



## روش جدید نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات مجهز به پراب تماسی

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

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

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

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 اردیبهشت 1395

پذیرش: 20 تیر 1395

ارائه در سایت: 24 مرداد 1395

کلید واژگان:

بازرسی

سطوح با فرم آزاد

استراتژی های نمونه برداری

بهینه سازی

ماشین اندازه گیری مختصات

سطوح با فرم آزاد، به شکل وسیعی در کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می گیرند. این سطوح، سطوحی پیچیده بدون تقارن محوری می باشند به همین دلیل بازرسی چنین سطوحی به وسیله ماشین های اندازه گیری مختصات مجهز به حسگر (پراب) تماسی، نیازمند استراتژی نمونه برداری مناسبی می باشد. استراتژی نمونه برداری یکی از عوامل اصلی ایجاد خطا روی هندسه جایگزین می باشد. در ماشین های اندازه گیری مختصات استراتژی نمونه برداری تعداد نقاط نمونه (اندازه نمونه) و موقعیت (نحوه توزیع) این نقاط را روی سطح تعیین می کند. بنابراین، نقاط نمونه باید توسط استراتژی های متناسب با سطح و با در نظر گرفتن ویژگی های سطح، روی سطح توزیع شوند. اغلب استخراج چنین اطلاعاتی (تعداد و نحوه توزیع نقاط نمونه روی سطح) به دلیل ماهیت پیچیده سطوح با فرم آزاد، با مشکلاتی روبرو می باشد. در کار حاضر برای اولین بار یک استراتژی نمونه برداری تطبیق پذیر با استفاده از الگوریتم بهینه ساز توده ذرات جهت نمونه برداری از سطوح با فرم آزاد، پیشنهاد شده است. استراتژی پیشنهادی با دو استراتژی رایج نمونه برداری از سطح، مقایسه و انحراف بین هندسه جایگزین و مدل CAD، استخراج شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد در روش پیشنهادی انحراف بین هندسه جایگزین و مدل CAD، دو تا سه برابر (بسته به تعداد نقاط نمونه) کمتر از روش های مرسوم می باشد، بنابراین اثر بخشی بالای روش پیشنهادی را نسبت به سایر روش ها، نشان می دهد.

## New sampling method of free-form surfaces on coordinate measuring machine equipped with contact probe

Javad Zahmati, Hossein Amirabadi\*

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

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 28 April 2016  
Accepted 10 July 2016  
Available Online 14 August 2016

**Keywords:**  
Inspection  
Free-form Surfaces  
Sampling Strategies  
Optimization  
Coordinate Measuring Machine

### ABSTRACT

Free-form surfaces are widely used in engineering applications. These surfaces are complex and without rotational symmetry; and for this reason they are inspected using the coordinate measuring machines equipped with contact sensor which require a suitable sampling strategy. Sampling algorithms are one of the most important factors of error creation in the accuracy of substitute geometry. In coordinate measuring machines, the sampling strategy involves the estimation of the number of sample points (sample size) and identification of their positions (how they are distributed) on the surface. Thus sample points should be distributed on the surface using sampling strategies that are appropriate for the surface. Often it is difficult to establish such pieces of information (number and the way of distributing the points on the surface) owing to the complex nature of free-form surfaces. In the present work, for the first time a new adaptive sampling strategy by particle swarm optimization algorithm (PSO) for sampling from free-form surface is proposed. The proposed strategy was compared with two conventional strategies and the deviation between substitute geometry and CAD model is extracted. The simulation results showed that in the proposed method the deviation between substitute geometry and CAD model is less than conventional methods by 2 to 3 times (depending on the number of points). Therefore, the high efficiency of the proposed method over other methods is concluded.

### 1- مقدمه

الزامی می باشد. در صنعت بازرسی قطعات دارای سطوح با فرم آزاد، به دو روش تماسی<sup>2</sup> و غیرتماسی<sup>3</sup> صورت می پذیرد [1]. علی رغم پیشرفت روش های غیرتماسی در سال های اخیر، روش های تماسی هنوز هم جایگاه ویژه ای در فرآیند تولید دارند و عملیات بازرسی را با دقت بالاتری نسبت به روش های

امروزه تولید قطعات دارای سطوح با فرم آزاد<sup>1</sup> در صنایع مختلف از جمله هوافضا، اتومبیل سازی، قالب سازی، پزشکی و غیره کاربرد فراوانی یافته است. با توجه به ترانس های دقیق این قطعات، متعاقبا تضمین کیفیت آنها نیز

<sup>2</sup> Contact method

<sup>3</sup> Non-Contact method

<sup>1</sup> Free-form surfaces

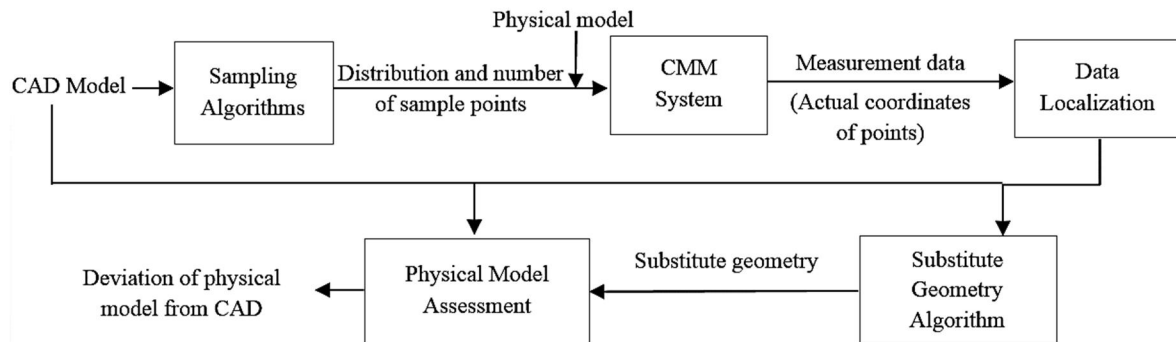


Fig. 1 free-form inspection procedure on CMM [3]

شکل 1 روند بازرسی سطوح با فرم آزاد به وسیله ماشین اندازه‌گیری مختصات [3]

نظر گرفته نمی‌شود، بنابراین برای ایجاد هندسه دقیق‌تر باید تعداد نقاط نمونه روی سطح افزایش یابد؛ این امر سبب افزایش زمان و هزینه بازرسی می‌شود. از جمله این استراتژی‌ها، استراتژی‌های نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت<sup>5</sup>، تصادفی<sup>6</sup>، هم‌رسلی<sup>7</sup> را می‌توان نام برد.

2- استراتژی‌های نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر<sup>8</sup>

در استراتژی‌های نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر، هندسه جایگزین از دقت بالاتری نسبت به استراتژی‌های نمونه‌برداری کورکورانه (در تعداد نقاط نمونه برابر) برخوردار می‌باشند. در این استراتژی‌ها فرآیند توزیع نقاط نمونه‌برداری روی سطح، با تعداد نقاط نمونه محدودی آغاز می‌شود، سپس تا رسیدن به برخی معیارها (یعنی، انحراف هندسی محاسبه شده تغییر چندانی نداشته باشد و یا رسیدن اندازه نمونه بیشینه) افزودن نقاط نمونه روی سطح، ادامه می‌یابد. از آنجاییکه در بازسازی سطوح با فرم آزاد، بیشترین انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD در نواحی با انحنا بیشتر می‌باشد، این استراتژی‌ها جهت توزیع نقاط نمونه بیشتر روی این نواحی تمرکز دارند؛ این بدین معناست که استراتژی‌های نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر روش‌هایی هستند که به پیدا کردن نواحی با احتمال خطای بیشتر، کمک می‌کند و به لحاظ دقت و زمان بازرسی نسبت به استراتژی نمونه‌برداری کورکورانه اثربخشی بالاتری دارند.

شانون [6] اولین و ساده‌ترین روش نمونه‌برداری، را که روش نمونه‌برداری یکنواخت است، معرفی کرد. از این روش به دلیل پیاده‌سازی آسان، به عنوان روش نمونه‌برداری پیش‌فرض در بسیاری از ماشین‌های اندازه‌گیری مختصات امروزی استفاده می‌شود.

