه‌حل‌های منفرد مسئله را تغییر می‌دهد که از این تغییرات تحت عنوان تکامل یاد می‌شود. در هر گام از این تکامل، دو عضو از جمعیت را به‌طور تصادفی به‌عنوان والدین انتخاب کرده و فرزند آن‌ها را به‌عنوان نسل بعدی در نظر می‌گیرد. به این ترتیب جمعیت به سمت یک راه‌حل بهینه تکامل می‌یابد.

الگوریتم ژنتیک از سه دسته قانون اصلی برای تولید نسل بعدی از نسل حاضر استفاده می‌نماید:

- قوانین انتخاب<sup>2</sup>: با استفاده از این قوانین افرادی که برای تولید نسل بعدی مورد استفاده می‌باشند انتخاب می‌شوند.
- قوانین تلفیق<sup>3</sup>: این قوانین دو والد را باهم ترکیب کرده و فرزندان نسل بعد را تولید می‌کنند.
- قوانین جهش<sup>4</sup>: یک تغییر تصادفی را بر روی افراد اعمال کرده و افراد جدید را در جمعیت تولید می‌نماید.

**7-1- نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک**

در ادامه یک طرح کلی از چگونگی عملکرد ژنتیک ارائه شده است:

- 1) الگوریتم با تولید یک جمعیت آغازین تصادفی کار خود را آغاز می‌کند.
- 2) در ادامه یک ترتیب از جمعیت‌های جدید را ایجاد می‌نماید (نسل‌ها). در هر گام الگوریتم از افراد موجود در نسل حاضر برای تولید نسل بعدی استفاده می‌کند.
- 3) الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که یکی از شرایط توقف محقق شود.

**7-2- شرایط توقف الگوریتم ژنتیک**

از شرایط زیر می‌توان برای توقف روند تکرار الگوریتم ژنتیک استفاده نمود:

- 1) تعداد نسل‌ها: الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که تعداد نسل‌ها به مقدار معینی برسد.
- 2) محدودیت برآزندگی: الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که بهترین مقدار برآزندگی در جمعیت حاضر کوچک‌تر یا مساوی یک مقدار معین شود.

<sup>2</sup> Selection Rules<sup>3</sup> Crossover Rules<sup>4</sup> Mutation Rules<sup>1</sup> Setup

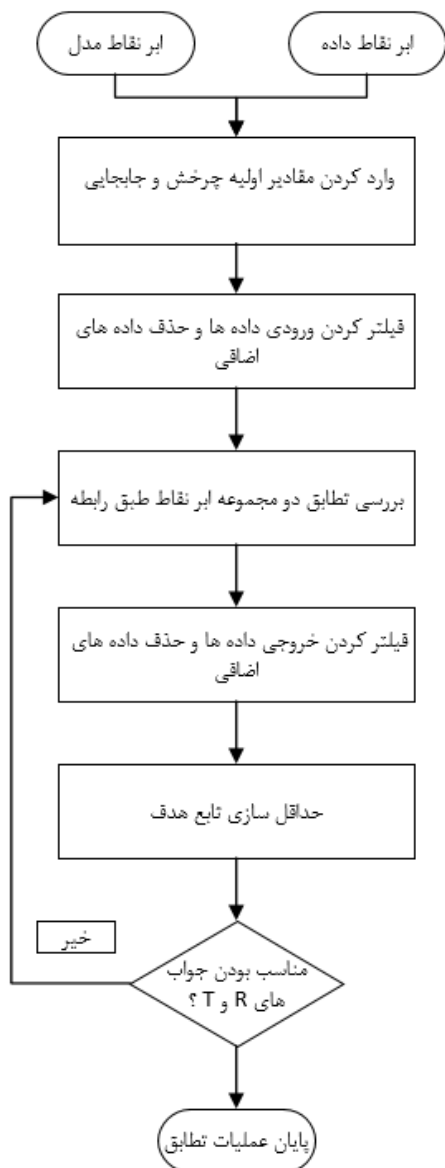


Fig. 7 Flowchart of Iterative Closest Point algorithm [21]  
 شکل 7 روند نمای الگوریتم تکرار نزدیک‌ترین نقطه [21]

