

## اندازه‌گیری میزان صافی سطح زبر با استفاده از حسگر خازنی

حسین امیرآبادی<sup>۱\*</sup>، محسن شاکری<sup>۲</sup>، اسامو هوریچی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
- ۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
- ۳- استاد مهندسی مکانیک، آزمایشگاه ماشین‌کاری دقیق، دانشگاه صنعتی توپوهاشی، آچی - ژاپن

\*بابل، صندوق پستی ۴۸۴

amirabadi@nit.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۷)

**چکیده** - توپوگرافی و اندازه‌گیری صافی سطح زبر با استفاده از اندازه‌گیری لیزر اینترفرومتری میکروسکوپ زیگو<sup>۱</sup> ناممکن است. به دلیل دقت بالا و همچنین مدت زمان کوتاه اندازه‌گیری، استفاده از روش خازنی برای اندازه‌گیری توپوگرافی و صافی سطح زبر از جنس کوارتز پیشنهاد می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان نقشه خطا را برای فرایندهای اصلاح خطای شکل، مانند پولیش‌کاری با کنترل کامپیوتری (CCP)، پرداخت با ذرات ساینده مغناطیسی (MRF)، روش جت سیال ساینده و اصلاح به‌روش یونی، ایجاد کرد. در این تحقیق توپوگرافی خطای شکل سطح زبر به کمک حسگر خازنی اندازه‌گیری و قطعه موردنظر با استفاده از روش غبار سیال ساینده اصلاح خطا شد و ایده اصلاح خطای شکل سطح زبر به واقعیت پیوست. مشخص شد که در میان روشهای اندازه‌گیری میانگین - مساحت، روش اندازه‌گیری خازنی، توانایی اندازه‌گیری و تحقق ایده اصلاح خطای شکل، سطح زبر را دارد. اندازه‌گیری صافی سطح قطعه‌ای که زبری  $R_a$  آن در حدود صافی سطح قطعه است یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد روش ارائه شده است.

**کلید واژگان:** مترولوژی سطح، اندازه‌گیری خازنی، اصلاح خطای شکل، ماشین‌کاری دقیق.

### ۱- مقدمه

با وجود پیشرفت‌های ماشین‌کاری فوق دقیق، هنوز به دست آوردن دقت شکل چندنانومتری در سنگ‌زنی مواد ترد مشکل است. سطح واقعی قطعه تمام شده، پستی و بلندی‌هایی با طول موج‌های مختلف دارد. هر

یک از این رژیم‌های با طول موج مختلف باعث تأثیرات متفاوتی در عملکرد قطعات می‌شود و گاهی لازم است آنها را به روشهای مختلف ماشین‌کاری، اصلاح و برطرف کنیم. به‌عنوان مثال در تولید قطعات اپتیکی فرایندهایی مانند ماشین‌کاری با الماس تک لبه، سنگزنی و لپ‌کاری برای ایجاد شکل موردنظر، فرایند پولیش‌کاری برای زدودن نقطه اثر لبه برنده ابزار (زبری

1. Zygo

اندازه‌گیری موجود، توپوگرافی سطح زیر توسط این روشها اندازه‌گیری و با نتایج حاصل از روش پیشنهادی مقایسه شده است.

## ۲- روشهای اندازه‌گیری توپوگرافی سطح زیر

برای مشخص کردن توپوگرافی<sup>۶</sup> سطح و ایجاد نقشه خطا می‌توان از روشهای اندازه‌گیری متفاوتی استفاده کرد. هر چند سطح حاصل فقط تقریبی دیجیتالی از سطح واقعی است؛ اما با وجود این، از نتایج حاصل از روشهای مختلف اندازه‌گیری می‌توان در فرایندهای اصلاح شکل<sup>۷</sup> ذکر شده استفاده کرد.

روش سطح (مانند روش خازنی که میانگین سطح زیر حسگر را اندازه می‌گیرد) و روش پروفیل (مانند روش سوزنی نشان داده شده در شکل ۱ که در آن توپوگرافی سطح با کنار هم قرار دادن پروفیل‌های موازی اسکن شده نمایش داده می‌شود)، دو روش اصلی در اندازه‌گیری پروفیل سطح است.

در این تحقیق اندازه‌گیری سوزنی یکی از روش‌هایی است که برای اندازه‌گیری پروفیل‌های سطح به‌کار برده شده. در این روش، سوزن نسبت به یک سطح مرجع ساخته شده حرکت داده شده و پروفیل کلی (شامل زبری و موج سطح) ترسیم می‌شود [۹، ۱۰]. از آنجاکه هدف اندازه‌گیری و اصلاح خطای شکل (رژیم‌های با طول موج بلندتر) یک سطح زیر است لذا همواره باید در تمامی روشهای پروفیل به‌کار گرفته شده، زبری سطح را در پروفیل‌های اندازه‌گیری شده فیلتر (جداسازی) کرده تا فقط پروفیل خطای شکل (موج سطح) به‌دست آید.