در سال 1964 تئوری توالی هم‌رسلی<sup>9</sup> مطرح شد [7]. برای اولین بار وو و همکاران [8] از این توالی، در نمونه‌برداری از سطوح استفاده کردند.

کیم و رامان [9] با ارائه چهار استراتژی نمونه‌برداری، نحوه توزیع نقاط نمونه را روی سطوح بررسی کردند. آنها استراتژی‌های نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت، نمونه‌برداری تصادفی، نمونه‌برداری با استفاده از توالی هم‌رسلی و نمونه‌برداری با استفاده از توالی هالتون-زارمبا<sup>10</sup>، را برای توزیع نقاط روی سطوح بکار گرفتند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد، افزایش تعداد نقاط نمونه تا یک مقدار مشخص، سبب بالا رفتن دقت سطح بازسازی شده<sup>11</sup> می‌شود.

در روش‌های یاد شده، نمونه‌برداری از سطوح بدون توجه به پیچیدگی سطح انجام می‌شود. این در حالی است که، در فرآیند نمونه‌برداری سطوح با

غیرتماسی انجام می‌دهند [2]. در روش تماسی فرآیند بازرسی سطوح به وسیله ماشین اندازه‌گیری مختصات دارای پراب تماسی به شکل نقطه به نقطه انجام می‌شود. در مرحله بعد این نقاط جهت بازسازی مدل قطعه ماشین‌کاری شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نهایت این مدل با مدل CAD مقایسه شده و انحراف مدل قطعه ماشین‌کاری شده نسبت به مدل CAD گزارش می‌شود [3]. در شکل 1 روند بازرسی سطوح با فرم آزاد به وسیله ماشین اندازه‌گیری مختصات نمایش داده شده است.

از آنجاییکه ماشین‌های اندازه‌گیری مختصات، سطح را نقطه به نقطه اندازه‌گیری می‌کنند، به همین دلیل بازدهی نسبتاً پایین‌تری در مقایسه با روش‌های نوری دارند [4]. به خصوص در سطوح با فرم آزاد که نیازمند سرعت و دقت اندازه‌گیری بالایی هستند. الگوریتم‌های نمونه‌برداری یکی از عوامل مهم ایجاد خطا به روی دقت هندسه جایگزین هستند، بنابراین جهت افزایش راندمان ماشین اندازه‌گیری مختصات در فرآیند نمونه‌برداری از سطح باید بتوان با حداقل نقاط نمونه<sup>1</sup>، هندسه جایگزینی<sup>2</sup> ایجاد کرد که کمترین انحراف هندسی را نسبت به مدل CAD، داشته باشد. لازم به ذکر است عملیات نمونه‌برداری از سطح قبل از انجام بازرسی قطعه شبیه‌سازی و خطای مربوط به آن کمینه می‌شود که این خطا مجزا از خطاهای ساخت و اندازه‌گیری می‌باشد. الگوریتم‌های نمونه‌برداری نحوه توزیع نقاط نمونه را روی سطح تعیین می‌کنند و تأثیر مستقیم روی دقت هندسه جایگزین ایجاد شده از مدل CAD دارند [5]. از آنجاییکه این الگوریتم‌ها خطای خاص خود را دارند در این پژوهش به بررسی عددی این الگوریتم‌ها پرداخته شده است؛ ما از الگوریتم بهینه‌ساز توده ذرات<sup>3</sup> (معروف به الگوریتم پرندگان) جهت به دست آوردن بهترین توزیع نقاط نمونه روی یک سطح با فرم آزاد، استفاده نموده‌ایم. در الگوریتم پیشنهادی نقاط با استفاده از هوش جمعی به نحوی روی سطح حرکت می‌کنند که انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD کمینه شود. لازم به ذکر است، در کار حاضر الگوریتم توده ذرات برای اولین بار در فرآیند نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد به کار گرفته شده است.

تا کنون استراتژی‌های زیادی در زمینه نحوه توزیع نقاط نمونه روی سطوح با فرم آزاد، ارائه شده است. در مجموع استراتژی‌های نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند [5]:

1- استراتژی‌های نمونه‌برداری کورکورانه<sup>4</sup>:

در این استراتژی‌ها، به هنگام توزیع نقاط نمونه روی سطح پیچیدگی سطح در

<sup>5</sup> Uniform sampling strategy

<sup>6</sup> Random sampling strategy

<sup>7</sup> Hammersley sampling strategy

<sup>8</sup> Adaptive sampling strategies

<sup>9</sup> Hammersley sequence

<sup>10</sup> Halton- Zaremba sequence sampling

<sup>11</sup> Reconstructed surface

<sup>1</sup> Sample points

<sup>2</sup> Substitute geometry

<sup>3</sup> Particle Swarm Optimization Algorithm (PSOA)

<sup>4</sup> Blind sampling strategies

از استراتژی‌های پیشنهادی بسته به ویژگی سطوح مورد بازرسی روی سطوح خاصی پاسخگو خواهند بود.

اوبیدنت و رامان [14] سه الگوریتم ابتکاری برای توزیع نقاط روی تکه سطح پیشنهاد دادند. آنها نقاط با میانگین انحنای گوسی بیشینه، متوسط و مینیمم هر تکه‌سطح را به‌عنوان نقاط بحرانی در نظر گرفتند. در الگوریتم اول، سه نقطه اول مربوط به هر تکه‌سطح در نقاط بحرانی آن تکه‌سطح موقعیت-دهی می‌شد، سپس نقاط نمونه بعدی در تکه سطح‌هایی با تراکم نقاط کمتر قرار می‌گرفت. در الگوریتم دوم نقاط اولیه مطابق با الگوریتم اول توزیع می‌شدند، سپس نقاط باقی‌مانده بر اساس اندازه تکه‌سطح‌ها روی سطح موقعیت-دهی می‌شد. الگوریتم سوم ابتدا نقاط نمونه را بر اساس نسبت انحنای گوسی متوسط تکه‌سطح توزیع کرده سپس نقاط نمونه بعدی را بر اساس نسبت تکه‌سطح توزیع می‌کرد.

راجاماهون و همکاران [15] دو استراتژی جدید توزیع نقاط نمونه بر اساس مساحت یکنواخت سطح و همچنین بر پایه نقاط برجسته<sup>5</sup> ارائه دادند. یو و همکاران [16] با در نظر گرفتن تفاوت هندسی موجود بین مدل CAD و مدل ماشین‌کاری شده (بدلیل وجود خطاهای متفاوت در فرآیند ماشین‌کاری)، یک استراتژی نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر بر اساس مدل خطای فرم<sup>6</sup> جهت بازرسی سطوح با فرم آزاد توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات معرفی کردند. آنها در نظر گرفتند که نواحی با انحنای گوسی بیشتر خطای فرم بیشتری در فرآیند ماشین‌کاری دارند بنابراین، با اضافه کردن این خطای فرم به مدل CAD، یک مدل خطای فرم ایجاد و نهایتاً نقاط نمونه‌برداری را از روی این مدل استخراج کردند. این استراتژی نمونه‌برداری با دو روش شناخته شده نمونه‌برداری یکنواخت و نمونه‌برداری براساس متوسط انحنای گوسی تکه‌سطح مقایسه شد، نتایج حاصل از آزمایشات دقت بیشتر روش پیشنهادی آنها را اثبات کرد.

پونیاوسکا [17] روشی جدیدی جهت بازرسی قطعات مشابه دارای سطوح با فرم آزاد به‌وسیله ماشین اندازه‌گیری مختصات پیشنهاد داد. در روش پیشنهادی ایشان ابتدا قطعه اول با توزیع 625 نقطه با فواصل مساوی روی دستگاه اندازه‌گیری مختصات بازرسی گردید؛ در مرحله بعد مدل انحراف<sup>7</sup> قطعه ماشین‌کاری شده که حاوی خطاهای سیستماتیک<sup>8</sup> و خطای تصادفی<sup>9</sup> ایجاد شد. سپس اجزای تصادفی از مدل انحراف حذف، تا نهایتاً به مدل سطح قطعه<sup>10</sup> (مدل ماشین‌کاری شده) برسد.

