



اندازه‌گیری لیزری قطر تارنوری با استفاده از الگوی پراش

محسن کاظمی^۱، لاله رحیمی‌نژاد^۱، سید علی اصغر عسکری^۱ و محمد عابدی^۱

^۱ پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

چکیده- تعیین دقیق قطر تارهای نوری از موارد حائز اهمیت در بسیاری از کاربردهای این قطعات می‌باشد. با این وجود روش‌های مکانیکی، هم به دلیل کوچکی اندازه و هم از نظر امکان آسیب به تارهای نوری، انتخاب‌های چندان مناسبی برای این منظور نمی‌باشند. در مقابل روش‌های نوری مبتنی بر اثرات تداخل و پراش راهکارهای بسیار سریع، دقیق و ایمنی برای اندازه‌گیری قطر تارهای نوری محسوب می‌شوند. در این کار به تعیین نوری قطر یک تار نوری استاندارد با وجود غلاف و بدون غلاف، با استفاده از پردازش تصویر مربوط به نقش پراش حاصل از تابش مستقیم نور لیزر هلیوم-نئون به آن، می‌پردازیم. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نزدیکی بسیار زیادی را با اندازه‌های واقعی نشان می‌دهند.

کلید واژه- اندازه‌گیری لیزری، پردازش تصویر، تارنوری، طرح پراش

Laser measurement of fiber diameter by diffraction pattern

M. Kazemi¹, L. Rahiminejad¹, A. A. Askari¹ and M. Abedi¹

¹ Optics & Laser Science and Technology Research Center, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan

Abstract- A safe and highly accurate method is essential for determining the diameter of an optical fiber. Mechanical methods are not applicable for this work, because of the optical fiber surface damage that can result during a mechanical measurement process. On the other hand, optical measurement methods, based on the interference and diffraction effects, are known as very accurate, rapid and safe techniques for measuring the diameter of optical fibers. In this work, we analyze the diffraction pattern, resulting from illuminating an optical fiber by a He-Ne laser, to measure the diameters of a standard optical fiber with and without the buffer layer. The laser measurement results show a very good agreement with the absolute sizes.

Keywords: Diffraction Pattern, Fiber Optic, Image Processing, Laser Measurement

۱- مقدمه

مانعی بر سر راه نور لیزر محسوب شده و منجر به ایجاد اثرات پراش می‌گردد. بنابراین طرح مشاهده‌شده بر روی پرده نتیجه‌ی ترکیبی از اثرات تداخل و پراش است. بنابر اصل باینه می‌دانیم که طرح پراش فرانهوفری مربوط به یک مانع با طرح پراش روزنه‌ی هم‌شکل و هم‌اندازه‌ی آن یکسان است. بنابراین توزیع شدت کل در نقطه‌ای بر روی پرده با زاویه‌ی θ نسبت به محور گذرنده از مرکز تار نوری و عمود بر پرده به صورت [۳]:

$$I = I_0 (\sin \beta / \beta)^2 \cos^2(\delta/2) \quad (1)$$

است. در رابطه‌ی (۱) I_0 بیشینه‌ی شدت، $\cos^2(\delta/2)$ جمله‌ی مربوط به تداخل و $(\sin \beta / \beta)^2$ جمله‌ی مربوط به اثر پراش است که در آن برای طول موج کاری λ و تار نوری با قطر d ، $\beta = \pi d \sin \theta / \lambda$ است. شکل ۲ طرح تداخلی دو شکاف و نیز نقش پراش یک مانع استوانه‌ای را به صورت جداگانه نشان می‌دهد.



شکل ۲: (الف) نقش پراش یک میله‌ی استوانه‌ای (ب) طرح تداخلی یانگ.