سطح) مورد استفاده قرار می‌گیرد. با تمامی تمهیدات به‌کار گرفته شده، به‌دلیل ماهیت فرایند و منابع خطای مختلف در فرایند ماشین‌کاری، سطح مهندسی تمام شده، انواع عیوب زبری، موجی بودن و خطای شکل (رژیم‌های با طول موج مختلف) را دارد. به‌منظور تولید قطعات دقیق، این عیوب را باید اندازه‌گیری و به‌کمک روشهای موجود برطرف کرد یا به حداقل مقدار ممکن رسانید.

بررسیها نشان می‌دهد که در قطعه‌کار تمام شده و قطعه‌کار نیمه‌تمام (روش پیشنهادی توسط این گروه) به‌منظور حذف رژیم‌های با طول موج بلندتر سطح (مانند موج سطح و خطای شکل)، می‌توان از روشهای مختلف ماشین‌کاری موضعی مانند پولیش‌کاری با پولیش کننده‌های کوچک [۱] تا [۳]، ماشین‌کاری توسط انتشار امواج الاستیک<sup>۱</sup> (EEM) [۴]، ماشین‌کاری توسط اشعه یونی<sup>۲</sup> (IBM) [۵، ۶]، ماشین‌کاری با بخار شیمیایی به‌کمک پلاسما<sup>۳</sup> (PCVM) [۷]، پرداخت به‌کمک ذرات مغناطیسی<sup>۴</sup> (MRF) و غیره بهره برد [۸].

در تمامی روشهای یاد شده، قبل از عملیات اصلاح شکل باید با اندازه‌گیری سطح قطعه، نقشه خطای شکل<sup>۵</sup> محاسبه و ایجاد شود. در این میان دقت و سرعت روش اندازه‌گیری تأثیر مستقیم در دقت و بهبود راندمان فرایندهای یاد شده فوق دارد.

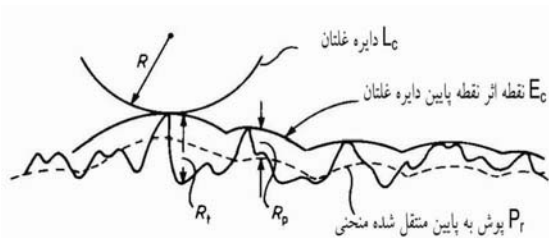
در ادامه و در بخش بعدی به‌دلیل عدم امکان اندازه‌گیری توپوگرافی سطح زیر به روش لیزر اینترفرومتری، ضمن معرفی و توضیح روشهای

1. EEM= Elastic Emission Machining
2. IBM= Ion Beam Machining
3. PCVM= Plasma Chemical Vaporization Machining
4. MRF= Magnetorheological Finishing
5. Error Map

6. Topography

7. Figure Correction

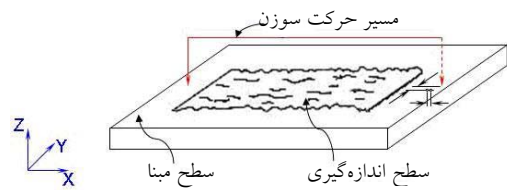
حاصل، بایستی به اندازه شعاع به سمت پایین جابه‌جا شود، تا سطح پوش به دست آید. مانند سیستم متوسط<sup>۱</sup>، سطح متوسط با انتقال به سمت پایین سطح پوش به دست می‌آید. در این حالت مواد بالای خط میانگین سطح با حجم فضای خالی پایین خط میانگین سطح برابر است [۱۰]. سطح پوش، تقریبی از سطح اصلی اسکن شده است و دقت این تقریب به شعاع کره غلتان بستگی دارد. لازم است ذکر شود که تقریب به شعاع کره غلتان بستگی دارد که به دلیل پیچیدگی تعریف ریاضی سطح پوش، این سطح همواره به صورت عددی تعریف و ذخیره‌سازی می‌شود.



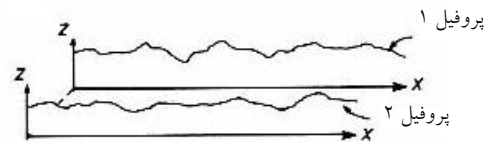
شکل ۲ اصول اندازه‌گیری با استفاده از روش منحنی پوش [۱۲]

اندازه‌گیری سطوح ایزوتریپیک (مانند سطوح ایجاد شده در ماشین‌کاری به روش جرقه الکتریکی، پاشش ساچمه و همچنین سطوح حاصل از ماشین‌کاری مواد ترد) با استفاده از تجهیزات سوزنی زمان‌بر بوده و در عمل نمی‌توان تمامی پارامترهای سطح را به این روش اندازه‌گیری کرد [۱۱].