در نهایت در مدل سطح قطعه نواحی بحرانی (نواحی با انحراف بیشتر) شناسایی شدند و در قطعات بعدی فقط نقاط بحرانی مشخص شده، مورد بازرسی قرار گرفتند. از جمله محاسن این سیستم عبارتند از:

- 1- برازش سطح از روی نقاط اندازه‌گیری در قطعات بعدی نیاز نیست.
- 2- بازرسی تمام سطح در قطعات بعدی ضرورت ندارد (فقط نواحی با احتمال خطای بیشتر بازرسی می‌شود).

موضوع اصلی بیشتر تحقیق‌های صورت گرفته پیدا کردن بهترین نحوه توزیع نقاط نمونه روی سطح می‌باشد. این توزیع باید به‌نحوی باشد که هندسه جایگزین ایجاد شده از این نقاط تا حد ممکن به مدل CAD نزدیک باشد. بیشتر تحقیق‌ها با توجه به ویژگی‌هایی سطح همانند انحنا و اندازه تکه‌سطح-ها، بهترین توزیع نقاط روی سطوح با فرم آزاد را بدست آورده‌اند. اشکالات

فرم آزاد به‌دلیل پیچیدگی بالای این سطوح، توزیع نقاط نمونه باید به‌نحوی باشد که هندسه جایگزین حاصل از برازش این نقاط کمترین انحراف را از مدل CAD داشته باشد. همین امر باعث شد پژوهشگران با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی مانند انحنا و اندازه تکه‌سطح<sup>1</sup> سطوح با فرم آزاد، روش‌های جدیدی برای نمونه‌برداری از این سطوح به‌وسیله ماشین اندازه‌گیری مختصات ارائه دهند. این روش‌ها با عنوان استراتژی‌های نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر جهت نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد شناخته می‌شوند که با توجه به ویژگی‌های سطح، نحوه توزیع نقاط را روی سطح به‌دست می‌آورند.

چو و کیم [10] استراتژی نمونه‌برداری بر اساس انحنای متوسط سطح را پیشنهاد دادند. آنها سطح را به زیر بخش‌های (با شبکه منظم) تقسیم و این زیر بخش‌ها را بر اساس انحنای متوسط‌شان رتبه‌بندی کردند سپس، نقاط نمونه در بخش‌هایی که انحنای بیشتری دارند، توزیع شدند. در نهایت روش پیشنهادیشان را با استراتژی‌های نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت مقایسه کردند. نتایج اثر بخشی توزیع نقاط بر اساس انحنا را نشان داد.

پاک و همکاران [11] سه استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت، نمونه‌برداری وابسته به انحنا و نمونه‌برداری ترکیبی را پیشنهاد دادند. استراتژی توزیع یکنواخت نقاط را در وسط شبکه سطح قرار می‌داد، استراتژی نمونه‌برداری وابسته به انحنا از انحنای نرمال<sup>2</sup> استفاده کرده و نقاط را در نواحی با انحنای نرمال بیشتر، موقعیت‌دهی می‌کرد. روش ترکیبی نقاط نمونه را با یک نسبت تعریف شده توسط کاربر بین روش‌های توزیع وابسته به انحنا و یکنواخت، توزیع می‌کرد. نتایج نشان داد، هندسه جایگزین ایجاد شده توسط استراتژی پیشنهادی آنها نسبت به استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت، دقت بالاتری دارد. اینسورد و همکاران [12] سه معیار را جهت نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد پیشنهاد کردند؛ معیار اول: معیار طول وتر که بیشترین انحراف وتر را بین خطی که از اتصال دو نقطه حاصل می‌شود و مدل CAD را تعیین می‌کرد؛ این معیار باعث می‌شد در الگوریتم نمونه‌برداری نواحی که انحنای بیشتری دارند، خطای وتر بیشتری نسبت به مدل CAD ایجاد کنند، بنابراین نقاط بیشتری در این نواحی توزیع می‌شد. معیار دوم: معیار کمترین تعداد نقاط نمونه که بیشترین فاصله مجاز بین دو نقطه که در همسایگی هم هستند را تعیین و نقاط نمونه را بر این اساس توزیع می‌کنند و در نهایت معیار سوم: معیار نمونه‌برداری بر اساس پارامتری کردن<sup>3</sup> است که در این معیار، تعداد نقاط نمونه برداری لازم در هر بخش از سطح، توسط کاربر تعیین می‌گردد.

الکات و همکاران [13] چند استراتژی نمونه‌برداری جدید بر اساس ویژگی‌های سطح ارائه دادند. آنها سطوح با فرم آزاد را با توجه به بردار گرهی به تکه‌سطح‌هایی تقسیم کردند، سپس متوسط انحنای گوسی<sup>4</sup> را برای هر تکه‌سطح به‌دست آوردند. استراتژی نمونه‌برداری اول متناسب با اندازه (مساحت) تکه‌سطح نقاط نمونه را روی سطح توزیع می‌کرد. استراتژی نمونه برداری دوم بر اساس متوسط انحنای گوسی تکه‌سطح، نقاط نمونه را روی سطح توزیع می‌کرد؛ بدین صورت که، ابتدا تکه‌سطح‌ها را بر اساس متوسط انحنای گوسی‌شان رتبه‌بندی کرده سپس تکه‌سطح با رتبه بالاتر، سهم بیشتری از نقاط نمونه را می‌گرفت. استراتژی نمونه‌برداری سوم نیز ترکیبی از دو استراتژی اول بود. آنها استراتژی پیشنهادی خود را با دو استراتژی مرسوم نمونه‌برداری یکنواخت در فضای پارامتریک و کارترین، مقایسه نمودند. شبیه سازی‌ها روی مدل‌ها با پیچیدگی مختلف انجام شد و نتایج نشان داد هر کدام

<sup>5</sup> Dominant point

<sup>6</sup> Form error model (FEM)

<sup>7</sup> Deviation model

<sup>8</sup> Systematic errors

<sup>9</sup> Random error

<sup>10</sup> Product Surface Model (PSM)

<sup>1</sup> Patch size

<sup>2</sup> Normal curvature

<sup>3</sup> Parameterization

<sup>4</sup> Mean gaussian curvature

شود. لازم به ذکر است کلیه برنامه‌ها و مراحل نمونه‌برداری از سطح توسط هر کدام از استراتژی‌های نمونه‌برداری در نرم‌افزار متلب اجرا شده است. در شکل 3 روند کلی نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد در نرم‌افزار متلب، آورده شده است.

### 1-3- استراتژی‌های مرسوم

#### 1-1-3- استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت در فضای کارترین

در این استراتژی، نقاط نمونه‌برداری با فواصل مساوی در جهت محورهای  $x$  و  $y$  توزیع می‌شوند. فاصله بین نقاط نمونه در جهت هر محور وابسته به بزرگی سطح مورد بررسی و تعداد نقاط در جهت آن محور است [5].

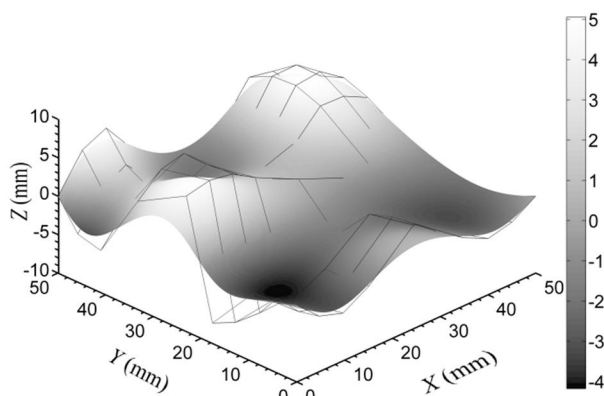


Fig. 2 Sample CAD model with its control polygon (mm)

شکل 2 مدل CAD نمونه به همراه چند ضلعی نقاط کنترلی (میلیمتر)

