

# روشی خودکار برای اندازه‌گیری صافی سطح قطعات نوری در تداخل سنجی

محمد رضا رشیدیان وزیری<sup>۱</sup>، سمیه داودی<sup>۲</sup>، ناصر پرتوی شبستری<sup>۳</sup>، مالک محمودی شریبانی<sup>۴</sup>

## چکیده

در این کار روشی خودکار برای اندازه‌گیری صافی سطح قطعات نوری از طریق آزمایش‌های تداخل سنجی ارائه شده است. ابتدا روابط موردنیاز برای توصیف چگونگی شکل‌گیری نوارهای تداخلی در آزمایش‌های صافی سطح به دست آمده‌اند. با توجه به روابط به دست آمده و وصف چگونگی انحراف نوارهای تداخلی از حالت صاف به حالت انحنادار در صورت ناصاف بودن سطح قطعه، روش استاندارد اندازه‌گیری صافی سطح مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط متلب و استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر، روشی خودکار برای اندازه‌گیری صافی سطح در آزمایش‌های تداخل‌سنجی ارائه شده و بر اساس آن رابط گرافیک کاربری برای ارتباط آسان‌تر کاربران با سامانه تداخل‌سنجی توسعه داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** صافی سطح، نوارهای تداخلی، الگوریتم‌های پردازش تصویر.

## ۱. مقدمه

به اختصار با نام «طرح تداخلی» نیز شناخته می‌شود. اختلاف فاز بین دو جبهه موج، که ریشه آن اختلاف راه نوری پیموده شده توسط آن‌ها است، علت شکل‌گیری این طرح تداخلی است. در صورت مشاهده و یا ثبت این نوارهای تداخلی، می‌توان اختلاف فاز نوری بین دو جبهه موج را در موقعیت‌های مختلف این طرح تداخلی به دست آورد. با استخراج اختلاف راه نوری از این طرح اختلاف فاز و ارتباط آن با شرایط هندسی مسأله خاص تحت بررسی، می‌توان کمیت‌های فیزیکی مختلفی را به این روش اندازه‌گیری کرد [۱-۲]. با ساخت لامپ‌های

زمانی که دو جبهه موج نوری با همدوسی مناسب مکانی و زمانی با یکدیگر تداخل داشته باشند، طرحی از نوارهای تداخلی تاریک و روشن شکل خواهد گرفت که

۱) استادیار، پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. آدرس پست الکترونیک: [mrashidian@aeoi.org.ir](mailto:mrashidian@aeoi.org.ir)

۲) کارشناس، پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. آدرس پست الکترونیک: [sdavodi@aeoi.org.ir](mailto:sdavodi@aeoi.org.ir)

۳) مربی، پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. آدرس پست الکترونیک: [npartovi@aeoi.org.ir](mailto:npartovi@aeoi.org.ir)

۴) کارشناس، پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. آدرس پست الکترونیک: [malekmahmoudi@yahoo.com](mailto:malekmahmoudi@yahoo.com)