روش دیگر اندازه‌گیری، روش لیزری است. در این روش در ابتدا بافت سطح به صورت پروفیل‌های موازی اندازه‌گیری شده و در نهایت با انتخاب فیلتری مناسب، پارامترهای مختلف از یکدیگر تفکیک می‌شود. روشهای جداسازی (فیلتر) مختلفی وجود دارد که در این میان می‌توان به روش فیلتر 2RC و روش گوس - که یکی از



(الف)



(ب)

شکل ۱ الف) سطح مبنا برای اندازه‌گیری سطح با زبری بالا ب) استفاده از پروفیل سطح جهت نمایش توپوگرافی سطح [۱۲]

روشهای گوناگونی برای جداسازی و فیلتر کردن زبری و موج سطح وجود دارد. به عنوان مثال، روش پوش منحنی<sup>۱</sup> نمونه‌ای از کاربرد فیلترهای مرفولوژیکی است. در روش پوش منحنی، فرض می‌شود که دایره‌ای فرضی (سر سوزن) بر روی نقاط برجسته<sup>۲</sup> سطح بغلتد. در این روش خط مرجع محل پایین‌ترین نقاط دایره است (شکل ۲). یکی از مزایای این روش آن است که با انتخاب مناسب شعاع دایره (سوزن) می‌توان زبری و موج سطح را از یکدیگر جدا کرد. به بیان دیگر شعاع دایره در این سیستم معادل طول اندازه‌گیری<sup>۳</sup> در روش خط میانگین<sup>۴</sup> است. در این روش، منحنی حاصل را به اندازه شعاع دایره به پایین جابه‌جا می‌کنیم تا منحنی پوش به دست آید. چگونگی ایجاد منحنی پوش برای پروفیل فرضی در شکل ۲ نشان داده شده است. منحنی پوش سطوح سه‌بعدی، شکل توسعه‌یافته منحنی پوش برای سطوح دو‌بعدی است. بدین معنا که سطح

1. Envelope System
2. Crest
3. Sampling Length
4. Mean Line

5. M-System

حسگرهای بزرگ داشته و از آنها می‌توان در تشخیص ویژگی‌های<sup>۴</sup> کوچک بر روی قطعه‌کار استفاده کرد. در این روش خطاهای سیستماتیک کوچکی که باعث خطای غیرخطی می‌شود وجود خواهد داشت اما این خطا برای سیستم‌های استاندارد کمتر از ۰/۱ درصد کل محدوده<sup>۵</sup> است [۱۵].

یکی از دیگر مزایای روش ارائه شده آن است که غیرتماسی بوده و لذا تغییر شکل قطعه‌کار یا سایش ابزار و آثار برخورد در آن وجود ندارد. از سوی دیگر از آنجاکه سیستم غیرتماسی است، زمان تنظیم تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

تا کنون کارهای تحقیقاتی زیادی در زمینه اصلاح خطای شکل صورت گرفته است. در این تحقیقات نقشه خطای قطعه پولیش شده با استفاده از ماشین اندازه‌گیری لیزری زیگو، اندازه‌گیری و به یکی از روشهای موجود، خطای شکل آنها اصلاح می‌شد [۱] تا [۵]. در تحقیق حاضر، ایده اصلاح خطا قبل از پولیش کاری و بر روی سطح زبر مطرح و اجرا شد. (این کار باعث افزایش راندمان ماشین کاری و بهبود کیفیت شکل قطعه خواهد شد). از آنجاکه در اصلاح خطای شکل سطح زبر دیگر نمی‌توان از ماشین اندازه‌گیری لیزری زیگو برای جهت نقشه خطا استفاده کرد، روش خازنی برای اولین بار برای این کار پیشنهاد می‌شود و همان‌طور که در تصویرها نشان داده شده با انجام تغییرات کلی بر روی سیستم کنترل ماشین اندازه‌گیری لیزری موجود (مانند سیستم کنترل، افزودن کنسول پروب خازنی، کالیبره کردن سیستم تحت نظارت مستقیم کارشناسان شرکت ADE ژاپن)، این روش با سایر روشها مقایسه شد. در بخش بعدی اصول و نحوه اندازه‌گیری روش خازنی ارائه شده است.

معمول‌ترین و قدیمی‌ترین روشهای جداسازی است که در تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد - اشاره کرد. تجربه نشان می‌دهد که زمان طولانی اندازه‌گیری، پردازش حجم زیادی از اطلاعات و تعداد زیاد نقاط، برخی از محدودیت‌های این روشها است [۱۲]. محدودیت‌های اشاره شده در روشهای اندازه‌گیری پروفیل سطح (سرعت پایین اندازه‌گیری و حجم بالایی از داده مورد پردازش) باعث شده که از روشهای اندازه‌گیری میانگین سطح - مانند روش خازنی، روش پخش نور و انعکاس مافوق صوت - برای اندازه‌گیری سطح استفاده شود. در این روشها، به‌ازای خواص آماری زیر سطح پروب، تنها یک پارامتر ارائه می‌شود. در ادامه و برای اولین بار روش خازنی، به دلیل سرعت و دقت بالا برای اندازه‌گیری توپوگرافی و ایجاد نقشه خطا سطح زبر معرفی می‌شود. از میان تحقیقات انجام شده در زمینه اندازه‌گیری خازنی می‌توان به تحقیقات بکر<sup>۱</sup> و همکاران در شرکت وستینگهاوس اشاره کرد که از این روش برای اندازه‌گیری زبری سطح حاصل از روشهای ماشین کاری مرسوم و غیرمرسوم استفاده کردند. آنها از صفحه‌ای انعطاف‌پذیر به‌عنوان الکتروود مرجع استفاده کرده و بدین وسیله زبری سطح را اندازه‌گیری کردند [۱۳].

