

# بررسی شیوه اندازه‌گیری سطوح پیچیده با ماشین اندازه‌گیری مختصات

جواد زحمتی<sup>۱</sup>، حسین امیرآبادی<sup>۲</sup>، محمد خوران<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، zahmati.javad@gmail.com

۲ عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳ عضو هیئت علمی مجتمع آموزش عالی اسفراین، اسفراین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۶

## چکیده

امروزه قطعات دارای سطوح با فرم آزاد در صنایعی چون هوافضا، خودروسازی، قالب‌سازی، پزشکی و جز این‌ها کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند. معمولاً بازرسی این قطعات به دو روش تماسی و غیرتماسی انجام می‌شود. با وجود پیشرفت‌های زیاد روش‌های غیرتماسی، روش‌های تماسی هنوز هم جایگاه ویژه‌ای در فرایند تولید داشته و عملیات بازرسی را با دقت بالاتری نسبت به روش‌های غیرتماسی انجام می‌دهند. در روش تماسی، بازرسی سطوح به وسیله ماشین اندازه‌گیری مختصات دارای پراب تماسی به شکل نقطه به نقطه انجام می‌شود. در مرحله بعد، از این نقاط جهت بازسازی هندسه جایگزین استفاده می‌شود. دو عامل تعداد و نحوه توزیع نقاط اندازه‌گیری روی سطوح با فرم آزاد، تأثیر مستقیمی بر دقت سطح بازسازی شده دارند. تاکنون روش‌های زیادی در زمینه چگونگی توزیع نقاط نمونه روی سطوح با فرم آزاد ارائه شده است. بیشتر این روش‌ها در مناطق با انحنای بیشتر، توزیع نقاطی بالاتری دارند. در این مقاله، اصول روش‌های نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد (برنامه‌ریزی بازرسی)، بررسی و چالش‌ها و عملکرد آنها تشریح و موقعیت به‌کارگیری هر یک از روش‌ها معرفی شده است.

**واژگان کلیدی:** سطوح با فرم آزاد، بازرسی، روش‌های نمونه‌برداری، ماشین اندازه‌گیری مختصات، پراب تماسی

## ۱. مقدمه

بازرسی در فرایند تولید نمایش داده شده است [۱]. در صنعت برای بازرسی سطوح با فرم آزاد از روش‌های متفاوتی استفاده می‌شود. تمامی این روش‌ها را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته تقسیم‌بندی کرد: بازرسی با استفاده از روش‌های تماسی<sup>۴</sup> و غیرتماسی<sup>۵</sup> [۲]. ابزارهای غیرتماسی از واسطه‌هایی چون نور، صدا و میدان مغناطیسی برای اندازه‌گیری استفاده می‌کنند، که از انواع روش‌های نوری می‌توان فتوگرامتری<sup>۶</sup>، نور ساختاریافته<sup>۷</sup> و

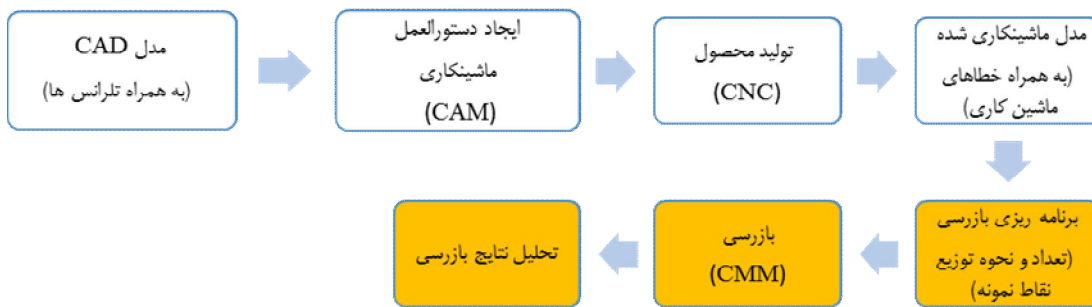
سطوح با فرم آزاد<sup>۱</sup> به‌شکل وسیعی در کاربردهای مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های بسیاری همچون ماشینکاری کنترل عددی کامپیوتری پنج‌محور<sup>۲</sup> برای تولید این سطوح به‌کار می‌روند. کیفیت سطوح با فرم آزاد به‌شکل قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد. برای مقایسه سطح تولیدشده با نیازهای طراحی، بازرسی<sup>۳</sup> محصول الزامی می‌باشد. در شکل ۱ روند تولید یک قطعه صنعتی و جایگاه

تداخل سنجی<sup>۸</sup> یاد کرد [۲]. با اینحال این تکنیک‌ها در بازرسی قطعات مکانیکی با هدف تشخیص خصوصیات هندسی و ابعادی کمتر استفاده می‌شوند. دلائل این امر عبارت‌اند از [۳]:

۱. این تکنیک‌ها در کاربردهای متروژیک دقت پایین‌تری نسبت به روش‌های کلاسیک با پراب تماسی دارند
۲. روش مناسب یا ابزارهای کمکی جهت رقمی کردن قطعات مکانیکی پیچیده به وسیله روش‌های غیرتماسی وجود ندارد
- در روش‌های تماسی، نوعاً از ماشین‌های اندازه‌گیری مختصات<sup>۹</sup>، با پراب‌های تماسی<sup>۱۰</sup> استفاده می‌شود که با وجود قیمت بالای آنها به‌عنوان دقیق‌ترین وسیله اندازه‌گیری ابعاد