**8- موقعیت‌دهی سطوح با فرم آزاد به کمک ناحیه‌بندی سطح و الگوریتم ژنتیک**

در تحقیق حاضر روشی بر مبنای انحنای سطوح برای موقعیت‌دهی و تطبیق‌پذیری اتوماتیک سطوح با فرم آزاد جهت بازرسی این سطوح توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات معرفی گردیده است به‌گونه‌ای که از خود سطوح با فرم آزاد جهت موقعیت‌دهی استفاده می‌شود. در این روش سطح اندازه‌گیری با مدل طراحی در دو مرحله موقعیت‌دهی می‌گردند. در مرحله اول موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی) که بر مبنای ارتباط و تشابه بین انحنای سطوح با فرم آزاد و تقسیم کردن این سطوح به

(3) رکود نسلی: اگر در نسل‌ها به تعداد معینی، هیچ‌گونه پیشرفتی حاصل نشود، الگوریتم متوقف می‌گردد.  
 (4) رکود زمانی: در صورتی که در تابع هدف، برای زمان معینی هیچ‌گونه پیشرفتی حاصل نشود، الگوریتم متوقف می‌گردد.  
 الگوریتم در صورتی که هر یک از شرایط فوق برآورده گردد، متوقف می‌شود.

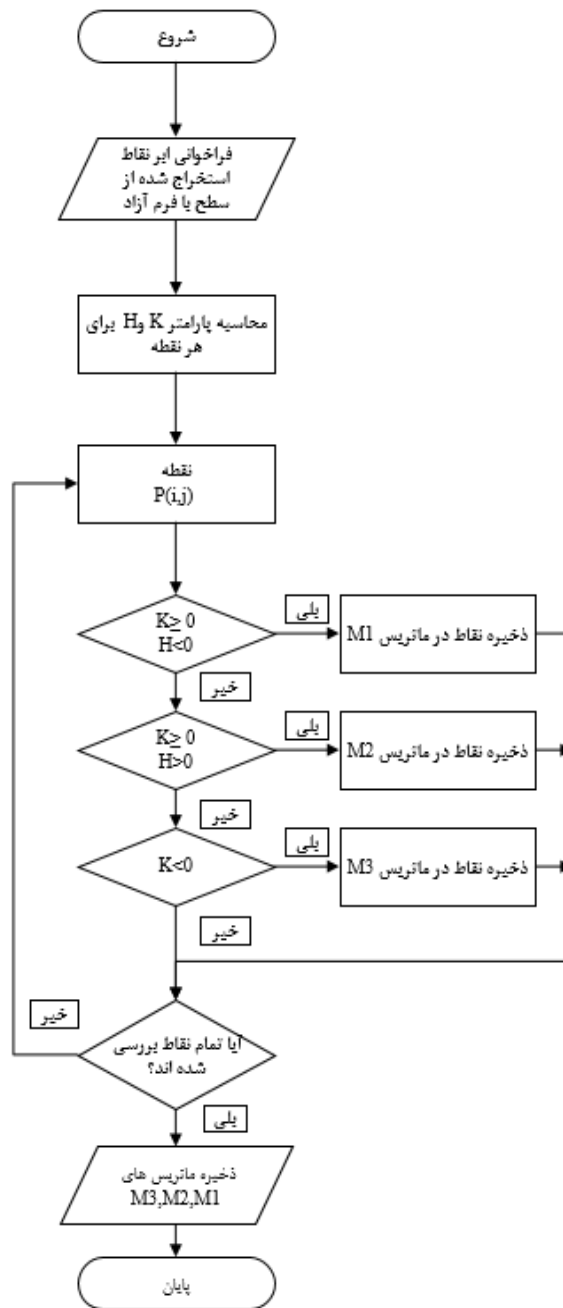


Fig. 6 Flowchart of free-form surface partitioning algorithm  
 شکل 6 روند نمای الگوریتم ناحیه‌بندی سطح با فرم آزاد

جدول 1 متغیرهای الگوریتم ژنتیک

Table 1 Genetic algorithm variables

مقدار	نوع متغیر
[0 0 0 -12 -12 -12]	حد پایین
[2π 2π 2π 12 12 12]	حد بالای مرز
23	جمعیت
350	تعداد تکرار
120	رکود نسلی