تفکیک‌پذیری جانبی<sup>۲</sup> کم در پروب‌های خازنی باعث شده که این روش به تحلیل ویژگی‌هایی از سطح با دوره تغییرات طولانی مانند صافی سطح<sup>۳</sup> محدود شود [۹]. این حسگرهای خازنی، ضمن داشتن قابلیت اعتماد بالا، نسبتاً ارزان بوده و سرعت اندازه‌گیری بالایی دارند [۱۰، ۱۴]. از آنجاکه در این روش میانگین سطح زیر حسگر اندازه‌گیری می‌شود لذا حسگرهای کوچک، تفکیک‌پذیری جابه‌جایی بیشتری نسبت به

4. Feature  
5. Full Range

1. Becker  
2. Lateral Resolution  
3. Flatness

## ۲-۱- اصول اندازه‌گیری با پروب خازنی

حسگر خازنی متشکل از الکتروود و حلقه محافظ است که در درون بدنه متصل به زمین حسگر قرار می‌گیرد. شکل ۳ ساختمان حسگر تجاری مورد استفاده در کاربردهای دقیق را نشان می‌دهد. ساختمان این حسگرها شبیه ساختمان خازن معمولی است که از صفحه هادی دارای اختلاف پتانسیل و یک دی‌الکتریک بین پروب و سطح تشکیل شده است. معادله ۱ ارتباط بین پارامترها را نشان می‌دهد [۱۴، ۱۵].



شکل ۳ پروب خازنی مورد استفاده در اندازه‌گیری (ساخت شرکت ژاپنی ADE Micro Sense)

$$C = KA / Z \quad (1)$$

ظرفیت خازنی C، متناسب با ثابت دی‌الکتریک K و سطح حسگر پروب A و عکس فاصله پروب تا سطح یعنی Z است. فاصله بین پروب تا سطح پارامتری است که اندازه‌گیری می‌شود. برای امان کوچکی از سطح پروب رابطه زیر برقرار است.

$$\delta C \propto \frac{\delta x \delta y}{Z} \quad (2)$$

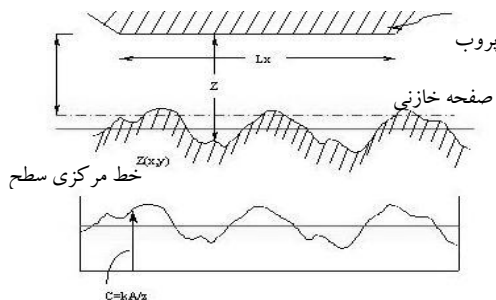
با انتگرال‌گیری بر روی سطح کل پروب نتیجه می‌شود:

$$C = K \int \int \frac{d_x d_y}{Z} \quad (3)$$

یا  $C = KA/Z_m$  که جایگزین مقدار متوسط Z بر روی سطح A شده است. با فرض اینکه معادله سطح  $Z(x, y)$  باشد، داریم:

$$Z = t_0 + z(x, y) \quad (4)$$

ساختار پروب خازنی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود  $Z_m$  صفحه‌ای خازنی است که بیابانگر موقعیت مؤثر سطحی از قطعه‌کار است که روبه‌روی حسگر خازنی قرار گرفته.



شکل ۴ اصول اندازه‌گیری سطح به روش خازنی [۱۴]

لذا برای سطح ناشناخته می‌توان نوشت:

$$C = K \int \int \frac{d_x d_y}{t_0 + z(x, y)} \quad (5)$$

$t_0$  برای حسگر داده شده مقدار ثابتی است.

از آنجا که ظرفیت خازنی با عکس زبری متناسب است، پیک‌های بزرگ معمولاً به فرورفتگی‌ها مربوط می‌شوند.

$$Z_m = R_c + t_0 \quad (6)$$

در ادامه، توپوگرافی سطح و عدم صافی سطح جسم زیر ایزوتروپیک کوارتزی با روش خازنی اندازه‌گیری و نتایج حاصل با سایر روشها (روش لیزری و سوزنی) مقایسه شده است.

## ۳- نتایج و آزمایشها

تحقیقات در زمینه ماشین‌کاری مواد ترد مبین این واقعیت است که اگر عمق باربرداری از مقدار بحرانی بیشتر شود، پدیده نفوذ و گسترش ترک عامل باربرداری شده و لذا کنترل بر روی پلیسه‌ها وجود نداشته و سطحی زیر (سطح ایزوتروپیک) حاصل

از آنجاکه ولتاژ خروجی پروب به زبری حساس است، تجهیزات اندازه‌گیری خازنی توسط نمونه کوارتز واقعی که گزارش زبری آن در جدول ۱ آمده، کالیبره شد. پس از کالیبره کردن کنسول (Micro sense 3401HR)، سطح قطعه کار اسکن شد.