مکانیکی در صنعت و آزمایشگاه‌های اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۲ مراحل بازرسی یک قطعه صنعتی با ماشین CMM نمایش داده شده است [۴]. این مراحل برای ایجاد مدل سطح تولیدشده<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود که معمولاً در سه مرحله انجام می‌شود [۴]:

۱. جمع‌آوری نقاط اندازه‌گیری از روی سطح تولیدشده
۲. انتقال نقاط اندازه‌گیری از سیستم مختصات اندازه‌گیری به سیستم مختصات طراحی (موقعیت‌دهی<sup>۱۲</sup>)
۳. بازسازی مدل سطح تولیدشده از نقاط اندازه‌گیری موقعیت‌دهی شده با برازش سطح (عموماً نریز)



شکل ۱. جایگاه بازرسی در فرایند تولید [۱]

بی اسپیلاین تعریف شده در بردارهای گره‌ای به ترتیب در جهات  $U$  و  $V$  می‌باشند. مقدار  $N_{i,k}(u)$  توسط روابط بازگشتی تعیین می‌شود. در شکل ۳. یک رویه نریز به همراه شبکه نقاط کنترلی نمایش داده شده است.

$$N_{i,k}(u) = (u - u_i) \frac{N_{i,k-1}(u)}{u_{i+k-1} - u_i} + \dots + \dots + (u_{i+k} - u) \frac{N_{i+1,k-1}(u)}{u_{i+k-1} - u_i} \quad (2)$$

$$N_{i,1} = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & o.w \end{cases}$$

### ۳. تحقیق و روش‌های نمونه‌برداری<sup>۱۴</sup>

ماشین‌های اندازه‌گیری مختصات، قطعه‌کار را نقطه به نقطه اندازه‌گیری می‌کنند، به همین دلیل بازدهی نسبتاً پایین‌تری در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری نوری دارند. این عیب کاربرد CMM را در بازرسی قطعات پیچیده دارای سطوح با فرم آزاد که نیاز به سرعت اندازه‌گیری بالایی دارند محدود می‌کند. بنابراین نحوه توزیع و تعداد نقاط نمونه‌برداری روی سطوح با

### ۲. سطح نریز<sup>۱۳</sup>

سطوح نریز به علت پشتیبانی توسط سیستم‌های CAD/CAM و استانداردهای تبادل اطلاعات (IGES, STEP) به‌عنوان هندسه اصلی، در مدلسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. رویه نریز با استفاده از  $(n+1)*(m+1)$  نقطه کنترلی تعریف و در رابطه ۱ این نقاط با  $P_{i,j}$  نمایش داده می‌شود. رویه نریز با درجات  $(k, l)$  در فضای پارامتریک  $(u, v)$  تعریف می‌شود. در رابطه ۱ معادله رویه نریز نمایش داده شده است.

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

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

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

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

در رابطه ۱،  $P_{i,j}$  نقاط کنترلی هستند که شبکه کنترلی دوسویه را شکل می‌دهند،  $h_{i,j}$  وزن‌ها و  $N_{i,k}(u)$  و  $N_{j,l}(v)$  توابع پایه

فرم آزاد سال‌هاست مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. توزیع نقاط اندازه‌گیری روی سطح با فرم آزاد به دو دسته تقسیم می‌شوند [۶]:

الف) روش‌های نمونه‌برداری کورکوره<sup>۱۵</sup>: در این روش‌ها توزیع نقاط به پیچیدگی سطح بستگی ندارد. از جمله این روش‌ها، روش‌های نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت<sup>۱۶</sup>، تصادفی<sup>۱۷</sup>، هم‌رسمی<sup>۱۸</sup> را می‌توان نام برد.

ب) روش‌های نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر<sup>۱۹</sup>: روش نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر با توزیع تعداد کمی نقاط نمونه‌برداری روی سطح شروع شده، سپس بسته به اطلاعات حاصل از این نقاط، نقاط نمونه‌برداری بعدی اضافه می‌شود. افزودن نقطه ممکن است تا رسیدن به برخی معیارها (یعنی انحراف هندسی محاسبه‌شده تغییر چندانی نداشته باشد یا کوچک بودن نواحی که نمونه‌برداری نشده و یا رسیدن به اندازه نمونه بیشینه) ادامه داشته باشد. بنابراین نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر تکنیکی است که به پیدا کردن نواحی بحرانی از سطح بازرسی شده با تعداد نمونه کمتر (اگر با استراتژی نمونه‌برداری کورکوره مقایسه شود)، کمک می‌کند.

تاکنون روش‌های زیادی برای نمونه‌برداری از سطح ارائه شده است. شانون<sup>۲۰</sup> و همکاران اولین و ساده‌ترین روش نمونه‌برداری، را که روش نمونه‌برداری یکنواخت<sup>۲۱</sup> است، معرفی کردند [۷]. از این روش به دلیل پیاده‌سازی آسان، به‌عنوان روش نمونه‌برداری پیش‌فرض در بسیاری از ماشین‌های اندازه‌گیری مختصات امروزی استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۶۴ م، تئوری توالی هم‌رسمی<sup>۲۲</sup> مطرح شد [۸]. اولین بار وو<sup>۲۳</sup> و همکاران از این توالی، برای اندازه‌گیری استفاده کردند [۹]. کیم و همکاران با ارائه چهار روش نمونه‌برداری، توزیع نقاط نمونه را روی یک سطح تخت بررسی کردند [۱۰]. آنها از روش‌های نمونه‌برداری با توالی هم‌رسمی، نمونه‌برداری با توالی هالتون - زارمبا<sup>۲۴</sup>، نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت و نمونه‌برداری تصادفی<sup>۲۵</sup> برای توزیع نقاط استفاده کردند. در شکل ۴. نحوه توزیع نقاط روی سطح با استفاده از چهار روش یاد شده نمایش داده شده است. آنها از این روش‌ها با استفاده از پنج اندازه نمونه<sup>۲۶</sup> متفاوت جهت بازرسی یک سطح تخت استفاده کردند. در شکل ۵. تأثیر افزایش تعداد نقاط نمونه روی انحراف سطح بازرسی شده<sup>۲۷</sup> نسبت به سطح تخت نمایش داده