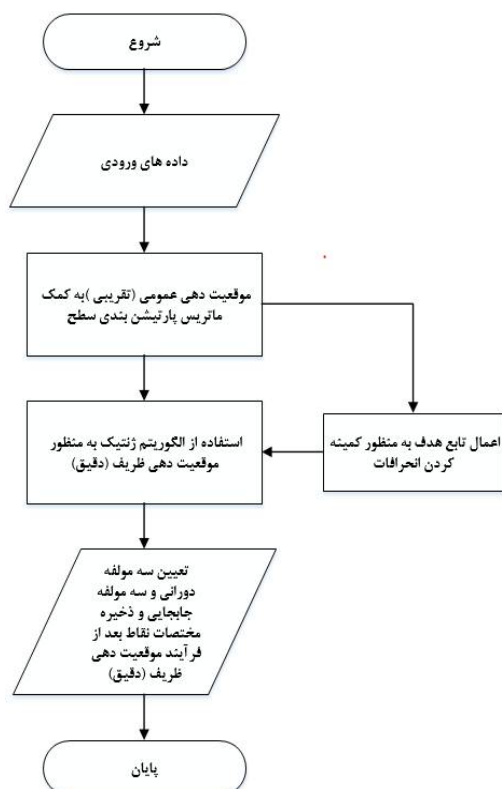


Fig. 8 Flowchart of free-form surfaces localization algorithm by proposed method

شکل 8 روند نمای الگوریتم موقعیت‌دهی سطوح با فرم آزاد توسط روش پیشنهادی

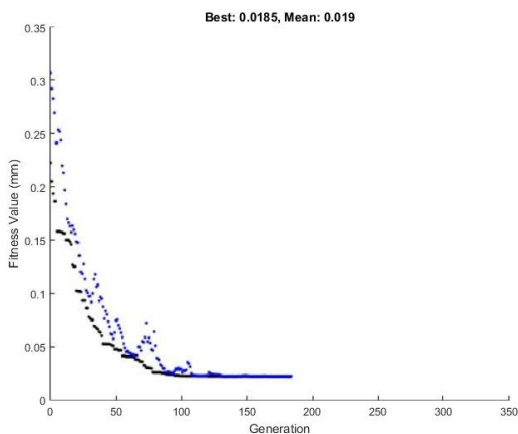


Fig. 9 Fitness values of target function for proposed method

شکل 9 مقادیر همگرایی تابع هدف برای روش پیشنهادی

نواحی مقعر، محدب و زینی می‌باشد، صورت می‌گیرد. مرحله دوم موقعیت‌دهی ظریف (دقیق) است که توسط الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود و تشابه را به صورت نقطه‌به‌نقطه بررسی کرده و موقعیت‌دهی سطوح را با دقت بالایی انجام می‌دهد. این روند توسط کد نویسی در نرم‌افزار متلب نسخه 2015 انجام گرفته است.

در این کد در ابتدا ابر نقاط مدل طراحی و مدل ماشین‌کاری به همراه ماتریس ناحیه‌بندی آن‌ها فراخوانی می‌شود. با اعمال دوران و جابجایی اولیه به کمک ماتریس ناحیه‌بندی، مختصات مدل ماشین‌کاری به مدل طراحی نزدیک می‌شود و موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی) صورت می‌گیرد. سپس تابع هدف به منظور کمینه کردن انحرافات، جهت استفاده در الگوریتم ژنتیک تشکیل می‌گردد. الگوریتم ژنتیک با استفاده از تابع هدف تشکیل شده در مرحله قبل و متغیرهای موجود در جدول 1، فرایند موقعیت‌دهی نهایی و کمینه کردن انحرافات بین مدل ماشین‌کاری و مدل طراحی را انجام می‌دهد. خروجی‌های فرایند موقعیت‌دهی مذکور شامل شش مؤلفه (سه مؤلفه ابتدایی، میزان دوران حول محورهای اصلی بر حسب رادیان و سه مؤلفه بعدی، میزان جابجایی در راستای محورهای اصلی بر حسب میلی‌متر) و مختصات نقاط مدل‌های طراحی و ماشین‌کاری بعد از فرایند موقعیت‌دهی می‌باشند که از این شش مؤلفه جهت ترسیم موقعیت نهایی و از مختصات نقاط مدل‌های طراحی و ماشین‌کاری پس از فرایند موقعیت‌دهی، جهت عبور سطح از آن‌ها و به دست آوردن میزان انحراف بین مدل‌ها استفاده شده است. شکل 8 روند نمای الگوریتم موقعیت‌دهی سطوح با فرم آزاد توسط روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که الگوریتم پیشنهادی در مقادیر بین 150 تا 160 تکرار، همگرا گردیده است و پس از آن روند همگرایی به صورت یک خط افقی ادامه پیدا کرده است. شکل 9 مقدار همگرایی تابع هدف را برای روش پیشنهادی نشان می‌دهد.