جدول ۱ نتایج اندازه‌گیری زبری سطح توسط میکروسکوپ لیزری هم‌کانون (ساخت شرکت Mitaka) بر اساس

استاندارد JIS B 0601:2001

۲/۹۸۶۳۳ $\mu m$	حداکثر ارتفاع زبری ( $R_t$ )	۰/۸mm	فیلتر مبین فصل مشترک زبری و اعوجاج ( $R_c$ )
۲/۹۸۶۳۳ $\mu m$	انحراف متوسط حسابی پروفیل ارزیابی شده ( $R_a$ )	۰/۸mm	طول نمونه برداری ( $l$ )
۲/۹۸۶۳۳ $\mu m$	انحراف ریشه میانگین مربعی پروفیل ارزیابی شده ( $I_{req}$ )	۳/۲mm	طول ارزیابی ( $l_n$ )
۱/۰۲۰۲۷ $\mu m$	کجی پروفیل زبری ( $R_{sk}$ )	۲/۹۸۶۳۳ $\mu m$	حداکثر ارتفاع قله پروفیل زبری ( $R_p$ )
۶/۸۷۴۹۷ $\mu m$	تیزی پروفیل زبری ( $R_{ku}$ )	۲/۹۸۶۳۳ $\mu m$	حداکثر عمق دره پروفیل زبری ( $R_v$ )
۲/۹۸۶۳۳ $\mu m$	طول متوسط المانهای پروفیل ( $R_{Sm}$ )	۲/۹۸۶۳۳ $\mu m$	حداکثر ارتفاع پروفیل زبری ( $R_z$ )
۰/۰۳۱۹۰۶۳٪	نسبت مادی پروفیل ( $R_{mr(c)}$ )	۲/۹۸۶۳۳ $\mu m$	ارتفاع متوسط المانهای پروفیل زبری ( $R_c$ )

خواهد شد. در اندازه‌گیری صافی سطح زیر مذکور و تهیه نقشه خطا به روش پروفیل سطح، لازم است ضمن در نظر گرفتن سطح مرجع بین مسیرها، هر یک از مسیرهای طولی اسکن شده به مسیر اسکن شده قبلی مرتبط شود. بدین منظور و برای آماده‌سازی قطعه کار و تحقق شرایط اندازه‌گیری ذکر شده، نمونه‌ای کوارتز پولیش شده‌ای به ضخامت ۲mm توسط غبار سیال ساینده، ماشین کاری و حفره مورد نظر ایجاد شد. در این حالت می‌توان سطح پولیش باقیمانده در اطراف حفره را به‌عنوان مرجع سطح زیر ایجاد شده (مانند شکل ۱) در نظر گرفت.

شکل ۵ ماشین اندازه‌گیری خازنی توسعه یافته و نمایی نزدیک از پروب خازنی را نشان می‌دهد. این ماشین، اساساً نوعی میکروسکوپ لیزری هم‌کانونی<sup>۱</sup> است که بر روی آن تغییراتی برای اندازه‌گیری خازنی ایجاد شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، پروب خازنی 2102/2036K<sup>۲</sup> به‌جای یکی از عدسی‌های شیئی، عمود بر سطح نمونه نصب شده و ماشین برای حرکاتهای لازم برای اندازه‌گیری برنامه‌نویسی شده است. تفکیک‌پذیری پروب نصب شده بر روی ماشین برابر ۰/۲۵ nm بوده و خطای غیرخطی آن حداکثر تا ۰/۴ درصد مقدار تفکیک‌پذیری است.

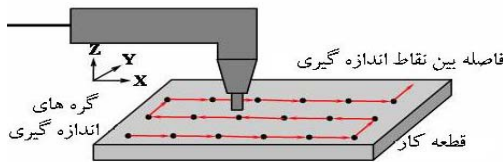


شکل ۵ نصب پروب خازنی به‌جای عدسی شیئی میکروسکوپ اندازه‌گیری غیرتماسی لیزری

1. Co-Focal

۲. ساخت شرکت ADE micro sense

پس از ذخیره‌سازی مقادیر خوانده شده، داده‌ها توسط برنامه ++C نوشته پردازش و با پردازش خطی به‌روش حداقل مربعات، خطای مربوط به شیب قطعه‌کار بر طرف و توپوگرافی سطح ایجاد شد.



شکل ۶ نحوه اندازه‌گیری و مسیر حرکت پروب خازنی

به‌منظور بررسی صحت و دقت روش اندازه‌گیری خازنی، سطح قطعه‌کار آماده‌سازی شده با روش لیزری توسط ماشین اندازه‌گیری لیزری نشان داده شده در شکل ۵ (Mitaka NH-3NT) با خطوطی با گام  $50\mu\text{m}$  از یکدیگر نیز اسکن و اندازه‌گیری شد. در این روش، با انتخاب فیلتر مناسب توپوگرافی لازم از سطح مذکور حاصل شد.

علاوه بر روشهای ذکر شده، سطح با روش سوزنی (سوزن شماره ۵ با قطر  $1/6\text{ mm}$ ) نشان داده شده در شکل ۷ اندازه‌گیری و به‌کمک کارت جمع‌آوری داده، پستی و بلندی سطح اسکن شده در کامپیوتر ذخیره‌سازی شد.