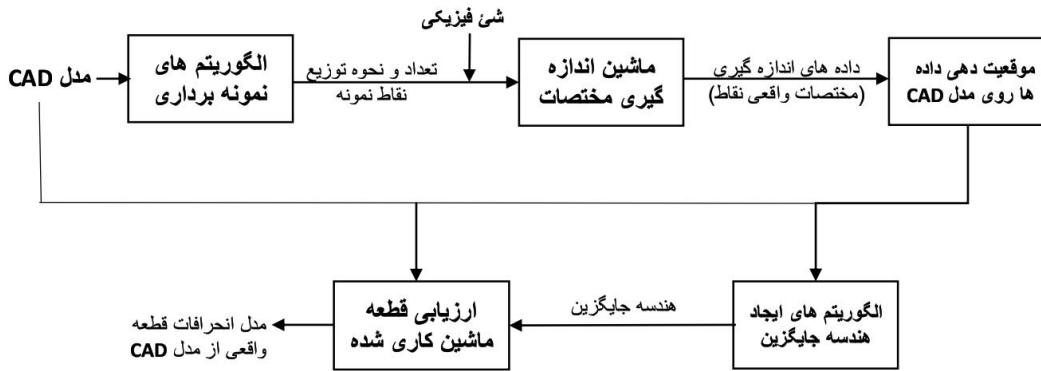
شده است. با توجه به اینکه تعداد نقاط نمونه تأثیر مستقیم روی هزینه، دقت و زمان بازرسی دارد، برای کاهش زمان و هزینه بازرسی بایستی تعداد نقاط نمونه کمینه شود؛ در تمامی روش‌های یاد شده، نمونه‌برداری از سطوح بدون توجه به پیچیدگی سطح انجام می‌شود. این در حالی است که، در بازرسی سطوح با فرم آزاد به دلیل پیچیدگی بالای سطوح، توزیع نقاط باید به نحوی باشد که هندسه جایگزین ایجادشده توسط این نقاط کمترین انحراف را از مدل اصلی قطعه داشته باشد. همین امر باعث شد پژوهشگران با در نظر گرفتن ویژگی‌های مانند انحنا<sup>۲۸</sup> و اندازه تکه سطح‌ها<sup>۲۹</sup> سطوح با فرم آزاد، روش‌های جدیدی برای نمونه‌برداری از این سطوح روی ماشین اندازه‌گیری مختصات ارائه دهند. این روش‌ها با عنوان نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر جهت نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد شناخته می‌شود که با استفاده از الگوریتم‌هایی بهینه‌سازی، تعداد و توزیع نقاط روی سطح را به دست می‌آورند.

چو<sup>۳۰</sup> و کیم یک روش نمونه‌برداری براساس انحنا متوسط سطح را پیشنهاد دادند. آنها سطح را به زیر بخش‌های (با شبکه منظم) تقسیم و این زیربخش‌ها را براساس انحنا متوسطشان رتبه‌بندی کردند [۱۱]. در این روش از فاکتوری که نسبت انتخاب بخش (بین صفر تا ۱) نامیده می‌شود، استفاده می‌شود؛ نقاط نمونه در بخش‌های با نسبت انتخاب بیشتر که انحنا بیشتری نیز دارند توزیع شدند.

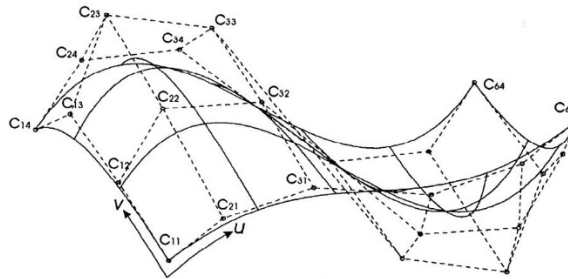
پاک<sup>۳۱</sup> و همکاران سه روش نمونه‌برداری یکنواخت، نمونه‌برداری وابسته به انحنا و نمونه‌برداری ترکیبی را پیشنهاد دادند [۱۲]. روش توزیع یکنواخت، نقاط را در وسط زیر بخش سطح قرار می‌دهد. روش توزیع وابسته به انحنا از انحنا نرمال<sup>۳۲</sup> استفاده کرده و نقاط نمونه را در نواحی با انحنا نرمال بیشتر قرار می‌دهد. روش ترکیبی نقاط نمونه را با یک نسبت تعریف‌شده توسط کاربر بین روش‌های توزیع وابسته به انحنا و یکنواخت، توزیع می‌کند. در شکل ۶ نحوه توزیع نقاط توسط سه الگوریتم و مسیرهای بازرسی سطح نمایش داده شده است. اینسورد<sup>۳۳</sup> و همکاران سه معیار نمونه‌برداری را پیشنهاد کردند [۱۳]: معیار اول طول وتر است که بیشترین انحراف وتر را بین خط حاصل از اتصال دو نقطه و سطح CAD را تعیین می‌کند؛ این معیار باعث می‌شود در الگوریتم نمونه‌برداری نواحی که انحنا بیشتری دارند، خطای وتر بیشتری نسبت به مدل

معیار سوم نمونه‌برداری بر اساس پارامتری کردن<sup>۳۴</sup> است که در این معیار کاربر تعداد نمونه لازم در هر بخش از سطح را تعیین می‌کند. در شکل ۷ نحوه توزیع نقاط روی ایرفویل که با استفاده از معیار اول نمونه‌برداری شده است مشاهده می‌شود.