در شکل ۲ (الف)، برای زوایای کوچک θ (نقاط اطراف مرکز نقش) داریم $\sin \theta \cong X/L$ که در X فاصله‌ی نقطه‌ی موردنظر تا مرکز نقش پراش است. بنابراین با توجه به رابطه‌ی (۱) و با استفاده از تعریف β نقاط کمینه‌ی نقش پراش در فواصل

$$Y = \pm \lambda L / d, \pm 2\lambda L / d, \pm 3\lambda L / d, \dots \quad (2)$$

از مرکز نقش قرار می‌گیرند. عرض هر فریز در طرح تداخلی نمایش داده‌شده در شکل ۲ (ب) نیز از عبارت

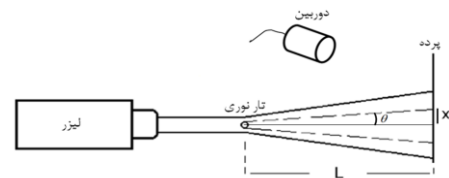
$$\Delta y = \lambda L / D \quad (3)$$

حاصل می‌شود که در آن D فاصله‌ی بین مرکز دو روزنه‌ی تشکیل‌شده در دوسوی تار نوری است. با توجه به‌اندازه‌ی بسیار کوچک قطر تار نوری در مقایسه با قطر لکه‌ی لیزر از رابطه‌ی (۲) و (۳) مشخص است که فاصله‌ی دو کمینه‌ی متوالی در نقش پراش بسیار بزرگ‌تر از عرض فریزهای

قطر مغزی، رویه و حتی غلاف بیرونی از مهم‌ترین مشخصه‌های یک تار نوری می‌باشند. قطر یک استوانه‌ی میکرومتری مانند یک سیم نازک و یا تار نوری را می‌توان با استفاده از ابزار و یا روش‌های متنوعی اندازه‌گیری کرد. درهرحال بسیار مهم است که روش اندازه‌گیری به حد کافی دقیق و به‌راحتی قابل تکرار بوده و بدون وارد شدن هرگونه آسیبی به جسم مورداندازه‌گیری باشد. روش‌های نوری ازجمله بهترین انتخاب‌ها برای این منظور می‌باشند. در اغلب روش‌های نوری اندازه‌گیری قطر بر پایه‌ی دو پدیده‌ی تداخل و پراش انجام می‌شود که هر یک مزایا، معایب و نیز دقت خاص خود را دارند [۱ و ۲]. هرچند که روش تداخل از دقت بسیار بالایی برخوردار است، اما به ابزارهای مکانیکی بسیار حساس و دقیقی احتیاج دارد که حساسیت آن به عوامل خارجی را بسیار افزایش می‌دهد. اما در سوی دیگر استفاده از الگوی پراش، به‌منظور اندازه‌گیری قطر، روشی بسیار ساده‌تر، با حساسیت پایین‌تر به شرایط محیطی و البته با دقت کافی است. در این کار به شرح و اجرای نمونه‌ای از اندازه‌گیری قطر یک تار نوری، باوجود غلاف و پس از برداشتن غلاف، با استفاده از پردازش تصویر نقش پراش حاصل از برخورد باریکه‌ی لیزر به تار نوری پرداخته خواهد شد. نتایج به‌دست‌آمده با قطر اندازه‌گیری شده توسط میکروسکوپ نوری نیز مقایسه شده و نزدیکی بسیار مطلوبی را نشان می‌دهند.

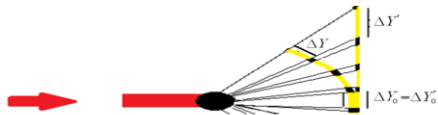
۲- چیدمان تجربی و اصول نظری

شکل ۱ چیدمان تجربی مربوط به اندازه‌گیری قطر تار نوری را نشان می‌دهد [۱].



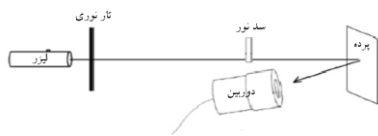
شکل ۱: چیدمان تجربی اندازه‌گیری قطر تار نوری [۱].

همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است، وجود تار نوری بر سر راه باریکه‌ی موازی نور لیزر باعث ایجاد دو شکاف در دو سوی تار می‌گردد. بدین ترتیب ایجاد طرح تداخلی یانگ بر روی پرده دور از انتظار نیست. از سویی خود تار نوری نیز

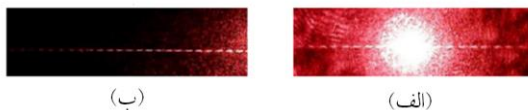


شکل ۳: تغییر فاصله‌ی نقاط کمینه با استفاده از پرده‌ی تخت.

استفاده از ابزارهایی مانند سد کننده‌ی نور، ادوات کاهنده‌ی نور و حتی افزایش فاصله‌ی پرده از تار نوری می‌باشند. هرچند که از این میان ساده‌ترین راه کار قرار دادن پرده در فاصله‌ی دورتری است، اما این روش، به دلیل نیاز به فضای زیاد چپش، از لحاظ صنعتی‌سازی اصلاً توصیه نمی‌شود. در این کار از روش انسداد نور استفاده شده است. از آنجایی که نقش پراش یک الگوی کاملاً متقارن است، می‌توان فقط با داشتن یک‌نیمه از آن نیز محاسبات را انجام داد. با قرار دادن یک مانع بر سر راه نور پراشیده شده از تار نوری یک‌نیمه از نقش پراش حذف و تباین تصویر در مرکز نیمه‌ی باقی‌مانده‌ی نقش بسیار بالاتر خواهد رفت [۴]. شکل ۴ چیدمان مربوط به این آزمایش را به صورت طرح‌واره نمایش می‌دهد. در شکل ۵ نمونه‌ای از نحوه‌ی افزایش وضوح نقاط مرکزی نقش پراش با استفاده از مانع مناسب را می‌بینیم.



شکل ۴: نحوه‌ی قرارگیری سد نور در سر راه نور پراشیده شده از تار نوری.



شکل ۵: تأثیر قرار دادن مانع بر سر راه یک‌نیمه‌ی الگوی پراش: تصویر ثبت‌شده‌ی طرح پراش (الف) در حالت عادی (ب) با استفاده از سد نور [۴].

۴- نتایج آزمایشگاهی و استخراج اطلاعات

برای انجام محاسبات تعیین قطر به صورت خودکار، به سراغ بینایی ماشین می‌رویم که مبنای آن تحلیل تصاویر اجسام تحت کنترل است. برای مورد بخصوص تعیین قطر، باید عرض فریز تشکیل‌شده را به شکل دقیق اندازه‌گیری کنیم و با وارد کردن مقادیر مشخص فاصله‌ی پرده تا تار نوری و نیز طول موج منبع نور تابیده شده، نرم‌افزار قادر به محاسبه‌ی یک عدد به عنوان قطر تار نوری با استفاده از رابطه‌ی (۴) خواهد بود. بنابراین کیفیت تصویر ثبت‌شده از

تداخلی بوده و تاریک و روشن‌های متوالی و خیلی نزدیک به یکدیگر مربوط به طرح تداخلی در داخل نقش پراش که بسیار واضح‌تر است قرار می‌گیرند. بدین ترتیب طرح قابل مشاهده بر روی پرده و مناسب مطالعه همان نقش پراش از تار نوری است. از عبارت (۲) نتیجه می‌گیریم که با در اختیار داشتن نقش پراش امکان محاسبه‌ی قطر تار نوری با استفاده از رابطه‌ی