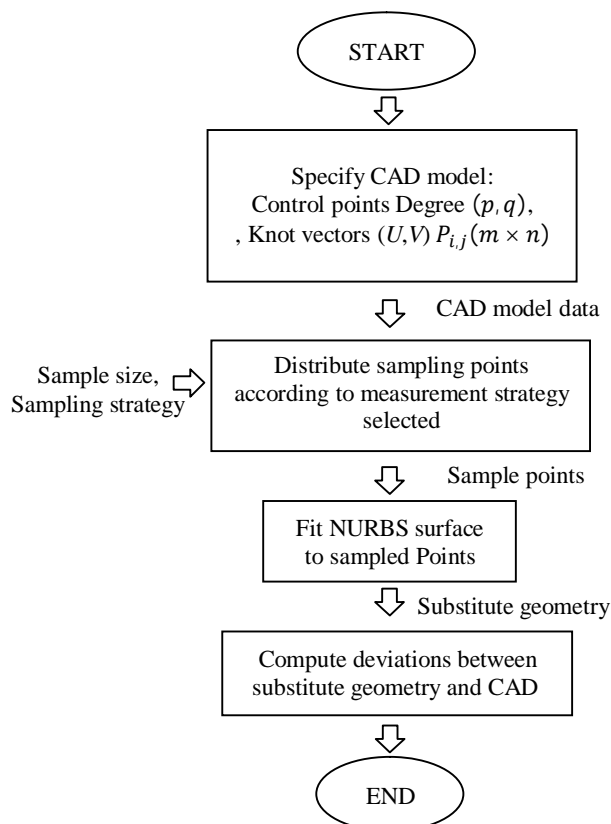


Fig. 3 Main flowchart of sampling strategies

شکل 3 گردش کار اصلی استراتژی‌های نمونه‌برداری

اصلی استراتژی‌های حاضر این است که نه تنها نیازمند محاسبات پیچیده برای به‌دست آوردن چنین ویژگی‌هایی می‌باشند بلکه استراتژی‌های موجود روی سطوح با پیچیدگی‌های مختلف جواب‌های متفاوتی می‌دهند و نمی‌توانند بهینه‌ترین توزیع نقاط را برای یک سطح خاص به‌دست آورند. از این رو در تحقیق حاضر، با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز توده ذرات بهترین توزیع نقاط نمونه روی سطوح با فرم آزاد، استخراج شده است؛ همچنین، استراتژی پیشنهادی با استراتژی‌های نمونه‌برداری توزیع یکنواخت در فضای پارامتریک و توزیع یکنواخت در فضای کارترین مقایسه گردید.

### 2- رویه نریز

رویه‌های نریز<sup>1</sup> به علت پشتیبانی توسط اکثر سیستم‌های CAD/CAM و استانداردهای تبادل اطلاعات (IGES, STEP) به عنوان هندسه مدل‌سازی اصلی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [18]. در رابطه (1) معادله رویه نریز نمایش داده شده است. رویه نریز با استفاده از  $(n+1) \times (m+1)$  نقطه کنترلی تعریف می‌شود. رویه نریز با درجات  $(k, l)$  در فضای پارامتریک  $(u, v)$  تعریف می‌شود.

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

$$0 \leq u \leq u_{\max}, 0 \leq v \leq v_{\max}$$

$$U = \{0, \dots, 0, u_{k+1}, \dots, u_{r-k-1}, 1, \dots, 1\}$$

$$V = \{0, \dots, 0, v_{l+1}, \dots, v_{s-l-1}, 1, \dots, 1\}$$
(1)

در رابطه (1) نقاط کنترلی هستند که شبکه کنترلی دو سویه را شکل می‌دهند، وزن‌ها  $w_{i,j}$  و  $N_{i,k}(u)$  و  $N_{j,l}(v)$  توابع پایه بی‌اسپلاین تعریف شده در بردارهای گره‌ای به ترتیب در جهات  $U$  و  $V$  می‌باشند. مقدار  $N_{i,k}(u)$  توسط روابط بازگشتی (2) تعیین می‌شود.

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

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

برای مدل‌سازی سطح از نرم افزار متلب<sup>2</sup> استفاده شد. بدین صورت که ابتدا سطح با فرم آزاد مورد نظر (مدل CAD) در محیط شکل<sup>3</sup> نرم افزار کتیا<sup>4</sup> طراحی و با فرمت IGES ذخیره گردید؛ سپس نقاط کنترلی و بردارهای گره‌ای سطح از فایل IGES استخراج شد. در مرحله بعد به کمک کد نوشته شده رویه نریز در محیط M-file نرم‌افزار متلب و نقاط کنترلی و بردارهای گره‌ای، مدل CAD در نرم‌افزار متلب دوباره بازسازی گردید.

در شکل 2 سطح نریز نمونه تعریف شده به همراه چند ضلعی نقاط کنترلی، در نرم افزار متلب نمایش داده شده است.

داده‌های استفاده شده برای طراحی سطح نمونه:

درجه سطح  $(k, l)$ : 5 و 5

تعداد نقاط کنترلی  $((n+1) \times (m+1))$ :  $9 \times 9$

### 3- استراتژی‌های نمونه‌برداری

در این بخش ابتدا استراتژی‌های نمونه‌برداری موجود و استراتژی‌های نمونه برداری پیشنهادی تشریح خواهد شد؛ سپس، نمونه‌برداری از مدل تعریف شده در بخش قبل "شکل 2" توسط هر کدام از این استراتژی‌ها انجام می‌-

<sup>1</sup> NURBS surfaces

<sup>2</sup> MATLAB

<sup>3</sup> Shape

<sup>4</sup> CATIA

با داشتن مقادیر  $u$  و  $v$  در فضای پارامتریک متعاقباً موقعیت  $x$  و  $y$  و  $z$  متناظر با این مقادیر با داشتن معادلات سطح از روی مدل CAD به‌دست می‌آید.

$$u_i^* = u_{\min} + (i-1) \frac{u_{\max} - u_{\min}}{(N_u - 1)} ; i = 1, \dots, N_u \quad (5)$$

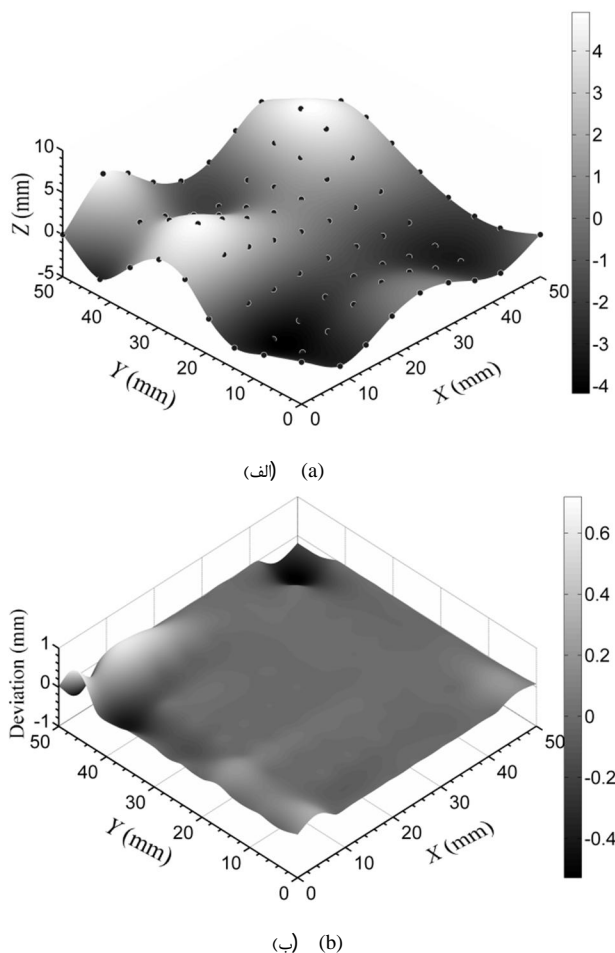
$$v_j^* = v_{\min} + (j-1) \frac{v_{\max} - v_{\min}}{(N_v - 1)} ; j = 1, \dots, N_v \quad (6)$$

در این استراتژی ابتدا 81 نقطه با توزیع یکنواخت در فضای پارامتریک روی مدل CAD توزیع گردید؛ در مرحله بعد به‌روش حداقل مربعات<sup>1</sup> رویه نرئز از روی این نقاط برازش و هندسه جایگزین بازسازی شد. نهایتاً انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD به‌دست آمده است. در شکل 5 نحوه توزیع نقاط نمونه به‌همراه هندسه جایگزین و مدل انحراف نمایش داده شده است.

### 2-3- استراتژی پیشنهادی

#### 2-3-1- الگوریتم توده ذرات (پرندگان)

کندی، روانشناس اجتماعی و ابرهات، مهندس برق، در سال 1995 برای اولین بار بر اساس شبیه‌سازی رفتار پرندگان برای یافتن غذا، الگوریتم قوی برای بهینه‌سازی، به‌نام الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات<sup>2</sup> (PSO) معرفی کردند [19].