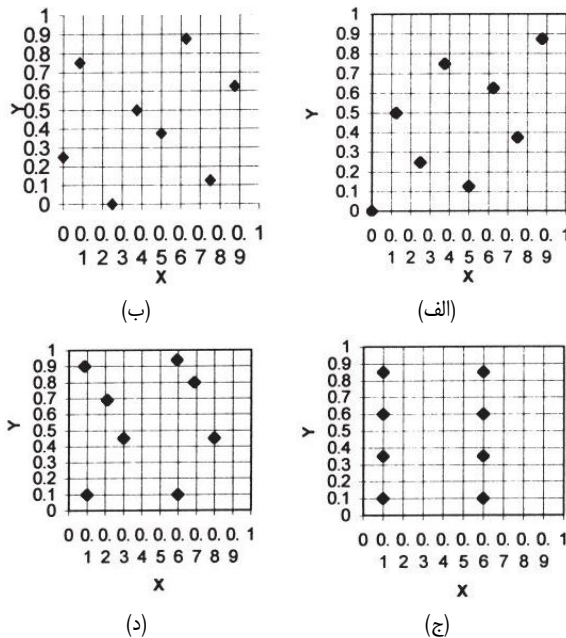
CAD ایجاد کنند، بنابراین نقاط بیشتری در این نواحی توزیع خواهد شد. معیار دوم کمترین تعداد نمونه می‌باشد که بیشترین فاصله مجاز بین دو نقطه که در همسایگی هم هستند، را تعیین کرده و نقاط نمونه را بر این اساس توزیع می‌کند و در نهایت



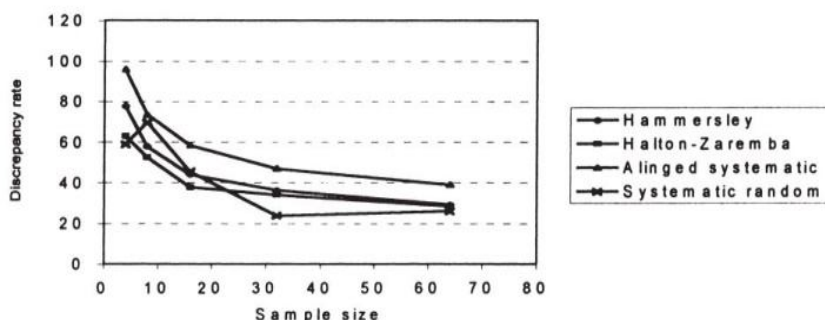
شکل ۲. مراحل بازرسی به وسیله ماشین اندازه گیری مختصات [۴]



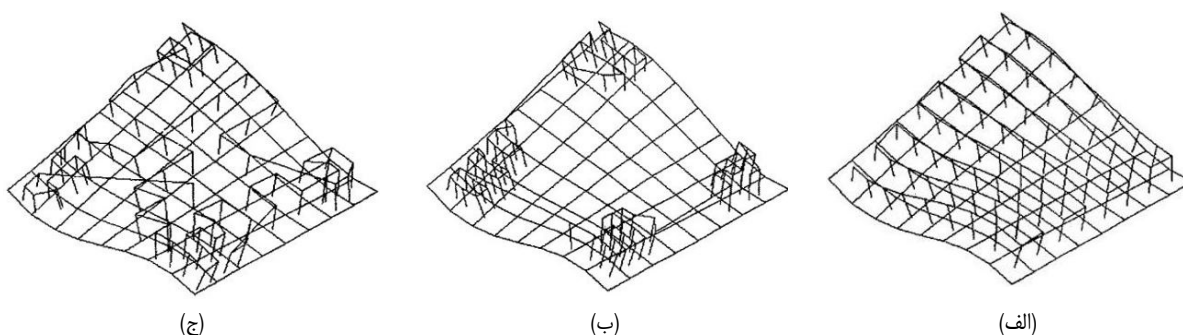
شکل ۳. سطح نرئز به همراه شبکه نقاط کنترلی [۵]



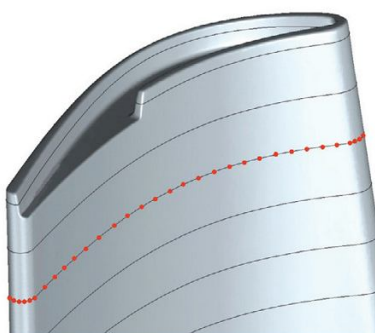
شکل ۴. الف) نمونه‌برداری با توالی هم‌سلسلی، ب) نمونه‌برداری با توالی هالتون-زارمبا، ج) نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت، د) نمونه‌برداری تصادفی [۱۰]



شکل ۵. تأثیر افزایش تعداد نقاط نمونه روی انحراف سطح بازسازی شده نسبت به سطح تخت [۱۰]



شکل ۶. الف) روش نمونه برداری یکنواخت ب) نمونه برداری وابسته به انحنا ج) نمونه برداری ترکیبی [۱۲]



شکل ۷. نمونه برداری سطح ایرفویل توسط معیار طول وتر [۱۳]

به وزن‌های تعریف شده توسط کاربر عملیات نمونه برداری را انجام می‌دهد. الگوریتم نمونه برداری چهارم با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک عملیات نمونه برداری را انجام می‌داد که اثر بخشی (دقت) بیشتری نسبت به سایر روش‌ها داشت. در شکل ۸ نحوه توزیع نقاط توسط شش الگوریتم پیشنهادی آنها را نمایش می‌دهد.