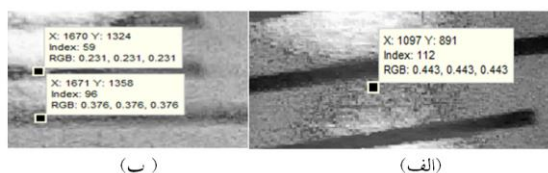
$$d = a\lambda L / \Delta Y \quad (4)$$

وجود خواهد داشت که در آن ΔY فاصله‌ی دو کمینه‌ی متوالی در نقش پراش مربوط به تار نوری مورد نظر است. در رابطه‌ی (۴) ضریب ثابتی است که در صورت اندازه‌گیری فاصله‌ی بین دو کمینه‌ی مرکزی مقدار دو و در صورت استفاده از فاصله‌ی دو کمینه‌ی متوالی دیگر مقدار یک را به خود می‌گیرد.

۳- ثبت و مناسب‌سازی نقش پراش

الگوی پراش ایجادشده روی پرده، تنها مرجع اندازه‌گیری قطر در این روش است. بنابراین دقت نهایی اندازه‌گیری به شدت به کیفیت و وضوح الگوی مورد بررسی وابسته است. از تقریب به کاررفته برای $\sin \theta$ مشخص است که در واقع نقش پراش، با مشخصات مربوط به عبارت (۲)، بر روی سطح یک کره به مرکز نقطه‌ی برخورد باریکه‌ی نور به تار نوری و شعاع L تشکیل می‌شود. بنابراین برای استفاده از رابطه‌ی (۴) یا باید پرده‌ای کروی با مرکز قرار گرفته بر روی تار نوری داشته باشیم و یا مقدار اندازه‌گیری شده بر روی پرده‌ی تخت، ΔY را به مقدار مناسب ΔY تبدیل کنیم. شکل ۳ نحوه‌ی این تغییر را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، در صورت استفاده از پرده‌ی تخت، تنها اندازه‌گیری عرض فریز مرکزی به قدر کافی دقیق خواهد بود. اما مشکل اصلی کار با این فریز این است که با استفاده از لیزر، شدت فریز مرکزی به حدی بالا خواهد بود که صفحه‌ی حساس به نور دوربین مورد استفاده را به اشباع رسانده و تشخیص نقاط کمینه در این بخش از تصویر را غیرممکن می‌سازد. بنابراین لازم است که پیش از ثبت تصویر تباین نقاط مرکزی طرح پراش با استفاده از روش مناسبی افزایش یابد. از جمله روش‌های مناسب برای انجام این کار

شد. در نهایت از قرار دادن این مقدار در رابطه‌ی (۴) (با مقدار $a=1$) به سادگی قطر تار نوری محاسبه می‌گردد. شکل ۷ نمونه‌ای از تصویر ثبت‌شده از طرح پراش در مقیاس خاکستری را نشان می‌دهد. با این روش قطر تار نوری دارای غلاف با مقدار اسمی ۲۵۰ میکرومتر را $248/2$ میکرومتر و قطر همان تار نوری پس از برداشتن غلاف با مقدار واقعی ۱۲۵ میکرومتر (اندازه‌گیری شده با میکروسکوپ) را $123/24$ میکرومتر تعیین کردیم. لازم به ذکر است که، مقادیر ارائه‌شده به‌عنوان قطر در واقع حاصل میانگین‌گیری بر روی نتایج حاصل از پردازش پنج تصویر ثبت‌شده از هر تار نوری می‌باشند. بازه‌ی تغییرات مقادیر حاصل از پردازش تصاویر مختلف برای تار نوری دارای غلاف و بدون غلاف به ترتیب برابر با $2/3$ و $4/2$ میکرومتر می‌باشند.



شکل ۷: (الف) پیدا کردن دو کمینه‌ی متوالی در تصویر (ب) محاسبه‌ی ابعاد نسبی هر پیکسل نسبت به معیار.