شکل‌های 10 و 11 به ترتیب مدل‌های طراحی و ماشین‌کاری را قبل و بعد از عملیات موقعیت‌دهی توسط روش پیشنهادی نشان می‌دهند. در شکل 12 میزان انحراف بین سطوح اندازه‌گیری و طراحی بعد از فرایند موقعیت‌دهی ظریف (دقیق) به صورت ارور مپ نشان داده شده است. شکل 13 توزیع احتمال انحراف مدل ماشین‌کاری از مدل طراحی نشان داده شده است. جدول 2 نتایج مقایسه مقادیر خطای میانگین و بیشینه خطا را بر حسب میلی‌متر برای روش تکرار نزدیک‌ترین نقطه و روش پیشنهادی نشان می‌دهد.



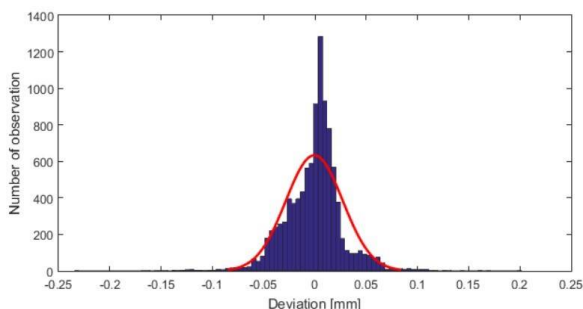


Fig. 13 The probability deviation of the machining model from the design model

شکل 13 توزیع احتمال انحراف مدل ماشین‌کاری از مدل طراحی

به منظور نشان دادن این موضوع که از روش پیشنهادی می‌توان به‌طور مستقیم برای بازرسی قطعات با سطوح آزاد به صورت کاربردی استفاده کرد، روش پیشنهادی با روش تکرار نزدیک‌ترین نقطه که به عنوان روش مبنا در ماشین‌های اندازه‌گیری مختصات جهت موقعیت‌دهی سطوح با فرم آزاد استفاده می‌شود مقایسه گردید. نتایج نشان داد، دقت موقعیت‌دهی با استفاده از روش پیشنهادی برای قطعه آلومینیومی به ابعاد  $50 \times 50$  میلی‌متر در حدود  $0/02$  میلی‌متر بوده است که این مقدار در مقایسه با مقدار به دست آمده توسط نرم‌افزار مورد استفاده در دستگاه اندازه‌گیری مختصات با روش تکرار نزدیک‌ترین نقطه برای همان قطعه 56 درصد کمتر می‌باشد.

## 10- مراجع

- [1] I. Ainsworth, M. Ristic, and D. Brujic, CAD-based measurement path planning for free-form shapes using contact probes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, pp. 23-31, 2000.
- [2] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS book*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] G. Elber and E. Cohen, Second-order surface analysis using hybrid symbolic and numeric operators, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 12, pp. 160-178, 1993.
- [4] Z. C. Chen, Z. Dong, and G. W. Vickers, Automated surface subdivision and tool path generation for 31212-axis CNC machining of sculptured parts, *Computers in Industry*, Vol. 50, pp. 319-331, 2003.
- [5] A. Roman, S. Bedi, and F. Ismail, Three-half and half-axis patch-by-patch NC machining of sculptured surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, pp. 524-531, 2006.

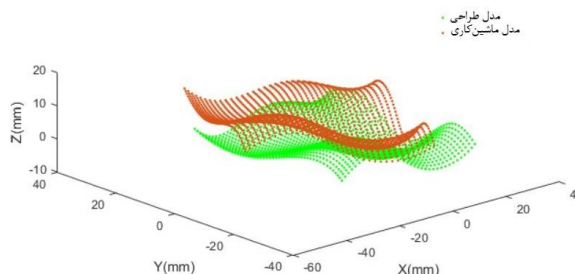


Fig. 10 Design and machining models before the partitioning process

شکل 10 مدل‌های طراحی و ماشین‌کاری قبل از فرایند موقعیت‌دهی

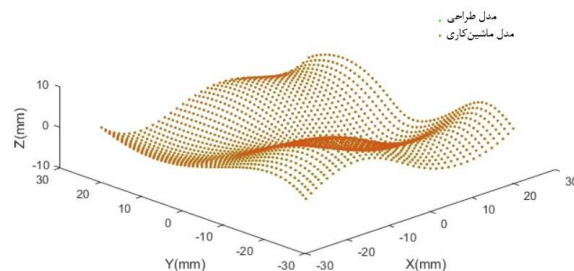


Fig. 11 Design and machining models after the partitioning process

شکل 11 مدل‌های طراحی و ماشین‌کاری بعد از فرایند موقعیت‌دهی

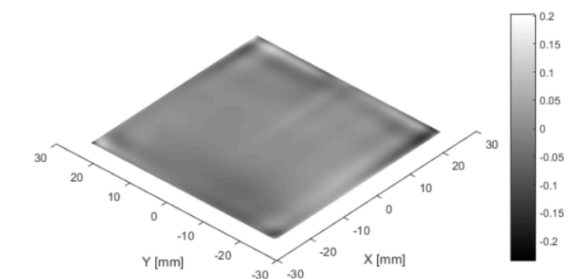


Fig. 12 Deviation between measurement and design surfaces after the fine localization process