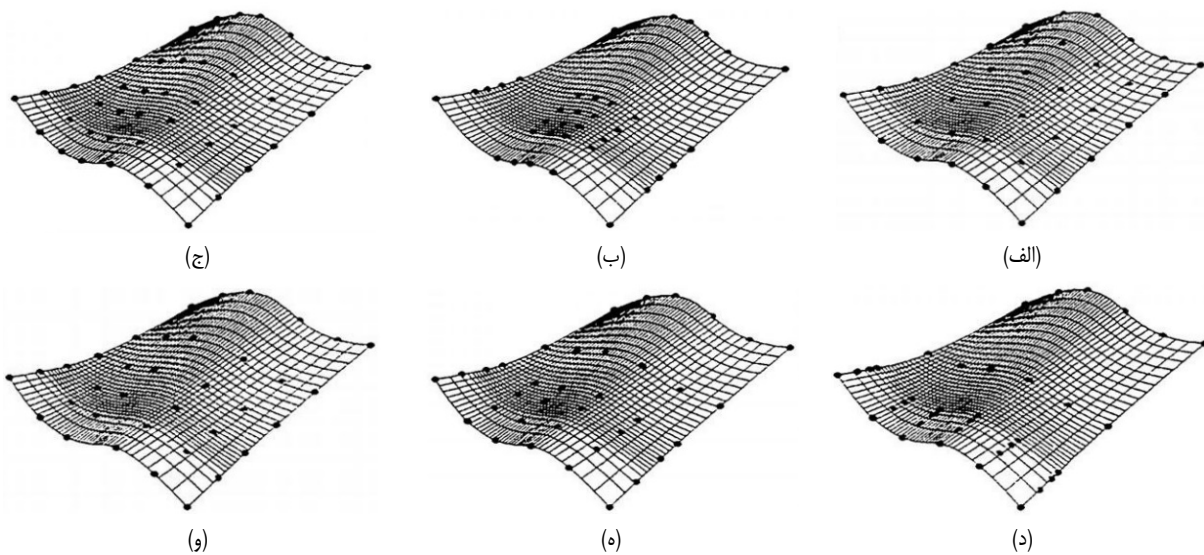
اوبیدنت<sup>۳۴</sup> و همکاران سه الگوریتم ابتکاری برای توزیع نقاط بر روی تکه سطح پیشنهاد دادند [۱۵]. آنها نقاط با میانگین انحنای گوسی متوسط و انحنای گوسی مینیمم را به عنوان نقاط بحرانی در نظر گرفتند. الگوریتم اول با توزیع سه نقطه در نقاط بحرانی هر تکه سطح شروع می‌شود و نقاط نمونه بعدی در

الکات<sup>۳۵</sup> و همکاران چهار الگوریتم نمونه برداری جدید بر اساس مشخصه‌های سطح ارائه دادند [۱۴]. آنها سطح را با توجه به بردار گرادیان به تکه سطح‌هایی تقسیم کردند. الگوریتم نمونه برداری اول بر اساس اندازه تکه سطح‌ها اجرا می‌شود و سهم نقاط در جهات پارامتریک  $u$  و  $v$  متناسب با اندازه تکه سطح می‌باشد. الگوریتم نمونه برداری دوم بر اساس متوسط انحنای گوسی تکه سطح‌ها می‌باشد؛ در این الگوریتم تکه سطح‌ها را بر اساس متوسط انحنای گوسی شان رتبه‌بندی و سهم نقاط برای تکه سطح با رتبه بالاتر، بیشتر خواهد بود. الگوریتم نمونه برداری سوم ترکیبی از روش نمونه برداری بر اساس اندازه تکه سطح و متوسط انحنای گوسی تکه سطح می‌باشد. این الگوریتم با توجه

تکه‌سطح‌هایی با تراکم نقاط کمتر قرار خواهند گرفت. در الگوریتم دوم نقاط اولیه مطابق با الگوریتم اول توزیع شده سپس نقاط باقیمانده براساس اندازه تکه‌سطح‌ها به تکه‌سطح‌ها اضافه خواهند شد. الگوریتم سوم ابتدا نقاط نمونه را براساس نسبت انحنا گوسی متوسط تکه سطح توزیع، سپس نقاط نمونه بعدی را براساس نسبت اندازه تکه‌سطح توزیع می‌کند. در اکثر پژوهش‌های انجام شده قبلی از مدل CAD جهت تعیین تعداد و موقعیت نقاط نمونه‌برداری استفاده می‌شد.