۵- نتیجه‌گیری

در این کار از پردازش نقش پراش حاصل از برخورد نور لیزر به یک تار نوری برای اندازه‌گیری قطر آن با وجود غلاف و پس از برداشتن غلاف استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری بستگی به مواردی همچون دقت کالیبره کردن تصویر، انتخاب بخش مناسب تصویر برای پردازش و نیز وضوح تصویر دارد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری لیزری نزدیکی بسیار خوبی را به مقادیر واقعی نشان می‌دهند.

مراجع

- [1] S. A. Khodier, "Measurement of wire diameter by optical diffraction", *Optics & Laser Technology*, Vol. 36, No.1, pp. 63 – 67, 2004.
- [2] D. Butler and G. Forbes, "Fiber-diameter measurement by occlusion of a Gaussian beam", *Appl. Opt.*, Vol. 37, No.13, pp. 2598-25606, 1998.
- [3] Eu. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, 2002.
- [4] Y. Wu, J. Ma and Y. Yang, "Improvements of measuring the width of Fraunhofer diffraction fringes using Fourier transform", *Optik*, Vol. 126, No.23, pp. 4142–4145, 2015.

الگوی پراش، به‌عنوان مرجع محاسبات یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در دقت اندازه‌گیری است. در این کار از مسدودنمودن بخشی از نور پراشیده‌شده برای افزایش تباین تصویر استفاده شد. نکته‌ی مهم بعدی در دقت قطر به‌دست‌آمده، انتخاب کمینه‌های مناسب جهت اندازه‌گیری فاصله و استفاده در محاسبات رابطه‌ی (۴) می‌باشد. به دلیل استفاده از پرده‌ی تخت مطلوب است که از اندازه‌گیری فریز مرکزی استفاده کنیم. اما از طرفی فریز مرکزی از لحاظ وضوح و اندازه، به‌ویژه در صورت استفاده از روش سد نور، قابل اطمینان نیست. بنابراین باید فریز دیگری را انتخاب و تغییر ایجادشده در عرض آن، به دلیل استفاده از پرده‌ی تخت، را در محاسبات لحاظ کنیم. در این کار از اندازه‌ی فریز اول در محاسبات استفاده شده است. شکل ۶ بخش مطلوب تصویر، شامل فریز اول به‌علاوه‌ی نیمی از فریز مرکزی و نیمی از فریز دوم، ثبت‌شده از نقش پراش تار نوری مورد بررسی در آزمایشگاه با استفاده از لیزر He-Ne و با مسدود کردن نیمی از نور پراشیده شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که می‌دانیم، از روی تصویر تنها می‌توان به فاصله‌ی پیکسلی دونقطه دست‌یافت. برای تبدیل فاصله‌ی دو پیکسل به فاصله‌ی متری دو نقطه دو روش وجود دارد. در روش اول یک خط‌کش نیز در کنار طرح پراش قرار گرفته و فاصله‌ی پیکسلی نقاط موردنظر با فاصله‌ی پیکسلی شاخص‌های خط‌کش مقایسه می‌شود. در روش دوم ابتدا دوربین را در مکان مناسب قرار داده و بدون تشکیل الگوی پراش تنها از خط‌کش یک تصویر می‌گیریم و فاصله‌ی پیکسلی دو خط



شکل ۶: نحوه‌ی انتخاب بخش مناسب تصویر برای تعیین فاصله‌ی نقاط کمینه.

شاخص را در تصویر مربوط به خط‌کش تعیین می‌کنیم. حال معیار را از صحنه حذف کرده و تنها با حضور طرح پراش تصویر را ثبت می‌کنیم. پردازش تصاویر حاصل را با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام داده‌ایم. برای این کار ابتدا تصویر را به مقیاس خاکستری برده و محل دقیق دو پیکسل متوالی با کمینه‌ی روشنایی را در تصویر پیدا می‌کنیم. با تکرار همین عمل برای تصویر خط‌کش ضریب تناسب لازم برای تبدیل فاصله‌ی پیکسلی به فاصله‌ی طولی به‌راحتی حاصل خواهد