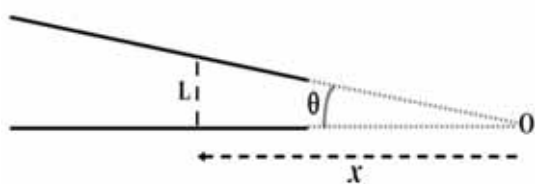
بخار جیوه و سدیم، که قادر به تابش در طول موج‌های خاص مرتبط با گذارهای اتمی هستند، دسترسی به منابع نوری با همدوسی زمانی مناسب فراهم گردید. با موازی‌سازی نور این نوع لامپ‌ها برای افزایش همدوسی مکانی، ساخت نمونه‌های اولیه تداخل‌سنج‌ها به این روش امکان‌پذیر گردید. طول همدوسی این نوع لامپ‌ها در حد چند میلی‌متر است. بنابراین محدودیتی که در استفاده از این نوع تداخل‌سنج‌ها با آن روبه‌رو هستیم عبارت است از محدود بودن به استفاده از اختلاف راه-های نوری کم‌تر از چند میلی‌متر بین دو جبهه موج. همانطور که در ادامه خواهیم دید، این محدودیت در سامانه‌های تداخل‌سنجی که برای سنجش صافی سطوح نوری به کار گرفته می‌شود کاربر را مجبور خواهد کرد که سطح آزمون تحت بررسی را روی سطح مرجع نوری قرار دهد. این تماس بین دو سطح همواره احتمال وارد آمدن آسیب به یکی از دو سطح را به دنبال خواهد داشت. احتمال صدمه دیدن سطح آزمون در کاربردهایی که در آن‌ها صافی سطح بالای قطعات نوری (به عنوان مثال  $\lambda/20$  در ساخت لیزرهای پرشدت مورد استفاده در گداخت لیزری) مورد نیاز است چندان مطلوب نیست [۳]. با ساخت لیزرهای تک مد با کیفیت و بهره‌گیری از آن‌ها در ساخت تداخل‌سنج‌ها، انقلابی در زمینه گسترش کاربرد تداخل‌سنجی نوری در بسیاری از کاربردهای اندازه‌گیری دقیق اتفاق افتاد. این نوع از لیزرها، همانند لیزرهای کم توان هلیوم نئون، می‌توانند طول همدوسی‌هایی بیش از ۱۰ متر داشته باشند و لذا امکان افزایش اختلاف راه نوری تا حد چند متر را بین دو جبهه موج فراهم می‌آورند. اکنون با

استفاده از این نوع تداخل‌سنج‌های لیزری، امکان جدا کردن قطعات آزمون و مرجع در آزمایش‌های اندازه‌گیری صافی سطوح نوری تا فاصله دلخواه و متناسب با بزرگی قطعات نوری که در کاربردهای جدید لیزری مورد نیاز هستند مهیا گشته است [۴-۵].

در بسیاری از کاربردهای جدید، نظیر ساخت لیزرهای پرتوان مورد استفاده در گداخت لیزری و قطعات نوری مورد استفاده در سامانه‌های تصویربرداری نوری، نیاز به استفاده از قطعات نوری با کیفیت بالا است. برای کاستن از ابیراهی‌ها و ناهمگنی‌های جبهه موج در چنین کاربردهایی باید سطح قطعات نوری مورد استفاده در آن‌ها را به دقت مورد بررسی قرار داد. برای تحقق این امر می‌توان از روش تداخل‌سنجی به عنوان روشی دقیق برای اندازه‌گیری کیفیت سطوح نوری استفاده کرد [۶-۷]. در این مقاله به ارائه روشی خودکار برای اندازه‌گیری کیفیت سطح قطعات نوری در تداخل‌سنجی خواهیم پرداخت. ابتدا روابط فیزیکی مورد نیاز برای تفسیر طرح نوارهای تداخلی در آزمایش‌های تداخل‌سنجی مورد استفاده برای اندازه‌گیری کیفیت سطح قطعات نوری به دست آمده و سپس با استفاده از روش‌های پردازش تصویر و تپ مناسب الگوریتم رایانه‌ای مورد نیاز برای دسترسی به این هدف ارائه خواهد شد.

## ۲. روابط نظری مورد نیاز برای تفسیر طرح نوارهای تداخلی

برای اندازه‌گیری صافی سطح قطعه نوری، قطعه آزمون، را روی سطح صاف دیگری، سطح مرجع، قرار می‌دهند.



شکل ۲. هندسه آزمایش اندازه گیری صافی سطح در دوبعد.