در ادامه و در بخش بعدی ضمن ارائه نتایج حاصل از هر یک از روشهای ذکر شده، به بحث و مقایسه نتایج می‌پردازیم.



شکل ۷ دستگاه اندازه‌گیری سوزنی به‌کار گرفته شده

برای اطمینان از دقت و صحت نتایج اندازه‌گیری، تمامی نکات مختلف قید شده توسط شرکت سازنده تجهیزات اندازه‌گیری خازنی رعایت شد. در این راستا و به‌منظور تشکیل میدان الکتریکی یکنواخت بین پروب و نمونه کوآرتز و همچنین کاهش تأثیر اغتشاشات، قطعه‌کار و میز اتصال زمین شده است.

از آنجاکه هر گونه آلودگی بر روی سطح حسگر، هندسه الکتریکی حسگر را تغییر داده و اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهند، تمیزی پروب و قطعه‌کار حائز اهمیت بسیار است. دما که مهمترین عامل خارجی محسوب می‌شود، همواره باید کنترل شده و همچنین خطای ناشی از تغییرات دما جبران شود. به این منظور و برای تثبیت حرارتی و کاهش خطاهای ناشی از تغییرات دما، یک سیکل گرم شدن در شروع راه‌اندازی برای سیستم در نظر گرفته شد [۱۵].

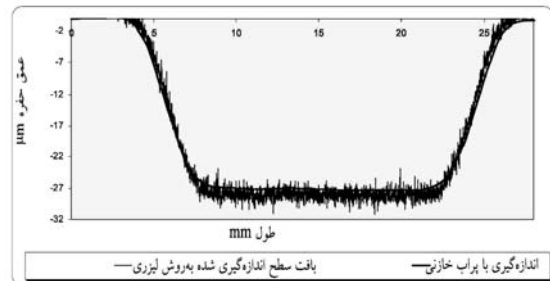
برای بررسی خطاهای حرارتی و بررسی میزان پایداری سیستم، خروجی پروب در محدوده نقاط پولیش شده اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که اثرات دما باعث خطایی به اندازه  $0/0001(\mu/\text{sec})$  شده که این مقدار در اندازه‌گیری‌های مربوط به خطاهای حرارتی ملحوظ شد. همچنین بر اساس مستندات شرکت ADE، سطح اندازه‌گیری شده توسط حسگر خازنی تقریباً دو برابر سطح واقعی پروب  $2 \times 1/7\text{ mm}$  است. برای اطمینان از اسکن سطح، همپوشانی<sup>۱</sup> سطح زیر پروب اعمال شد. به‌کمک ماکروی نوشته شده، سطح قطعه‌کار توسط ماشین فوق اسکن شد. در هر یک از نقاط اندازه‌گیری (شکل ۶) موقعیت و ولتاژ خروجی پروب به‌طور همزمان و به‌کمک مبدل آنالوگ به دیجیتال و با استفاده از کارت جمع‌آوری داده<sup>۲</sup>، به‌صورت ماتریسی  $M \times N$  (که  $M$  تعداد مسیرهای اسکن شده و  $N$  بیانگر تعداد نقاط اندازه‌گیری شده در هر یک از مسیر) در کامپیوتر ذخیره‌سازی شد.

1. Overlap  
2. (KEYENCE NR-110 PCMCIA)

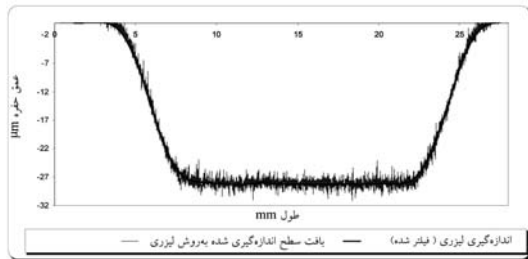
#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، توپوگرافی سطح و عدم صافی سطح جسم زیر ایزوتروپیک کوارتزی با روش خازنی اندازه‌گیری و با سایر روشها (روش لیزری و سوزنی) مقایسه شد. مشاهدات نشان می‌دهد که اندازه‌گیری توپوگرافی و صافی سطح غیرشفاف زیر با روش سنجش توپوگرافی لیزر اینترفرومتری کاری سخت و ناممکن است. نویسندگان مقاله تلاش می‌کنند روش اندازه‌گیری خازنی را - به دلیل دقت بالا و زمان کوتاه اندازه‌گیری - به عنوان روشی مناسب برای این منظور اصلاح و معرفی نمایند. ضمن اینکه ایده اصلاح خطای شکل سطح زیر توسط اندازه‌گیری پستی و بلندی خازنی روش مناسبی به نظر می‌رسد.