**Fig. 5** a) Substitute geometry with sample points (mm), b) deviation from CAD model in uniform sampling strategy in parametric space (mm)

شکل 5 الف) هندسه جایگزین به‌همراه نقاط نمونه (میلیمتر)، ب) انحراف از مدل CAD در استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت در فضای پارامتریک (میلیمتر)

بنابراین، موقعیت‌های  $(x_i^*, y_i^*)$  مربوط به نقاط نمونه، با استفاده از روابط (3) و (4) محاسبه می‌شود.

با داشتن موقعیت  $x$  و  $y$  مربوط به یک نقطه موقعیت  $z$  متناظر آن از روی مدل CAD به‌دست می‌آید.

$$x_i^* = x_{\min} + (i-1) \frac{x_{\max} - x_{\min}}{(N_u - 1)} ; i = 1, \dots, N_u \quad (3)$$

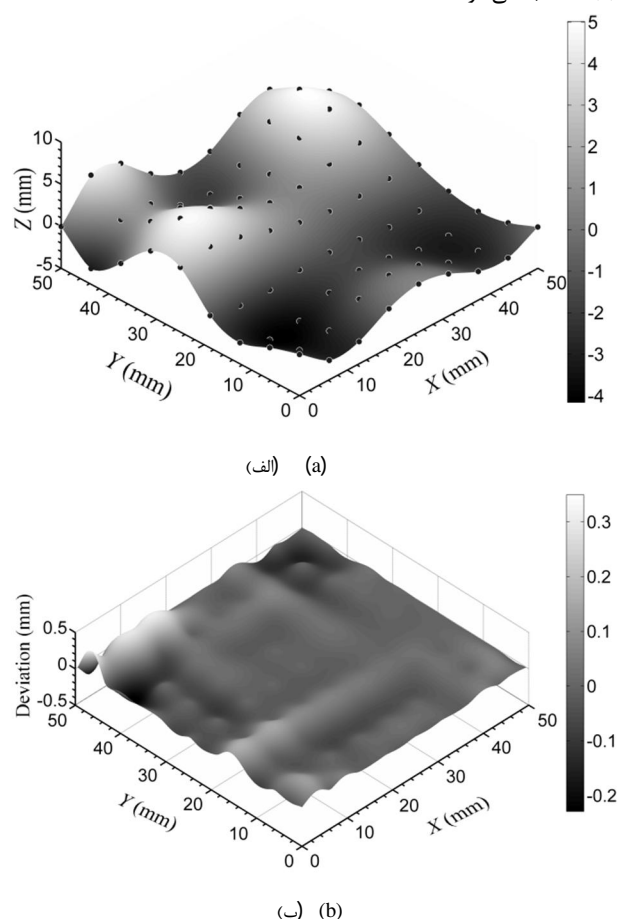
$$y_j^* = y_{\min} + (j-1) \frac{y_{\max} - y_{\min}}{(N_v - 1)} ; j = 1, \dots, N_v \quad (4)$$

در این استراتژی ابتدا 81 نقطه با توزیع یکنواخت در فضای کارترین روی مدل CAD توزیع گردید؛ در مرحله بعد به‌روش حداقل مربعات<sup>1</sup> رویه نرئز از روی این نقاط برازش و هندسه جایگزین بازسازی شد. نهایتاً انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD به‌دست آمده است. در شکل 4 نحوه توزیع نقاط نمونه به‌همراه هندسه جایگزین و مدل انحراف نمایش داده شده است.

### 2-3-1- استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت در فضای پارامتریک

در این استراتژی، نقاط نمونه‌برداری با فواصل مساوی در جهات پارامتریک  $u$  و  $v$  توزیع می‌شوند. فاصله بین نقاط در امتداد هر جهت پارامتریک وابسته به بازه پارامتر و تعداد نقاط در آن جهت است [5].

بنابراین، مقادیر  $(u_i^*, v_i^*)$  متناظر با نقاط نمونه، با استفاده از روابط (5) و (6) محاسبه می‌شود.



**Fig. 4** a) Substitute geometry with sample points (mm), b) deviation from CAD model in uniform sampling strategy in Cartesian space (mm)

شکل 4 الف) هندسه جایگزین به‌همراه نقاط نمونه (میلیمتر)، ب) انحراف از مدل CAD در استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت در فضای کارترین (میلیمتر)

<sup>2</sup> particle swarm optimization algorithm

<sup>1</sup> Least square method

از رابطه (7) می‌توان نتیجه گرفت که هر ذره به هنگام حرکت 3 پارامتر اساسی زیر را در نظر می‌گیرد:

- 1- جهت حرکت قبلی خود
  - 2- بهترین موقعیتی را که در آن قرار داشته است
  - 3- بهترین موقعیتی را که توسط کل جمع تجربه شده است
- در شکل 6 گردش کار الگوریتم توده ذرات نمایش داده شده است.

**3-2-2- استراتژی نمونه‌برداری با استفاده از الگوریتم توده ذرات**  
موقعیت نقاط نمونه، تأثیر مستقیم به‌روی دقت سطح بازسازی شده (هندسه جایگزین) دارد و از آنجاییکه هندسه جایگزین باید تا حد امکان به سطحی که قرار است توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات پراب شود، نزدیک باشد، بنابراین موقعیت نقاط نمونه روی سطح باید به‌نحوی باشد که انحراف هندسه جایگزین از مدل واقعی را کمینه کند؛ از این رو در اجرای الگوریتم‌های نمونه‌برداری هندسه جایگزین باید انحراف کمتری نسبت به مدل CAD داشته باشد. در این پژوهش الگوریتم بهینه‌ساز توده ذرات جهت به‌دست آوردن بهترین موقعیت و توزیع نقاط نمونه به‌روی سطح، به کار گرفته شده است. همچنین این الگوریتم با توابع بازسازی سطح، نمونه‌برداری و برازش

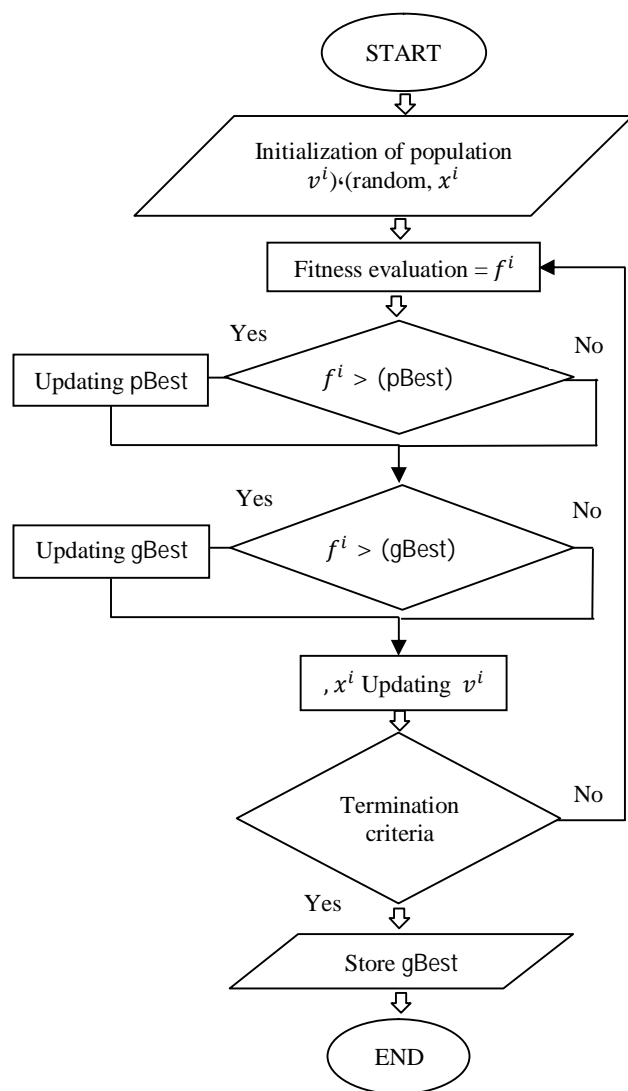


Fig. 6 Flowchart of particle swarm algorithm [20]

شکل 6 گردش کار الگوریتم توده ذرات [20]

در الگوریتم PSO، تعدادی از موجودات وجود دارند، که ذره نامیده می‌شوند و در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه‌کردن (کمینه یا بیشینه کردن) مقدار آن را دارند، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا به جواب بهینه همگرا شوند. در واقع گروه ذرات که کمینه یک تابع را جستجو می‌کنند، مانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند.

هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار  $d$  بعدی تشکیل شده است؛  $d$ ، بعد فضای جستجو می‌باشد. برای ذره  $i$  ام این سه بردار عبارتند از:  $x^i$  موقعیت فعلی ذره،  $v^i$  سرعت حرکت ذره و  $x^{i,best}$  بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده است.  $x^{i,best}$  مجموعه‌ای از مختصات است که موقعیت فعلی ذره را نمایش می‌دهد. در هر مرحله‌ای که الگوریتم تکرار می‌شود،  $x^i$  به‌عنوان یک جواب برای مسئله محاسبه می‌شود. اگر این موقعیت بهتر از جواب‌های قبلی باشد، در  $x^{i,best}$  ذخیره می‌شود.  $f^i$  مقدار تابع هدف در  $x^i$  و  $f^{i,best}$  مقدار تابع هدف در  $x^{i,best}$  است که هر دو از عناصر تشکیل‌دهنده هر ذره به حساب می‌آیند. ذخیره کردن مقدار  $f^{i,best}$  برای انجام مقایسه‌های بعدی، ضروری است. اما ذخیره کردن مقدار  $f^i$  ضروری نمی‌باشد. در هر تکرار  $x^i$  و  $v^i$  جدیدی به دست می‌آید و هدف از اجرای الگوریتم، بهتر کردن  $x^{i,best}$  و احتمالاً  $x^{i,best}$  است. الگوریتم PSO چیزی فراتر از یک مجموعه ذرات است. هیچ کدام از ذرات قدرت حل هیچ مسئله‌ای را ندارند، بلکه حل مساله در قالب ارتباط و تعامل ذرات با همدیگر شکل می‌گیرد. در واقع برای گروه ذرات، حل مسئله، یک مفهوم جمعی است که از رفتار تک‌تک ذرات و تعامل میان آن‌ها بوجود می‌آید. بهترین موقعیتی که توسط همه ذرات پیدا شده است، به‌صورت  $x^{g,best}$  نشان داده می‌شود که با مقایسه مقادیر  $f^{i,best}$  به‌ازای همه ذرات و از میان  $x^{i,best}$  ها انتخاب می‌شود. مقدار تابع در  $x^{g,best}$ ، به‌صورت  $f^{g,best}$  نشان داده می‌شود. در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله  $k+1$  ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. اگر منظور از  $x_j$  مولفه‌ی  $j$  ام از بردار  $x$  باشد، آن‌گاه توسط رابطه بازگشتی (7) سرعت و توسط رابطه (8) موقعیت ذرات به‌هنگام می‌شود [20].

$$v_j^i[k+1] = wv_j^i[k] + c_1r_1(x_j^{i,best}[k] - x_j^i[k]) + c_2r_2(x_j^{g,best}[k] - x_j^i[k])x_j^i[k+1] \quad (7)$$

$$x_j^i[k+1] = x_j^i[k] + v_j^i[k+1] \quad (8)$$

در روابط فوق،  $w$  ضریب اینرسی،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی در بازه‌ی  $[0,1]$  با توزیع یکنواخت است. همچنین  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب یادگیری هستند.  $r_1$  و  $r_2$  باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در جواب‌ها به‌وجود بیاید و به نوعی جستجوی کامل‌تری روی فضا انجام پذیرد.  $c_1$  ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل  $c_2$  ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد.

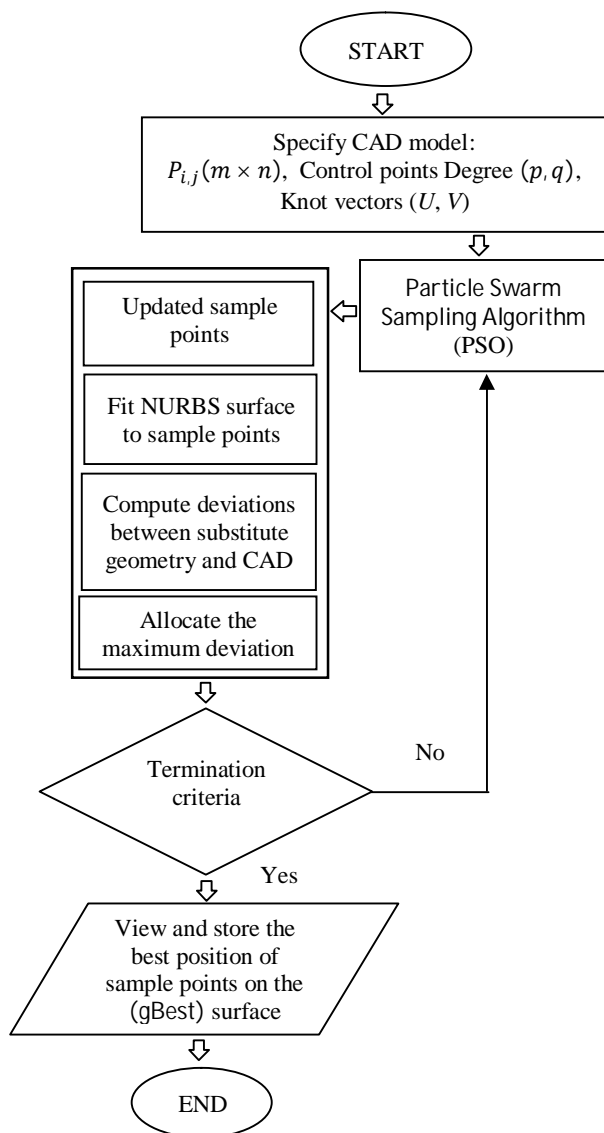


Fig. 7 Flowchart of sampling strategy by particle swarm algorithm

شکل 7 گردش کار استراتژی نمونه‌برداری با استفاده از الگوریتم توده ذرات

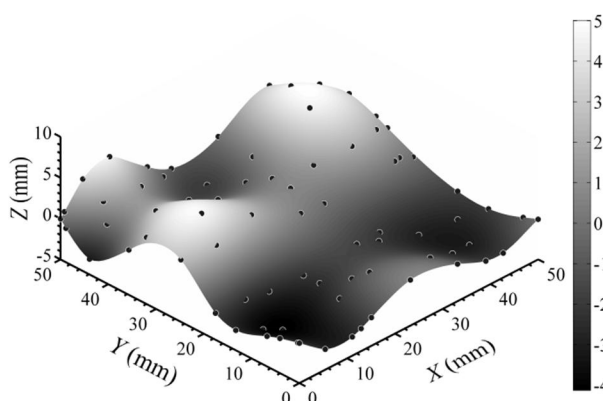


Fig. 8 Substitute geometry with sample points in sampling strategy by particle swarm algorithm (mm)

شکل 8 هندسه جایگزین به‌همراه نقاط نمونه در استراتژی نمونه‌برداری با استفاده از الگوریتم توده ذرات (میلیمتر)

سطح یکپارچه گردیده است. کمینه کردن بیشینه انحراف بین سطح بازسازی شده از نقاط نمونه (هندسه جایگزین) و مدل CAD، به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است فرآیند نمونه‌برداری، برازش سطح و محاسبه بیشینه انحراف بین هندسه جایگزین و مدل CAD، در هر تکرار الگوریتم بهینه‌ساز شبیه‌سازی و اجرا می‌شود.

در استراتژی پیشنهادی موقعیت‌های  $(x, y, z)$  نقاطی که قرار است روی سطح توزیع شوند، به‌عنوان پاسخ مساله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. بنابراین، نقاط نمونه (81 نقطه) به‌عنوان مجموعه ذرات در نظر گرفته شد. همچنین، انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD به‌عنوان تابع هدف، تعریف شده است. هدف کمینه کردن بیشینه انحراف هندسی بین دو مدل می‌باشد، بنابراین الگوریتم بهینه‌ساز باید به‌دنبال توزیعی باشد که این انحراف را کمینه کند؛ در همین راستا ابتدا نقاط (ذرات) به‌شکل تصادفی در فضای جستجو توزیع شده سپس موقعیت آنها با توجه به بهترین موقعیت ذره و بهترین موقعیت مجموع ذرات، آنقدر تغییر می‌کند تا شرایط توقف برقرار شود. در شکل 7 گردش کار الگوریتم نمونه‌برداری با استفاده از توده ذرات نمایش داده شده است.