هوای شکل گرفته بین دو قطعه نشان داده شده است [۷]. با توجه به شکل ۲، اختلاف راه نوری بین دو باریکه را می توان توسط معادلات زیر بیان کرد:

$$OPD = 2L = 2xtg(\theta) \approx 2x\theta$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \times OPD = \frac{4\pi x\theta}{\lambda} \quad (1)$$

OPD و  $\Delta\varphi$  به ترتیب بیانگر اختلاف راه نوری و اختلاف فاز ایجاد شده بین دو باریکه هستند. با توجه به این اختلاف فاز، شدت طرح تداخلی شکل گرفته بین پرتوهای بازتابیده از نقاط مختلف، متناظر با  $x$  های مختلف در شکل ۲، را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi) \quad (2)$$

بنابراین نوارهای تداخلی تاریک و روشن در صورت برقراری شرایط زیر شکل خواهند گرفت.

$$x_d\theta = (2n+1)\frac{\lambda}{4} \Rightarrow \text{نوار تداخلی تاریک}$$

اگر

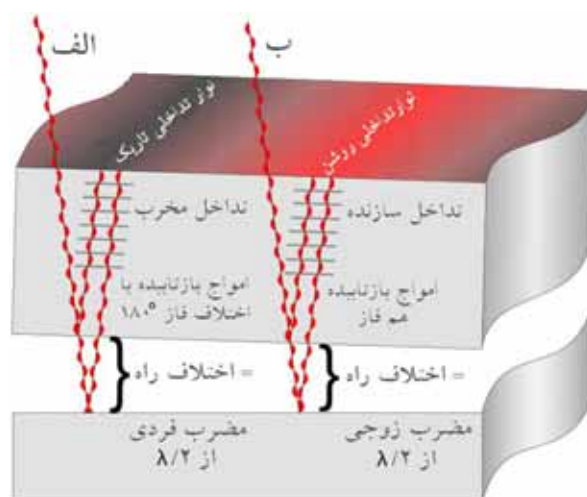
(۳)

$$x_b\theta = (2n)\frac{\lambda}{4} \Rightarrow \text{نوار تداخلی روشن}$$

اگر

با استفاده از روابط (۱) می توان طرح نوارهای تداخلی را در دو بعد به دست آورده و رسم کرد. می توان به سادگی نشان داد که به ازای زاویه  $\theta$  برابر با صفر هیچ طرح تداخلی شکل نخواهد گرفت. با افزایش زاویه،

زمانی که سطح قطعه آزمون با باریکه لیزری گشوده شده ای نوردهی شود مجموعه ای از نوارهای تداخلی تاریک و روشن شکل خواهند گرفت. نحوه شکل گیری نوارهای تداخلی به علت اختلاف راه نوری ایجاد شده بین نور بازتابیده از سطح فوقانی قطعه آزمون و سطح زیرین قطعه مرجع در شکل ۱، نشان داده شده است. نور تک فام از بالای قطعه شفاف مرجع به سمت دو سطح تابانده می شود. با توجه به شکل، به علت وجود ناحیه گوه شکل بین دو قطعه، اختلاف راه نوری متناسب با زاویه رأس گوه بین دو پرتو نوری شکل خواهد گرفت.

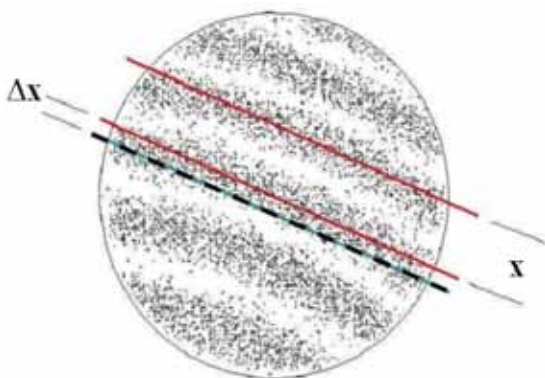


شکل ۱. نحوه شکل گیری نوارهای تداخلی تاریک و روشن در آزمایش های صافی سطح.

با توجه به شکل ۱، پرتو بازتابیده از سطح پایینی مسیر طولانی تری را نسبت به پرتو بازتابیده از سطح فوقانی طی می کند. طول مسیر اضافی طی شده توسط پرتو پایینی دو برابر اختلاف فاصله بین دو سطح در هر نقطه است. برای درک بهتر در شکل ۲، نمایی دوبعدی و جانبی از گوه

روابط (۵) مشخص کننده مکان هندسی نوارهای تداخلی تاریک و روشن در دو بعد هستند. حلقه‌های تداخلی تاریک و روشن شکل گرفته به این طریق به نام «حلقه‌های نیوتن» نیز شناخته می‌شوند. با افزایش  $R$ ، حلقه‌های نیوتونی شکل گرفته به تدریج بازتر شده تا در انتها به ازای شعاع انحنای برابر با بی‌نهایت به نوارهای تداخلی صاف حالت قبل تبدیل می‌شوند.

