

مجله فیزیک کاربردی دانشگاه الزهراء (س)
شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۲

بررسی میکروسکوپ رقومی و کاربرد آن در شکل گیری تصویر و اندازه گیری

آزاده صحتی^۱
حسین گل نبی^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۹

تاریخ تصویب: ۹۲/۴/۱۳

چکیده: در این مقاله به کمک نوعی میکروسکوپ رقومی که مجهز به حسگر تصویربرداری CCD است، به مطالعه و بررسی خصوصیات فیزیکی تصاویر اجسام ریز می پردازیم. با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر به عکس برداری و اندازه گیری ابعاد اجسام در مقیاس پیکسلمی پردازیم. در آزمایش های اندازه گیری ابعادی، تماس مستقیم آزمایشگر با نمونه موجب بروز خطاهایی در آزمایش می شود. اما در روش اندازه گیری به کمک عکس برداری، بدون تماس فیزیکی، اندازه جسم مورد مطالعه را می توان با حداقل خطا

^۱ کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران شمال؛ az_sehati@yahoo.com

^۲ استاد مرکز تحقیقات آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف؛ golnabi@sharif.edu

تعیین کرد. استفاده از میکروسکوپ مجهز به CCD می‌تواند موجب افزایش کیفیت تصویر گرفته شده و در نتیجه بالا بردن دقت نتایج گردد. به هر حال، این روش نیز همچون سایر روش‌ها با درصدی خطا همراه است.

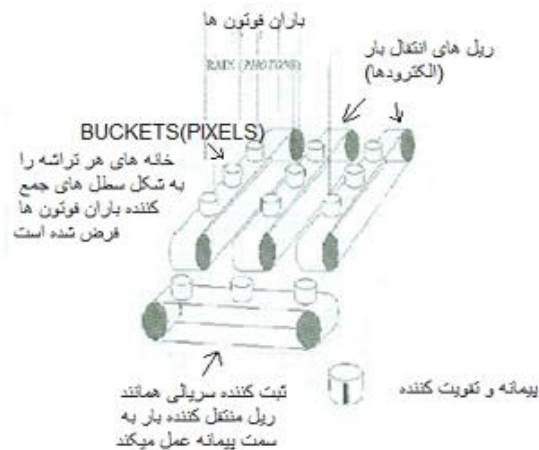
واژه‌های کلیدی: میکروسکوپ رقومی، نرم افزار آنالیز تصویر، اجسام ریز، عکس برداری، پیکسل، دوربین CCD.

۱. مقدمه

اواخر دهه ۶۰ میلادی، CCD یا دستگاه جفت شده باری در آزمایشگاه بل (Bell) اختراع شد. ابتدا این وسیله به عنوان نوع جدیدی از مدارهای حافظه‌های کامپیوتری تکوین یافت و به مرور زمان پتانسیل‌های بیشتری از خود به نمایش گذاشت که از جمله آن می‌توان به پردازش سیگنال‌ها و قابلیت تصویربرداری آن اشاره کرد. در آغاز CCDها، به صورت بسته‌ها یا تراشه‌های نازک سیلیکونی تهیه می‌شدند. بر روی هر تراشه تعداد مشخصی ابزار که هر کدام یک عملکرد مخصوص به خود را داشتند قرار داده می‌شد. اما CCDها چون از جنس سیلیکون هستند نسبت به نور حساس می‌شوند، یک تکنولوژی آنالوگ که تصاویری بسیار شفاف با دقت بالا را ارائه می‌دهد. از این دستگاه در ساخت دستگاه‌های تصویربرداری برای خلق تصاویر، ذخیره اطلاعات و یا انتقال بار الکتریکی استفاده می‌شود [1].

هنگامی که نور به صفحه CCD برخورد می‌کند و الکترون‌ها آزاد می‌شوند روی یک سری ریل‌های متحرک در سرتاسر صفحه حسگر قرار می‌گیرند. این ریل‌ها متناسب با الکترودهای موجود بر سطح تراشه هستند. با پایان رسیدن زمان نوردهی، این ریل‌ها یا دستگاه‌های انتقال به حرکت در می‌آیند و الکترون‌های به دست آمده را درون سطل‌های اندازه‌گیری منتقل می‌کنند و آن‌جا شمارش می‌شوند. تعداد الکترون‌های هر خانه متناسب

با تصویر قسمت‌های مختلف شیء است. بنابراین تصویر نهایی به دست آمده بعد از خوانده شدن هر خانه (که به صورت سیاه و سفید تشکیل می‌شود) متناسب با تصویر اصلی است. در واقع تعداد الکترون‌های هر خانه به صورت آرایه ای در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تا یک تصویر بسازند (شکل ۱) [2].



شکل ۱. نحوه تشکیل و جمع‌آوری الکتروفتون‌ها و انتقال به محل شمارش [2].