پارامترهای استفاده شده در الگوریتم نمونه‌برداری با استفاده از توده

ذرات:

تعداد ذرات: 81 (برابر تعداد نقاط نمونه)

جمعیت: 25

تعداد تکرار: 3000

ضریب اینرسی  $(w)$ : 0.5-0

ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره  $(c_1)$ : 2

ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع  $(c_2)$ : 2

قابلیت رسیدن به بهینه کلی خوب در تکرارهایی اول و همگرایی سریع الگوریتم یک مزیت برای الگوریتم توده ذرات محسوب می‌شود، این در حالی است که در تکرارهای نهایی برای رسیدن به دقت‌های بالاتر بهتر است الگوریتم قابلیت جستجوی محلی قوی‌تری را دارا باشد؛ بنابراین برای جلوگیری از نوسان ذرات در نزدیکی بهینه کلی، در این پژوهش مقدار  $w$  به‌شکل خطی با تکرار کاهش می‌یابد. مقدار  $w$  در هر تکرار از رابطه بازگشتی (9) بدست می‌آید.

$$w = w_1 - \frac{\text{iter} - 1}{\text{Miter} - 1} (w_1 - w_2) \quad (9)$$

در "رابطه بازگشتی (9)" iter عدد تکرار جاری و Miter عدد بیشینه تکرار مجاز اجرای الگوریتم می‌باشد؛  $w_1$  و  $w_2$  به‌ترتیب مقادیر اولیه و نهایی ضریب اینرسی می‌باشد.

فرآیند نمونه‌برداری از سطح نمونه تعریف شده در بخش 2 با پارامترهای تعریف شده در این بخش اجرا گردید. شکل 8 هندسه جایگزین حاصل از برازش نقاط نمونه‌برداری (81 نقطه) و نحوه توزیع نقاط نمونه‌برداری روی سطح با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز توده ذرات، نمایش داده شده است. نکته قابل توجه در "شکل 8" این است که نقاط نمونه (ذرات) با استفاده از هوش جمعی، نواحی بحرانی همانند نواحی با انحنای زیاد و لبه‌های شکل را پیدا می‌کنند. در شکل 9 انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD، نمایش داده شده است. همانطور که در "شکل 9" مشاهده می‌شود، در استراتژی نمونه‌برداری پیشنهادی میزان انحراف تا حدود سه برابر نسبت به استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت کاهش یافته است. در شکل 10 مقادیر تابع هدف برای 3000 تکرار، با استفاده از الگوریتم توده ذرات نمایش داده شده است.

پارامتریک و استراتژی پیشنهادی، با تعداد نقاط نمونه مختلف اجرا گردید. جدول 1 نتایج مقایسه انحراف به دست آمده حاصل از اجرای استراتژی‌های نمونه‌برداری یکنواخت و پیشنهادی با تعداد نقاط مختلف را، نمایش می‌دهد. شکل 13 نمودار مربوط به نتایج به دست آمده در "جدول 1" را نمایش می‌دهد.

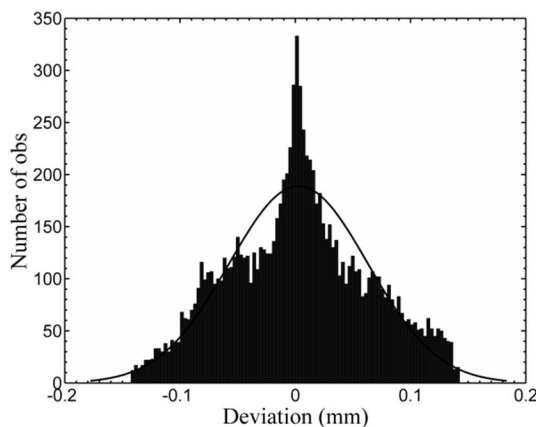


Fig. 11 Geometric deviations probability distribution obtained from the proposed sampling strategy

شکل 11 توزیع احتمال انحراف هندسی حاصل از استراتژی نمونه‌برداری پیشنهادی

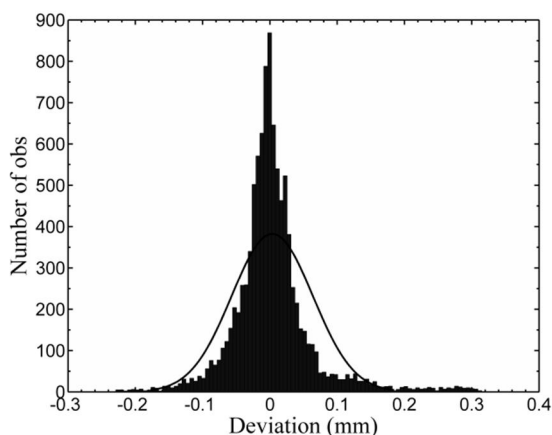


Fig. 12 Geometric deviations probability distribution obtained from sampling strategy with uniform distribution in Cartesian space

شکل 12 توزیع احتمال انحراف هندسی حاصل از استراتژی نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت در فضای کارترین

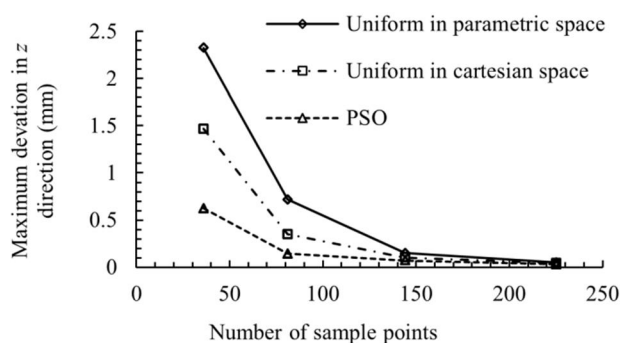


Fig. 13 Influence of the number of sample points on maximum deviation in sampling strategies

شکل 13 تأثیر تعداد نقاط نمونه روی انحراف بیشینه در استراتژی‌های نمونه‌برداری

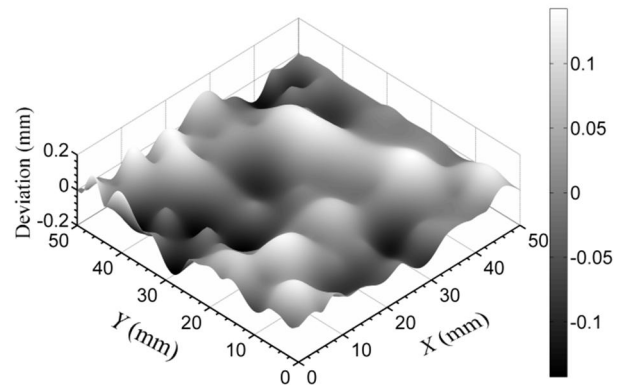


Fig. 9 Substitute geometry deviation from CAD model in sampling strategy by particle swarm algorithm (mm)

شکل 9 انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD در استراتژی نمونه‌برداری با استفاده از الگوریتم توده ذرات (میلیمتر)

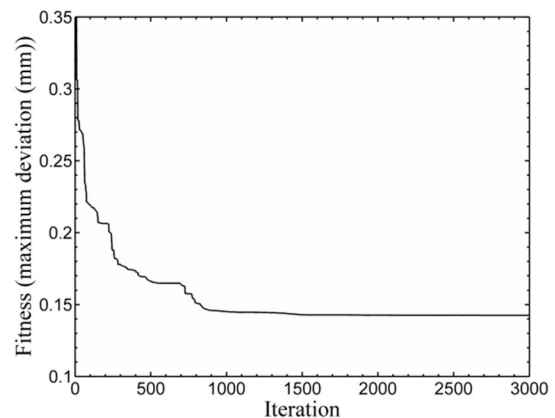


Fig. 10 Optimizing processes by particle swarm algorithm

شکل 10 فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم توده ذرات

#### 4- تحلیل نتایج

چنان که از انحرافات هندسی مربوط به هر یک از استراتژی‌های مرسوم و پیشنهادی پیداست، استراتژی پیشنهادی از دقت بالاتری جهت نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد برخوردار است. در شکل 11 توزیع احتمال انحراف هندسی حاصل از استراتژی نمونه‌برداری توده ذرات و شکل 12 توزیع احتمال انحراف حاصل از استراتژی نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت در فضای کارترین نمایش داده شده است. آنچنانکه در "شکل 11" و "شکل 12" نشان داده شده است، استراتژی نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت نقاط در فضای کارترین، پراکندگی بیشتری نسبت به استراتژی پیشنهادی دارد. همچنین، در استراتژی نمونه‌برداری یکنواخت، انحراف هندسی در برخی نواحی از سطح تمرکز دارد و این بدین معناست که الگوریتم‌های موجود جهت توزیع نقاط نمونه پیچیدگی سطح را در این نواحی در نظر نمی‌گیرند؛ برای رفع چنین عیبی در این استراتژی‌ها، باید تعداد نقاط نمونه به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. این در حالی است که استراتژی پیشنهادی با تعداد نقاط نمونه برابر، دقت بالاتری دارد و انحراف هندسی بین دو مدل را به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