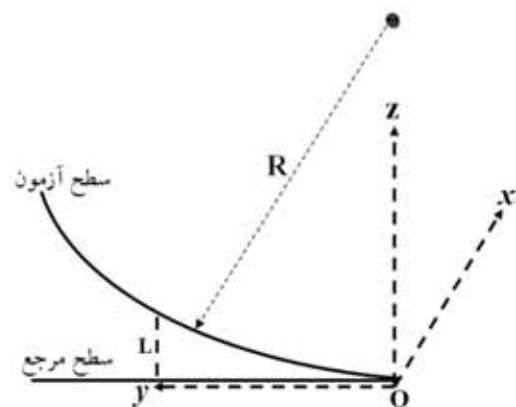
در آزمایش‌های صافی سطح استاندارد، بایستی نوارهای تداخلی انحنادار شکل گرفته ( $R$  بزرگ) به ازای روابط (۵) را با نوارهای صاف به دست آمده از روابط (۱) مقایسه کرد (شکل ۴). دو خط توپر به گونه‌ای رسم می‌شوند که



شکل ۴. روش کمی اندازه‌گیری صافی سطح.

مماس بر مرکز دو نوار تداخلی مجاور هم باشند. خط راست خط چین (پائین‌ترین خط) نیز بین دو نقطه لبه پائینی نوار تداخلی رسم می‌شود که مرز دایره‌ای را قطع می‌کنند. اگر فاصله بین دو خط توپر برابر با  $X$  و فاصله بین خطوط توپر و خط چین پائینی برابر با  $\Delta X$  باشد، میزان صافی سطح را می‌توان با محاسبه نسبت  $\Delta X/X$  سنجید. این نسبت به طور معمول برحسب نصف طول موج ( $\lambda/2$ ) بیان می‌شود. در حالت معمول، نسبت‌های

نوارهای تداخلی صافی شکل خواهند گرفت که به تدریج فاصله بین آن‌ها کاهش خواهد یافت. بایستی دقت داشت که در شرایط عملی سطح مرجع را با دقت بالایی تخت ( $\lambda/4$ ) و یا بالاتر) انتخاب می‌کنند، اما سطح آزمون معمولاً به طور



شکل ۳. هندسه آزمایش اندازه‌گیری صافی سطح برای سطح آزمون انحنادار.

کامل صاف نبوده و اندکی انحنادار خواهد بود. برای تعمیم روابط، این حالت در شکل ۳، نشان داده شده است. برای به دست آوردن  $L$  باید معادله دایره را در دستگاه مختصات نشان داده در شکل به دست آورد:

$$L = z = R - \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} \quad (4)$$

بنابراین تعمیم روابط (۵) تا (۷) به شکل زیر به دست خواهند آمد:

$$\left( R - \sqrt{R^2 - r^2} \right) = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \Rightarrow \text{نوار تاریک}$$

اگر

(۵)

$$\left( R - \sqrt{R^2 - r^2} \right) = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \text{نوار روشن}$$