راجامهون<sup>۳۷</sup> و همکاران دو روش جدید توزیع نقاط نمونه براساس مساحت یکنواخت سطح و همچنین بر پایه نقاط برجسته<sup>۳۸</sup> ارائه کردند [۱۶]. آنها با در نظر گرفتن تفاوت هندسی موجود بین مدل CAD و مدل ماشینکاری شده (به دلیل وجود خطاهای متفاوت در فرایند ماشینکاری)، ابتدا مدل ماشینکاری را شبیه‌سازی، سپس نقاط نمونه‌برداری را بر روی مدل ماشینکاری شده توزیع کردند؛ در شکل ۹ مدل سه‌بعدی از خطای ترکیبی

نشان داده شده است. آنها روش‌های پیشنهادیشان را با روش‌های توزیع یکنواخت و توزیع نقاط براساس اندازه تکه‌سطح مقایسه کردند. یو<sup>۳۹</sup> و همکاران یک روش نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر براساس مدل خطای فرم<sup>۴۰</sup> جهت بازرسی سطوح با فرم آزاد توسط CMM معرفی و فرض کردند که نواحی با انحنا گوسی بیشتر، خطای فرم بیشتری در فرایند ماشینکاری دارد [۱۷]. بنابراین، با افزودن این خطای فرم به مدل CAD، یک مدل خطای فرم ایجاد و نهایتاً نقاط نمونه‌برداری را از روی این مدل استخراج کردند. این روش نمونه‌برداری با دو روش شناخته‌شده نمونه‌برداری یکنواخت و نمونه‌برداری براساس متوسط انحنا گوسی تکه سطح مقایسه شد، نتایج حاصل از آزمایشات دقت بیشتر روش پیشنهادی آنها را اثبات کرد. در شکل ۱۰ نحوه توزیع نقاط نمونه توسط الگوریتم پیشنهادی آنها و دو روش نمونه‌برداری یکنواخت و نمونه‌برداری براساس متوسط انحنا گوسی تکه‌سطح نمایش داده شده است.



شکل ۸ الف) نمونه‌برداری یکنواخت در فضای کارترین، ب) نمونه‌برداری یکنواخت در فضای پارامتریک، ج) نمونه‌برداری براساس اندازه تکه‌سطح

د) نمونه‌برداری براساس متوسط انحنا گوسی تکه‌سطح، ه) نمونه‌برداری ترکیبی، و) نمونه‌برداری با استفاده از الگوریتم ژنتیک [۱۴]

و اجزای تصادفی<sup>۴۴</sup> نمایش داده شده است. در مرحله بعد اجزای تصادفی را از مدل انحرافات حذف و یک سطح نریز از نقاط اندازه‌گیری شده برآزش، تا نهایتاً به مدل سطح قطعه<sup>۴۵</sup> برسد. شکل ۱۲ مدل باقی‌مانده‌ها<sup>۴۶</sup> (اثار تصادفی حذف‌شده) را نمایش می‌دهد. در نهایت در مدل سطح قطعه (مدل ماشینکاری شده) نواحی بحرانی شناسایی شدند و در قطعات بعدی فقط نقاط

یونیاتوسکا<sup>۴۱</sup> روشی جدید جهت بازرسی قطعات مشابه دارای دارای سطوح با فرم آزاد روی ماشین اندازه‌گیری مختصات پیشنهاد داد [۱۸]. در روش پیشنهادی او ابتدا قطعه اول با توزیع ۶۲۵ نقطه با فواصل مساوی به وسیله ماشین اندازه‌گیری مختصات بازرسی شده و مدل انحرافات<sup>۴۲</sup> قطعه ماشینکاری شده ایجاد می‌شود. در شکل ۱۱ مدل انحرافات حاوی اجزای قطعی<sup>۴۳</sup>

بحرانی مشخص شده مورد بازرسی قرار گرفتند. از جمله محاسن

این سیستم عبارت‌اند از:

۱. برازش سطح نریز بر نقاط اندازه‌گیری در قطعات بعدی

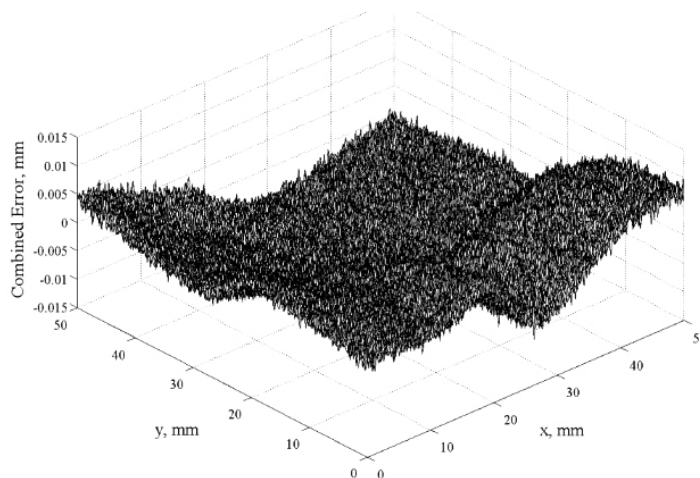
نیاز نیست

۲. بازرسی تمام سطح در قطعات بعدی ضرورت ندارد (فقط

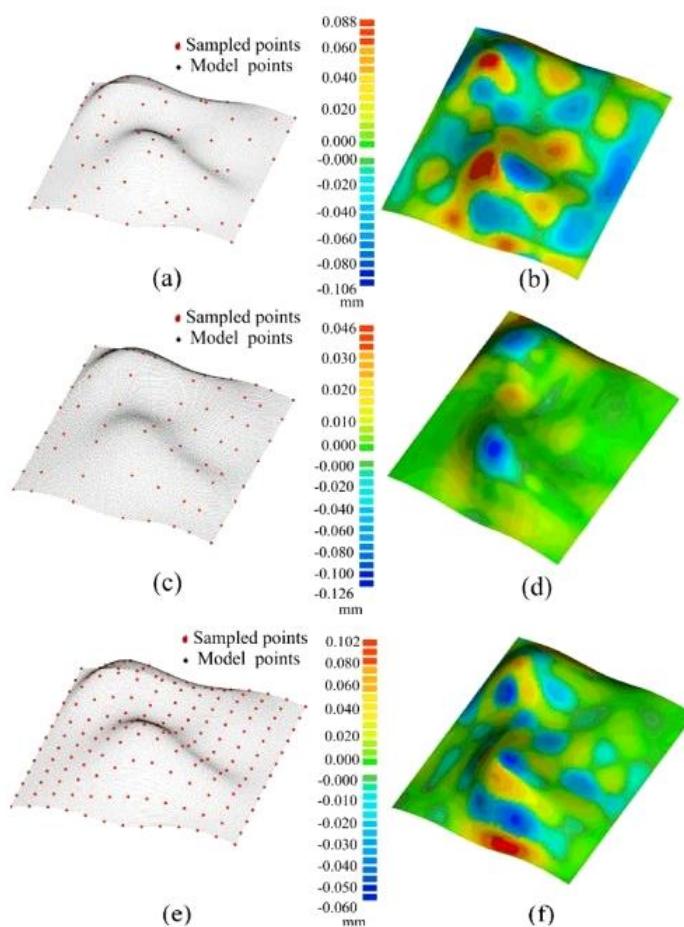
نواحی با احتمال خطای بیشتر بازرسی می‌شود)

در شکل ۱۳ نحوه بازرسی قطعات با موقعیت مشابه روی

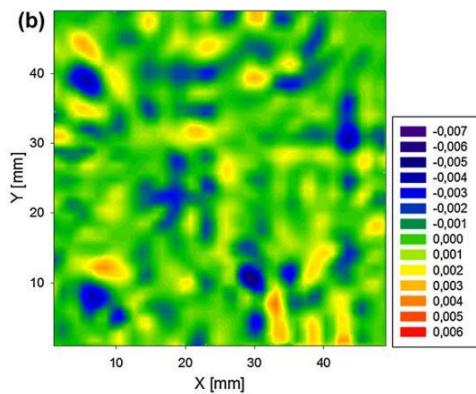
دستگاه اندازه‌گیری مختصات نمایش داده می‌شود.



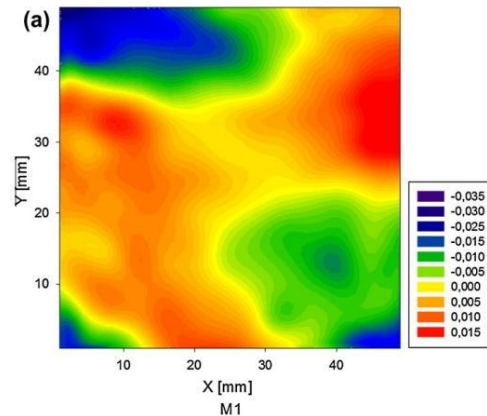
شکل ۹. مدل سه بعدی از خطای ترکیبی [۱۶]



شکل ۱۰. توزیع نقاط نمونه توسط الگوریتم پیشنهادی یو و همکاران [۱۷]



شکل ۱۲. مدل باقی مانده‌ها [۱۸]



شکل ۱۱. مدل انحرافات [۱۸]



شکل ۱۳. بازرسی قطعات با موقعیت مشابه روی ماشین اندازه‌گیری مختصات [۱۸]

#### ۴. نتیجه‌گیری

هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی نحوه توزیع نقاط نمونه به‌روی سطوح با فرم آزاد می‌باشد. تعداد و توزیع نقاط نمونه باید به‌نحوی صورت پذیرد که هندسه جایگزین تا حد امکان به مدل CAD نزدیک باشد. در نهایت از این نقاط جهت نمونه‌برداری از سطح روی ماشین اندازه‌گیری مختصات استفاده می‌شود. با توجه به تحقیقات انجام‌شده مشخص شد، بازرسی سطوح با فرم آزاد به دو روش نمونه‌برداری کورکورانه و تطبیق‌پذیر صورت می‌پذیرد. روش‌های نمونه‌برداری کورکورانه به دلیل در نظر نگرفتن هندسه سطح مورد بازرسی، برنامه نمونه‌برداری دقیقی جهت نمونه‌برداری از سطوح با فرم آزاد تولید نمی‌کنند. از جمله این روش‌ها، روش توزیع نقاط با فواصل یکنواخت پارامتریک می‌باشد که در سطوح با تغییرات زیاد در انحنا و اندازه تکه‌سطح‌ها، تقریب (خطا) زیادی ایجاد می‌کند؛ بنابراین برای کاهش انحراف بیشینه بین هندسه جایگزین و سطوح اسمی در

این الگوریتم تعداد نمونه باید افزایش یابد، این در حالی است که هدف ایجاد هندسه جایگزین با حداقل تعداد نقاط نمونه، می‌باشد. به‌همین دلیل به هنگام بازرسی سطوح پیچیده، باید از روش‌های نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر استفاده نمود. در روش نمونه‌برداری تطبیق‌پذیر با استفاده از ویژگی‌های چون اندازه تکه‌سطح‌ها و میانگین انحنای گوسی سطح، نقاط به شکلی روی سطح توزیع می‌شوند که انحراف هندسه جایگزین از مدل CAD را کمینه کند. در همین راستا در سطوحی که تغییرات در اندازه تکه‌سطح‌ها زیاد باشد، روش نمونه‌برداری براساس اندازه تکه‌سطح‌ها پیشنهاد می‌شود. این در حالی است که روش نمونه‌برداری براساس میانگین انحنای گوسی سطح، برای سطوح با تغییرات انحنای زیاد مفید می‌باشد؛ اشکال روش نمونه‌برداری براساس میانگین انحنای گوسی این است که تکه‌سطح‌ها با اندازه بزرگتر سهم کمتری از نقاط نمونه را دریافت می‌کند، در نتیجه انحراف بزرگتری بین هندسه جایگزین