در ادامه شبیه‌سازی با تعداد نقاط مختلف روی سطح نمونه، انجام شد. در این شبیه‌سازی سه استراتژی توزیع یکنواخت در فضای کارترین و



جدول 1 مقایسه بین استراتژی نمونه‌برداری پیشنهادی و استراتژی‌های نمونه‌برداری یکنواخت با تعداد نقاط مختلف

Table 1 Comparison between the proposed strategy and uniform sampling strategies with different sample size

استراتژی نمونه‌برداری پیشنهادی		استراتژی‌های نمونه‌برداری یکنواخت		تعداد نقاط نمونه	
توزیع یا استفاده از الگوریتم توده ذرات (PSO)	انحراف بیشینه (mm)	توزیع یکنواخت در فضای کارترین	انحراف بیشینه (mm)	توزیع یکنواخت در فضای پارامتریک	انحراف بیشینه (mm)
زمان (ثانیه)		زمان (ثانیه)		زمان (ثانیه)	
2035	0.6234	561	1.4667	612	2.3249
2147	0.1425	470	0.3496	502	0.7188
2355	0.07269	382	0.1026	395	0.1497
2562	0.03125	529	0.04467	541	0.05146
					225

part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty, *Computer-Aided Design*, Vol. 43, No. 4, pp. 345-355, 2011.

- [3] E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt, Metrology of freeform shaped parts, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 2, pp. 810-835, 2007.
- [4] R. J. Hocken, P. H. Pereira, *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Second Edition, pp. 81-92, New York: Taylor & Francis Group, 2013.
- [5] G. Moroni, S. Petrò, Coordinate Measuring Machine Measurement Planning, in *Geometric Tolerances*, Springer London, pp. 111-158, 2011.
- [6] C. E. Shannon, Communication in the presence of noise Proc, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Xplore Digital Library*, Vol. 37, No. 1, pp. 10-21, 1949.
- [7] J. M. Hammersley, D. Handscomb, Monte Carlo methods, Wiley, pp. 25-42, 1964.
- [8] T. C. Woo, R. Liang, C. C. Hsieh, N. K. Lee, Efficient Sampling for Surface Measurement, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 5, pp. 345-354, 1995.
- [9] W. S. Kim, S. Raman, On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, No. 3, pp. 427-443, 2000.
- [10] M. Cho, K. Kim, New inspection planning strategy for sculptured surfaces using coordinate measuring machine, *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 427-444, 1995.
- [11] H. Pahk, M. Jung, S. Hwang, Y. Kim, Y. Hong, S. Kim, Integrated precision inspection system for manufacturing of moulds having CAD defined features, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 198-207, 1995.
- [12] I. Ainsworth, M. Ristic, D. Brujic, CAD-Based Measurement Path Planning for Free-Form Shapes Using Contact Probes, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 23-31, 2000.
- [13] D. F. Elkott, H. A. Elmaraghy, W. H. Waguhi, Automatic sampling for CMM inspection planning of free-form surfaces, *International Journal of Production Research*, Vol. 40, No. 11, pp. 2653-2676, 2002.
- [14] S. M. Obeidat, S. Raman, An intelligent sampling method for inspecting free-form surfaces, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 11, pp. 1125-1136, 2009.
- [15] G. Rajamohan, M. S. Shunmugam, G. L. Samuel, Practical measurement strategies for verification of freeform surfaces using coordinate measuring machines, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 18, No. 2, pp. 209-222, 2011.
- [16] M. Yu, Y. Zhang, Y. Li, D. Zhang, Adaptive sampling method for inspection planning on CMM for free-form surfaces, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 19, pp. 1967-1975, 2012.
- [17] M. Poniatowska, Deviation model based method of planning accuracy inspection of free-form surfaces using CMMs, *Measurement*, Vol. 45, No. 5, pp. 927-937, 2012.
- [18] L. Piegl, W. Tiller, *The NURBS Book*, Second Edition, pp. 117-138, Florida, America: Springer, 1997.

## 5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر تعداد و نحوه توزیع نقاط نمونه در فرآیند نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد، مورد بررسی قرار گرفت. با شبیه‌سازی استراتژی نمونه‌برداری به‌عنوان یکی از عوامل مهم تأثیرگذار روی دقت هندسه جایگزین و همچنین با تحلیل داده‌های آماری به‌دست آمده از اعمال استراتژی‌های نمونه‌برداری، ثابت شد استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز توده ذرات به‌عنوان یک استراتژی نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر اثربخشی بالاتری نسبت به روش‌های مرسوم دارد و بسته به تعداد نقاط نمونه، تا حدود سه برابر (در تعداد نقاط نمونه کمتر) انحراف هندسی را کاهش می‌دهد.

در حقیقت در استراتژی نمونه‌برداری با استفاده از توده ذرات، ذرات (نقاط نمونه) با استفاده از هوش جمعی و تجارب شخصی به‌شکلی روی سطح توزیع می‌شوند که انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD را کمینه کنند و این قابلیت روش توده ذرات، همان انتظاری است که از استراتژی‌های تطبیق‌پذیر داریم.

همچنین همانطور که در "شکل 13" نمایش داده شد، افزایش تعداد نقاط نمونه روی سطح، تا محدوده مشخصی باعث کاهش بیشینه انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD می‌شود و بعد از این محدوده به‌دلیل تراکم زیاد نقاط روی سطح تغییر چندانی در نتایج مشاهده نمی‌شود و انحراف به دست آمده از الگوریتم‌های نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت و الگوریتم پیشنهادی به هم نزدیک می‌شوند.

در مجموع مزایای استراتژی نمونه‌برداری با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز توده ذرات، عبارتست از:

1. عدم نیاز به محاسبات پیچیده برای تعیین موقعیت نقاط نمونه
2. قابلیت تطبیق با هر سطح با هر نوع پیچیدگی
3. قابلیت پیدا کردن نواحی از سطح که احتمال ایجاد خطای بیشتری روی هندسه جایگزین دارند با استفاده از هوش جمعی
4. کمینه کردن انحراف بین هندسه جایگزین و مدل CAD، دو تا سه برابر (بسته به تعداد نقاط نمونه) بیشتر از روش‌های مرسوم.
5. استراتژی پیشنهادی می‌تواند در ایجاد مدل واقعی قطعه ماشین‌کاری شده در قطعاتی که تیراژ تولید بالایی دارند استفاده شود؛ در این قطعات یک بار می‌توان الگوریتم نمونه‌برداری توده ذرات را روی مدل پیاده‌سازی نمود سپس از توزیع به‌دست آمده هر زمان که نیاز باشد می‌توان جهت بازرسی قطعات مشابه و رسیدن به مدل خطای ماشین‌کاری استفاده نمود.

## 6- مراجع

- [1] T. Varady, R. R. Martin, J. Cox, Reverse engineering of geometric models an introduction, *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 255-268, 1997.
- [2] M. Mahmud, D. Joannic, M. Roy, A. Isheil, J.-F. Fontaine, 3D

- [20] E. G. Talbi, *Metaheuristics*, First Edition, pp. 240-254, New Jersey: Wiley, 2009.
- [19] J. Kennedy, R. C. Eberhart, Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia: The Institute of Electrical and Electronics Engineers journals, pp. 1942-1948, 1995.