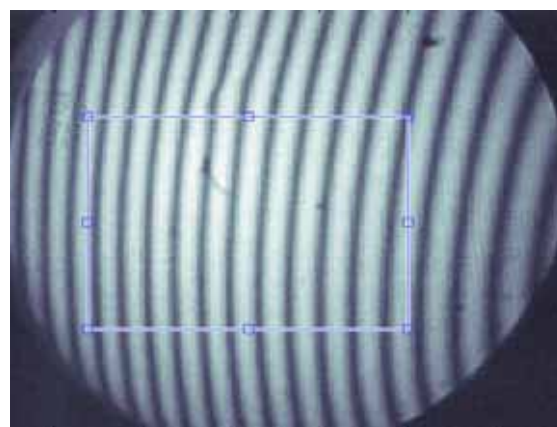
اگر

کیفیت ( $\lambda/4$ ) و با استفاده از تداخل سنج فیزو (مدل Moller-Wedel V-100) طرح نوارهای تداخلی انحنادار به دست آمده است. تداخل سنج فیزو ذکر شده پس از اعمال تغییرات مورد نیاز در سامانه، قابلیت اتصال به رایانه و ثبت دیجیتال طرح نوارهای تداخلی را به دست آورده است. در شکل ۵، یکی از طرح‌های نواری تداخلی ثبت شده توسط این تداخل‌سنج مشاهده می‌شود. برای تداخل‌سنج ذکر شده با استفاده از این روش یک رابط گرافیک کاربری به زبان متلب نوشته شده است که قابلیت کار با تداخل‌سنج را برای کاربران عادی نیز امکان پذیر سازد. با استفاده از این رابط کاربری می‌توان بخشی مستطیل شکل از نوارهای تداخلی را جدا نمود (شکل ۵). رابط کاربری سطح‌شدت نقاط ناحیه منطبق با طول پائینی مستطیل (شکل ۶-الف) و نیز تغییرات نوسانی در امتداد خطی که از میان دو عرض ناحیه مستطیل شکل عبور کرده و نوارهای تداخلی را قطع می‌کند (شکل ۷ الف)، به صورت خودکار به نمایش خواهد گذاشت. در صورتی که فاصله بین کمینه‌ها در شکل ۷-الف محاسبه شوند، مطابق با شکل ۴، قادر به محاسبه مقدار  $X$  خواهیم بود. علاوه بر این، در صورتیکه مکان نقاط کمینه در شکل ۶-الف مشخص شده و از مقادیر کمینه‌های متناظر آن‌ها در شکل ۷-الف کسر شوند، می‌توان مطابق با شکل ۴ مقدار  $\Delta X$  را محاسبه کرد.

$X$  و  $\Delta X$  به صورت دستی و توسط کاربر از روی طرح نوارهای تداخلی اندازه‌گیری می‌شوند. این فاصله‌ها معمولاً تنها برای دو نوار متوالی اندازه‌گیری شده و به دلیل احتمال خطای اندازه‌گیری کاربر، ممکن است چندان دقیق نباشند. اگر بتوان این فاصله‌ها را به صورت خودکار توسط الگوریتم‌های بینایی ماشین و با به کارگیری تعداد بیشتری از نوارهای تداخلی محاسبه کرد، صافی سطح محاسبه شده مقدار به مراتب دقیق‌تری خواهد داشت. در ادامه به توصیف روش مورد استفاده در این کار برای محاسبه خودکار این فواصل خواهیم پرداخت.

### ۳. نتایج تجربی و توصیف روش خودکار محاسبه صافی سطح

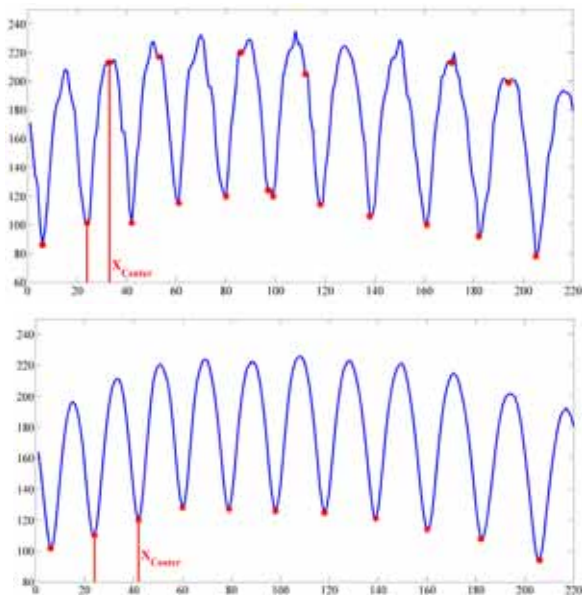
برای به دست آوردن خودکار میزان صافی سطح، ابتدا با استفاده از سطح مرجع با کیفیت ( $\lambda/20$ ) و سطح آزمون