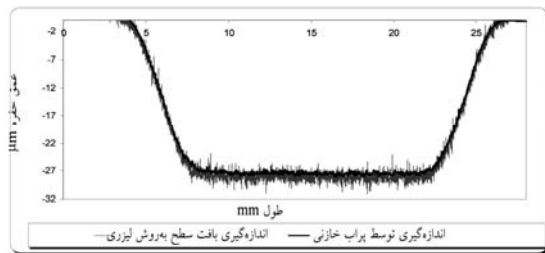
با توجه به توضیحات مندرج در قسمت‌های قبلی درباره اصلاح خطای شکل، باید در ابتدا نقشه خطا - به طوری که زبری سطح فیلتر شده باشد - ایجاد شود. در حالت دو بُعدی نتایج روشهای مختلف اندازه‌گیری توپوگرافی سطح، در کنار سطح فیلتر شده (نقشه خطا) نشان داده شده است. در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب بافته سطح در برابر خروجی پروب خازنی، روش لیزری و سوزنی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شکل ۱۱ بیشترین اختلاف بین روش خازنی و روش لیزری در کف حفره ماشین کاری شده در حدود  $1/2946 \mu m$  و این اختلاف برای روش خازنی و سوزنی برابر  $1/555 \mu m$  است.



شکل ۸ مقایسه بافت واقعی سطح و خروجی پروب خازنی



شکل ۹ مقایسه بافت واقعی سطح خروجی ماشین اندازه‌گیری لیزری (همراه با فیلتر با گذر کمتر از  $2/5 mm$ )



شکل ۱۰ مقایسه بافت واقعی سطح و خروجی ماشین اندازه‌گیری سوزنی همراه با فیلتر مورفولوژیکی جداساز

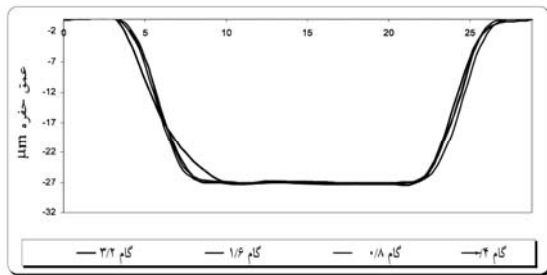
این اختلاف ناشی از برخی تفاوت‌های فیزیکی و عوامل الکتریکی است. عوامل الکتریکی ممکن است شامل دریافت دمایی<sup>۱</sup>، بسته نشدن میدان خازنی و هیستریزس دینامیکی باشد. عوامل فیزیکی شامل تغییر در ضریب عبور نسبی به سبب تغییرات فشار و دما؛ موازی نبودن حسگر و سطح قطعه کار و زبری یا خرابی الکتروود حسگر، حلقه محافظ یا سطح هدف باشد. با تمهیدات در نظر گرفته شده سعی شد که این خطاها به حداقل کاهش یافته یا خطای وارد شده به سیستم جبران شود [۱۶].

از سوی دیگر این روش اسکن که فقط شامل یک حسگر است، برای اندازه‌گیری فاصله‌ای مانند پروفایلرهای اپتیکی<sup>۲</sup> میکروسکوپ AFM<sup>۳</sup>، میکروسکوپ هم‌کانونی و اینترفرومتری با نور سفید<sup>۴</sup> و غیره به کار می‌رود. تمامی

1. Temperature Drift
2. Optical Profiler
3. Atomic Force Microscope
4. White Light Interferometer



روش لیزری و سوزنی همخوانی دارد. اختلاف فاصله بین این روش‌ها علاوه بر موارد ذکر شده می‌تواند تابع پارامترهای مختلفی مانند اندازه قطر نوک سوزن، زبری سطح و مساحت نوک پروب خازنی باشد.



شکل ۱۲ تأثیر فاصله گام اندازه‌گیری بر خروجی در روش اندازه‌گیری خازنی

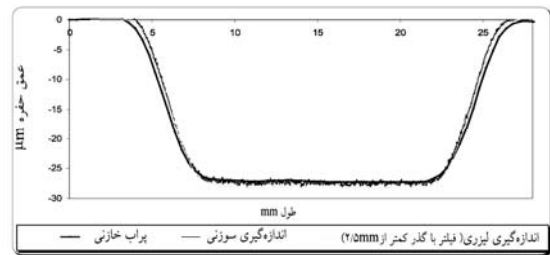
بدیهی است که با انتخاب گام کوچک‌تر، نتایج دقیق‌تری به دست می‌آید، اما این باعث افزایش زمان اندازه‌گیری و در نتیجه افزایش خطاهای حرارتی (دمایی) می‌شود. لذا همواره در انتخاب اندازه گام اندازه‌گیری باید دقت شود. در این تحقیق فاصله گام به کار رفته برای سنجش صافی سطح به روش خازنی برابر  $0.08\text{mm}$  انتخاب شد. اندازه گام تابع مساحت مؤثر پروب خازنی و ویژگی‌های سطح اندازه‌گیری شده است. برای مثال، همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده در اندازه‌گیری عمق حفره، با افزایش فاصله گام، عدم دقت در دیوارها افزایش می‌یابد. بنابراین برای انحراف در طول موج کوچک، بهتر است از فاصله گام کوتاه‌تر استفاده شود.