۴. توان استفاده در قطعات با تیراژ بالا با وجود مزایای که این استراتژی دارد، معایبی چون نیاز به محاسبات پیچیده جهت یافتن موقعیت نقاط نمونه‌برداری را هم داراست که با کم‌شدن تعداد نقاط نمونه‌برداری و متعاقباً زمان بازرسی کمتر در این استراتژی می‌تواند به لحاظ زمان و هزینه بازرسی توجیه اقتصادی داشته باشد. تحقیقات انجام‌شده روی سطوح مختلف نشان می‌دهد، روش‌های نمونه‌برداری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز نتایج مطلوبی در سطوح با پیچیدگی مختلف، به‌دست می‌دهد. امید است این مقاله بتواند مورد توجه مترولوژیست‌هایی که در زمینه بازرسی سطوح با فرم آزاد کار می‌کنند قرار گیرد.

و مدل CAD روی خواهد داد. بنابراین، با توجه به پیچیدگی‌های موجود در سطوح با فرم آزاد، باید روش نمونه‌برداری متناسب با این سطوح در نظر گرفته شود. مزایای استراتژی تطبیق‌پذیر عبارت است از:

۱. قابلیت تطبیق با هر سطح و پیچیدگی
۲. قابلیت پیدا کردن نواحی از سطح که احتمال ایجاد خطای بیشتری روی هندسه جایگزین دارند
۳. قابلیت بازسازی هندسه جایگزین با همان دقت استراتژی نمونه‌برداری با توزیع یکنواخت، اما با تعداد نقاط نمونه‌برداری به‌مراتب کمتر که سبب کاهش زمان بازرسی می‌شود

## ۵. مآخذ

- [1] G. Rajamohan, M. S. Shunmugam and G. L. Samuel, Practical measurement strategies for verification of freeform surfaces using coordinate measuring machines, *Metrology and Measurement Systems*, vol. 18, pp. 209-222, 2011.
- [2] M. Yu, Y. Zhang, Y. Li and D. Zhang, Adaptive sampling method for inspection planning on CMM for free-form surfaces, *International Journal Advance Manufacturing Technology*, vol. 67, no. 19, p. 1967-1975, 2012.
- [3] R. J. Hocken, P. H. Pereira, *Coordinate Measuring Machines and Systems*, New York: Taylor & Francis Group, 2013.
- [4] M. Mahmud, D. Joannic, M. Roy, A. Isheil, J. F. Fontaine, 3D part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty, *Computer-Aided Design*, vol. 43, pp. 345-355, 2011.
- [5] L. Piegl, W. Tilller, *The NURBS Book*, Springer, 1997.
- [6] M. Poniatowska, Deviation model based method of planning accuracy inspection of free-form surfaces using CMMs, *Measurement*, vol. 45, pp. 927-937, 2012.
- [7] 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.
- [8] C. E. Shannon, Communication in the presence of noise Proc, *IRE*, Vol. 37, pp. 10-21, 1949.
- [9] J. M. Hammersley, D. Handscomb, *Monte Carlo methods*, John Wiley & Sons Inc, pp. 25-42, 1964.
- [10] T. C. Woo, R. Liang, C. C. Hsieh, N. K. Lee, Efficient Sampling for Surface Measurement, *Journal of Manufacturing Systems*, pp. 345-354, 1995.
- [11] 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, p. 427-443, 2000.
- [12] M. Cho, K. Kim, New inspection planning strategy for sculptured surfaces using coordinate measuring machine, *International Journal of Production Research*, vol. 33, pp. 427-444, 1995.
- [13] 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, pp. 198-207, 1995.
- [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] D. F. Elkott , H. A. Elmaraghy and W. H. Waguih, Automatic sampling for CMM inspection planning of free-form surfaces, *International Journal of Production Research*, vol. 40, no. 11, pp. 2653-2676, 2002.
- [16] 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, pp. 23-31, 2000.
- [17] G. Moroni, S. Petró, Coordinate Measuring Machine Measurement Planning, in *Geometric Tolerances*, Springer London, 2011, pp. 111-158.

## پی نوشت

- 
1. free-form surface
  2. 5-axis computer numerical control-based machining
  3. inspection
  4. contact methods
  5. non-contact methods
  6. photogrammetry
  7. structured light
  8. interferometry
  9. coordinate measurement machines
  10. touch trigger
  11. manufactured surface model
  12. localization
  13. NURBS surface
  14. sampling methods
  15. blind sampling methods
  16. uniform sampling methods
  17. random sampling methods
  18. hammersley sampling methods
  19. adaptive sampling methods
  20. C. E. Shannon
  21. uniform sampling
  22. hammersley sequence
  23. T. C. Woo
  24. Halton-Zaremba sequence sampling
  25. random sampling
  26. sample size
  27. constructed surface
  28. curvature
  29. patch
  30. Cho
  31. Pahk
  32. normal curvature
  33. ainsworth
  34. parameterization
  35. ElKott
  36. Obeidat
  37. Rajamohan
  38. Dominant point
  39. Yu
  40. form error model (FEM)
  41. Poniatowska
  42. deviation model
  43. deterministic component
  44. random component
  45. product surface model (PSM)
  46. residuals model