با

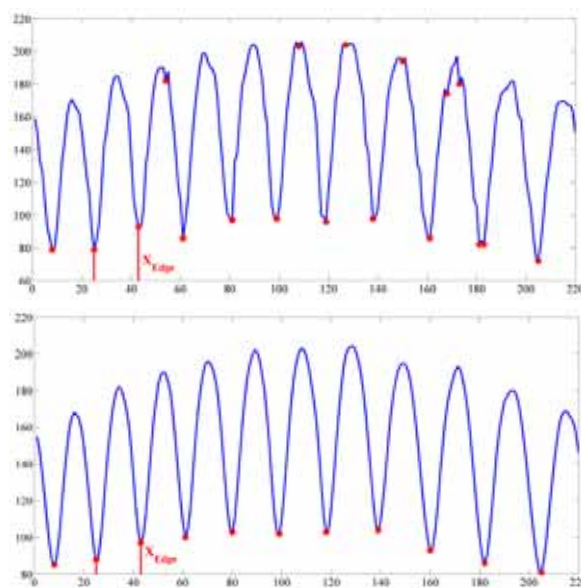
شکل ۵. امکان انتخاب ناحیه دلخواه از نوارهای تداخلی برای انجام محاسبات مربوط به کیفیت سطح.

این الگوریتم با ستاره مشخص شده‌اند. علاوه بر این با شناسایی خودکار نقاط کمینه، نقاط کمینه دوم و سوم به صورت خودکار مکان‌یابی شده و روی شکل‌ها نشان داده می‌شوند. بایستی



شکل ۷. تغییرات نوسانی و مکان کمینه‌های شناسایی شده در امتداد خط عبور کرده از میان دو عرض مستطیل الف) پیش و ب) پس از اعمال صافی میانگین.

دقت داشت که تصاویر طرح‌های تداخلی ثبت شده توسط تداخل‌سنج در شرایط عملی دارای نوفه خواهند بود. همانطور که در شکل‌های ۶- الف و ۷- الف مشخص است به علت وجود این نوفه‌ها الگوریتم قادر به تشخیص دقیق محل کمینه‌ها نبوده و کمینه‌های محلی را نیز به عنوان کمینه اصلی شناسایی می‌کند. برای رفع این مشکل می‌توان از الگوریتم‌های پردازش تصویر برای حذف نوفه‌ها از طرح‌های تداخلی ثبت شده استفاده کرد و سپس الگوریتم شناسایی خودکار کمینه‌ها را به کار گرفت. در رابط گرافیکی تهیه شده برای تداخل-سنج، امکان استفاده از صافی‌های میانگین و میانه در



شکل ۶. تغییرات نوسانی و مکان کمینه‌های شناسایی شده در امتداد طول پائینی مستطیل الف) پیش و ب) پس از اعمال صافی میانگین.

بنابراین در صورت تعیین مبتنی بر بینایی ماشین مکان کمینه‌ها در این دو شکل می‌توان میزان ناصافی سطح را به شکل خودکار محاسبه کرد. علاوه بر این باید دقت داشت که محاسبه مقادیر  $X$  و  $\Delta X$  به این روش با میانگین‌گیری روی مقادیر آن‌ها به ازای تمامی نوارهای تداخلی محصورشده درون ناحیه مستطیل‌شکل امکان‌پذیر خواهد بود که دقت محاسبات را نسبت به حالت دستی افزایش خواهد داد. برای تعیین خودکار مکان نقاط کمینه در این دو شکل، می‌توان سطح شدتی اولین سه‌داده سمت چپ را با یکدیگر مقایسه کرد. اگر سطح شدت داده وسط از سطح شدت دو نقطه دیگر کمتر باشد، نقطه وسط نشان‌دهنده کمینه خواهد بود. اگر این کار را برای سه نقطه بعدی و تا انتهای کل داده‌ها تکرار نماییم، کلیه نقاط کمینه به دست خواهد آمد. در شکل-های ۶- الف و ۷- الف مکان نقاط کمینه شناسایی شده با

صافی سطح با استفاده از روش خودکار در حدود  $\frac{\lambda}{4.3}$  به دست آمده است که نشاندهنده عملکرد دقیق آن است.