شکل 12 انحراف بین سطوح اندازه‌گیری و طراحی بعد از فرایند موقعیت‌دهی ظریف

جدول 2 مقایسه مقادیر خطای میانگین و بیشینه خطا برای روش تکرار نزدیک‌ترین نقطه و روش پیشنهادی

Table 2 Comparison of mean error and maximum error for Iterative Closest Point method and proposed method

روش	خطای میانگین (میلی‌متر)	بیشینه خطا (میلی‌متر)
تکرار نزدیک‌ترین نقطه	0/0297	0/310
روش پیشنهادی	0/019	0/234

## 9- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، روش جدیدی جهت بهبود توانایی فرایندهای موقعیت‌دهی عمومی (تقریبی) و موقعیت‌دهی ظریف (دقیق) مورد بررسی قرار گرفت. در روش پیشنهادی سطح اندازه‌گیری و مدل طراحی بر مبنای ناحیه‌بندی سطوح با فرم آزاد و الگوریتم ژنتیک موقعیت‌دهی گردیدند.

- surface with design surface for freeform surface inspection, *Computer-Aided Design*, Vol. 53, pp. 90-103, 2014.
- [15] G. He, M. Zhang, and Z. Song, Error evaluation of free-form surface based on distance function of measured point to surface, *Computer-Aided Design*, Vol. 65, pp. 11-17, 2015.
- [16] Y. Li and P. Gu, Free-form surface inspection techniques state of the art review, *Computer-Aided Design*, Vol. 36, pp. 1395-1417, 2004.
- [17] L. Zhu, J. Barhak, V. Srivatsan, and R. Katz, Efficient registration for precision inspection of free-form surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, pp. 505-515, 2007.
- [18] P. J. Besl and N. D. McKay, Method for registration of 3-D shapes, in *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, 1992, pp. 586-607.
- [19] Y. Chen and G. Medioni, Object modelling by registration of multiple range images, *Image and vision computing*, Vol. 10, pp. 145-155, 1992.
- [20] A. Nüchter, J. Elseberg, P. Schneider, and D. Paulus, Study of parameterizations for the rigid body transformations of the scan registration problem, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 114, pp. 963-980, 2010.
- [21] L. Oswald, "Recent development of the Iterative Closest Point algorithm," *Autonomous systems lab, Swiss Federal Institute of Technology Zurich*, 2010
- [22] J. H. Holland, Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence, *Ann Arbor, MI: University of Michigan Press*, pp. 439-444, 1975.
- [6] A. Roman Flores, Surface partitioning for 3+ 2-axis Machining, *Ph.D. dissertation*, 2007.
- [7] E.-Y. Heo, D.-W. Kim, J.-Y. Lee, and K.-Y. Kim, Computer-aided measurement plan for an impeller on a coordinate measurement machine with a rotating and tilting probe, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, pp. 788-795, 2008.
- [8] N. Van Tuong and P. Pokorný, A practical approach for partitioning free-form surfaces, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 23, pp. 992-1001, 2010.
- [9] K. Sahoo and C.-H. Menq, Localization of 3-D objects having complex sculptured surfaces using tactile sensing and surface description, *Journal of engineering for industry*, Vol. 113, pp. 85-92, 1991.
- [10] S. Balasubramanian and P. Gu, A neural network approach to localization of parts with complex surfaces for precision inspection, *Computers in Engineering*, pp. 1025-1032, 1995.
- [11] X. Huang, P. Gu, and R. Zernicke, Localization and comparison of two free-form surfaces, *Computer-aided design*, Vol. 28, pp. 1017-1022, 1996.
- [12] Y. Li and P. Gu, Automatic localization and comparison for free-form surface inspection, *Journal of manufacturing systems*, Vol. 25, p. 251, 2006.
- [13] X. Wen, Y. Zhao, D. Wang, X. Zhu, and X. Xue, Accurate evaluation of free-form surface profile error based on quasi particle swarm optimization algorithm and surface subdivision, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 26, pp. 406-413, 2013.
- [14] V. Mehrad, D. Xue, and P. Gu, Robust localization to align measured points on the manufactured