## ۵- تشکر و قدردانی

ضمن تشکر از همکاری و حمایت مسئولان محترم دانشگاه مازندران، لازم می‌دانیم از زحمات اعضای آزمایشگاه

این روش‌ها و ماشین‌ها متأثر از خطاهای زاویه‌ای و موقعیتی می‌باشند. مهمترین تأثیر خطاها مربوط به خطاهایی است که به میز عمود بر سطح قطعه وارد می‌شود. این خطاها خطای اصلی بوده و مستقیماً به سیگنال اندازه‌گیری اضافه می‌شود. تأثیر خطای زاویه‌ای بر توپوگرافی سطح اندازه‌گیری شده از نوع خطای مرتبه دوم بوده و معمولاً کوچکتر از خطای عمود وارد شده در سیستم اندازه‌گیری است [۱۶].

با توجه به تمامی موارد مطرح شده، اگرچه اختلافاتی بین روشهای اندازه‌گیری شده وجود دارد، اما همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده نتایج حاصل از روش‌های مختلف اندازه‌گیری، رفتار کاملاً یکسانی را در تمامی موارد نشان می‌دهند.



شکل ۱۱ مقایسه پروفیل سطح حاصل از روش‌های مختلف اندازه‌گیری

یکی از دیگر نتایج حائز اهمیت، زمان کوتاه اندازه‌گیری توسط ماشین و روش پیشنهادی فوق است. در روش مذکور (اندازه‌گیری خازنی) برای اسکن قطعه کاری از جنس کوارتز به ابعاد  $50 \times 50 \text{mm}$  به زمانی در حدود ۲ دقیقه نیاز است، حال آنکه با استفاده میکروسکوپ لیزری هم‌کانونی (اشاره شده در بخش‌های پیشین) این زمان به ۲۰ دقیقه افزایش می‌یابد.

با مقایسه نتایج شکل ۱۲ مشخص است که در روش خازنی در صورت انتخاب گام مناسب، نتیجه حاصل با

- [7] Mori Y., Yamamura K., Yamauchi K., Yoshii K., Kataoka T., Endo K., et al.; “an ultra precision machining technique using high-pressure reactive plasma”, *Nanotechnology*; 4(4), 1993, pp. 225–9.
- [8] Pollicove H., Jacobs S., Richard M., Ruckman J.; “Deterministic process for manufacturing perfect surface”, In *Proceedings of the ninth international conference on precision engineering*; 1999, pp. 36–41.
- [9] ASME B46.1-2002 (Revision of ASME B46. 1-1995), *SURFACE TEXTURE (SURFACE ROUGHNESS, WAVINESS, AND LAY)*, 2006.
- [10] Raja J., Muralikinishnan B., Shengyu Fu.; “Recent advances in separation of roughness, waviness and form”, *Prec. Eng.*; 26, 2002, pp. 222-235.
- [11] Williams RE., Rajurkar KP., Bishu RR.; “Experimental comparison of a stylus-based and a capacitance-based surface roughness measurement system for different micro surface contours”, *SME*; 1990.
- [12] Huifen Li., Cheung C. F., Jiang X. Q., Lee W. B. , To S.; “A novel robust Gaussian filtering method for the characterization of surface generation in ultra-precision machining”, *Pre. Eng.*; 10-08, 2006.

ماشین‌کاری دقیق و پرسنل کارگاه ساخت دانشگاه صنعتی  
تویوهاشی ژاپن نیز قدردانی نماییم.

## ۶- منابع

- [1] Horiuchi O., Ikeno J., Shibutani H., Suzuki H., Mizukami Y.; “Nano-abrasion machining of brittle materials and its application to corrective figuring”, *Pre. Eng*; 31, Issue 1, 2007, pp. 47-54.
- [2] Aspden R., McDonough R., Nitchie FR.; “Computer assisted optical surfacing”. *Appl. Opt.*; 11(12), 1972, pp. 2739–47.
- [3] Ando M., Negishi M., Takimoto M., Deguchi A., Nakamura N., Higomura M., et al.; “Super-smooth surface polishing on aspherical optics”. In *Proceedings of SPIE*; vol. 1720, 1992, pp. 22–33.
- [4] Mori Y., Yamauchi K., Endo K. “Elastic emission machining”, *Prec. Eng*; 9(3), 1987; pp. 123–8.
- [5] Wilson SR., Reicher DW., McNeil JR.; “Surface figuring using neutral ion beams” In *Proceedings of SPIE*; vol. 966, 1988, pp. 74–81.
- [6] Weiser M., Kubler C., Fiedler KH., Beckstette KF.; “Particle beam figuring – an ideal tool for precision figuring of optics”, In *Proceedings of the sixth IPES*; 1991, pp. 209–14.

- [16] Valance R. R., Marsh E. R., Smith P. T.; “Effect of spherical targets on capacitive displacement measurements”, Transactions of the ASME; Vol. 126, 2004, pp. 822.
- [17] Roberto N., Franco C., Gian B. Picotto, Attilio S.; “A surface profile reconstruction method based on multi sensor capacitive transducers”, Measurement; 13, 1994, pp. 77-84.
- [13] Brecker JN., Fromson RE., Shum LY.; “A Capacitance-Base Surface Texture measuring system”, Annals of the CIRP; Vol. 25-1, 1977
- [14] Whitehouse D. J., Handbook of surface metrology, IOP publishing Ltd. 1994; pp. 443, pp. 561.
- [15] ADE Company manual.