#### ۴. نتیجه گیری

در این کار به توصیف روش خودکار ارائه شده برای اندازه گیری صافی سطح قطعات نوری پرداخته شده است. با توجه به آنکه این روش با شناسایی خودکار نوارهای تداخلی، مقدار صافی سطح را با میانگین گیری روی تعداد زیادی نوار محاسبه می کند، اندازه گیری از طریق آن دقیق تر و فاقد خطاهای انسانی در روش های معمول خواهد بود.

ابعاد  $3 \times 3$ ،  $5 \times 5$  و  $7 \times 7$  فراهم شده است. منظور از صافی های میانگین و میانه، ماتریس هایی  $n \times n$  است که در آن  $n$  عددی فرد است. می توان اینطور در نظر گرفت که هر پیکسل از تصویر طرح تداخلی توسط یک ماتریس  $n \times n$  احاطه شده است. در مورد صافی میانگین، این ماتریس  $n \times n$  از تصویر طرح تداخلی در صافی میانگین ضرب و بر تعداد مؤلفه های ماتریس (عدد ۹) تقسیم شده و نتیجه آن جایگزین پیکسلی می شود که در مرکز قرار دارد. در مورد صافی میانه، اعضای ماتریس  $n \times n$  طرح تداخلی احاطه کننده هر پیکسل، از کوچک به بزرگ مرتب سازی می شوند. عددی که در میانه آرایه مرتب شده قرار گرفت جایگزین مقدار پیکسل می شود. عملیات های ذکر شده برای صافی های میانگین و میانه، برای تمام پیکسل های تصویر به نوبت تکرار می شوند. بایستی دقت داشت که با استفاده از صافی های با ابعاد بزرگ تر، تصویر صاف تر شده ولی از جزئیات آن کاسته می شود. تعداد دفعات اعمال صافی نیز نباید آنقدر زیاد باشد که جزئیات و اطلاعات اصلی طرح تداخلی را از بین ببرد. [۸]

شکل های ۶-ب و ۷-ب، داده های شکل های ۶-الف و ۷-الف را پس از یک بار اعمال صافی میانگین  $3 \times 3$  نشان می دهند. همانطور که قابل مشاهده است، الگوریتم خودکار محل نقاط کمینه را به صورت صحیح شناسایی کرده است. پس از شناسایی صحیح این نقاط و با تأیید کاربر، رابط گرافیکی مقدار صافی سطح را محاسبه و نشان خواهد داد. برای قطعه آزمون استاندارد با صافی سطح  $\frac{\lambda}{4}$  مورد استفاده در این کار، مقدار

## مراجع

- [1] Hariharan, P. "Optical Holography: Principles, techniques and applications", Cambridge University Press, (1996).
- [2] Medicus, K.M., et al. "The effect of phase change on reflection on optical measurements." *Optics & Photonics 2005*. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [3] Hariharan, P., *Basics of interferometry*. Academic Press, 2010.
- [4] Gomez G., "Automatic feature construction and a simple rule induction algorithm for skin detection." *Proc. of the ICML workshop on Machine Learning in Computer Vision*. 2002.
- [5] Poon, T.C. "On the fundamentals of optical scanning holography." *American Journal of Physics* 76.8 , 2008 pp, 738-745. [6] Mishchenko, Y.V. "Method of measuring the refractive index of glass plates." *Measurement Techniques* No, 33.8 ,1990, pp.803-808.
- [7] P. Yoder, "Opto-Mechanical System Design", Marcel Dekker, Inc., 2nd edition 1993.
- [8] Gonzalez, Woods, and Richard E. Woods. "Eddins, Digital Image Processing Using MATLAB." *Third New Jersey: Prentice Hall* (2004).