۱-۱. فرمت تصویر

تراشه CCD مجموعه ای از خانه‌ها یا پیکسل‌ها است. که به صورت ردیفی و ستونی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و تصویر CCD نیز آرایه ای از پیکسل‌ها است که به صورت ردیفی و ستونی در کنار یکدیگر مرتب شده‌اند. هر خانه یا پیکسل در تصویر با عددی توصیف می‌شود که متناسب است با مقدار نور فرودی بر روی خانه متناظر با آن بر روی تراشه CCD. تصویر CCD را میتوان به صورت آرایه ای دو بعدی از اعداد در نظر گرفت. محل هر خانه‌ی مجزا از تصویر به مقداری از X و Y از مبدأ مشخص می‌شود. گاهی به جای X و Y از ردیف و ستون یاد می‌شود. مبدأ را معمولاً از گوشه ی پایین سمت چپ تصویر در نظر می‌گیرند. درخشندگی هر خانه با یک عدد بیان می‌شود. اندازه فایل کامپیوتری تصویر بستگی به نوع عددی دارد که برای ذخیره سازی تصویر مورد استفاده

قرار می‌گیرد. تصویر خام خوانده شده از CCD معمولاً به شکل یک عدد صحیح ذخیره می‌شود. چنین تصاویری اغلب به صورت اعداد صحیح ۲ بیتی (۱۶ بیتی) ذخیره می‌شوند. بنابراین مقداری که هر خانه می‌تواند بپذیرد حداکثر $2^{16} = 65536$ است. یعنی هر خانه مقداری صحیح بین ۰ تا ۶۵۵۳۵ را برای تعیین مقدار شدت می‌پذیرد. اگر فرض کنیم یک CCD با آرایه 1024×1024 را داشته باشیم، آنگاه نیازمند $1024 \times 1024 \times 2$ یعنی ۲ مگابایت حافظه برای ذخیره‌سازی هستیم [3].

۱-۲. نسبت سیگنال به نویز

سیگنال در تصویر CCD به تعداد فوتون‌هایی که هر خانه می‌شمارد، گفته می‌شود. اولین واکنشی که تصویربرداران به CCD نسبت به دوربین‌های عکاسی (با فیلم) نشان می‌دهند سرعت بالا در آشکار کردن تصاویر اجرام ضعیف است. به خاطر حساسیت بالای CCD و پاسخگویی خطی آن‌ها تقریباً هر نوردهی نتیجه‌ای شبیه به هم دارد. اما تفاوت عمیقی بین تصویری که تنها جرم را در بر گرفته و تصویری که توانایی‌های CCD را به طور کامل برای نمایش دادن جزئیات با شدت قابل قبولی به کار برده وجود دارد. در واقع این نسبت S/N است که تفاوت بین تصویر ضعیف و عالی را نشان می‌دهد. سیگنال در تصویر CCD به تعداد فوتون‌هایی که هر خانه می‌شمارد، گفته می‌شود. حتی اگر یک خانه در برابر منبع نوری ثابت قرار داشته باشد، مقدار دقیق عددی فوتون‌هایی که در فاصله‌های زمانی معین ثبت می‌شوند بدون هیچ‌گونه پیش‌بینی تغییر می‌کند. از آن‌جا که این قسمت تصادفی سیگنال قابلیت دوباره تولید شدن را ندارد، نمی‌توان آن را از سیگنال حذف کرد. بنابه تعریف این مقدار غیر قابل پیش‌بینی نوسان‌ها، همان نویز است [4].

۱-۳. طبیعت آماری نویز

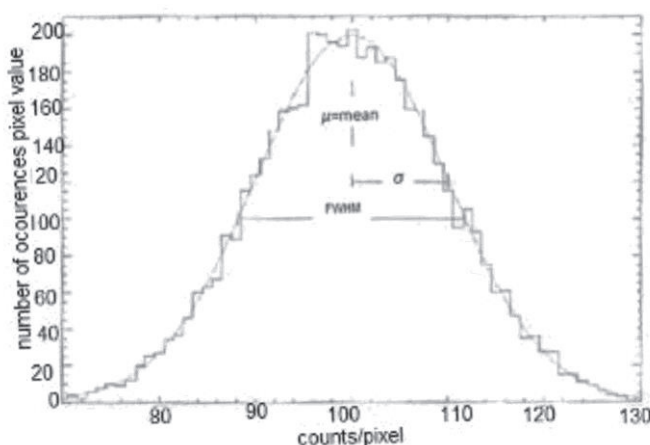
نسبت S/N روشی است که میزان کیفیت تصویر را تشریح می‌کند و مشخص می‌سازد با چه دقتی می‌توانیم تفاوت درخشندگی بین یک خانه و خانه بعدی را تعیین کنیم. هنگام نوردهی اگر یک خانه، مقدار ۱۰۰ فوتون را ثبت می‌کند و خانه بعدی ۹۰ فوتون و در هر

دو مقدار به اندازه ± 10 فوتون عدم قطعیت باشد، بنابراین برای تشخیص مقدار درخشندگی نور فرودی بر روی ۲ خانه اختلاف خواهیم داشت. اگر ما چندین تصویر از یک منبع نوری در شرایط یکسان معین تهیه کنیم، متوجه می‌شویم که مقدار درخشندگی هر خانه، حول یک اندازه مشخص تغییر می‌کند. مقادیر منحرف شده از تعداد دفعات اندازه‌گیری مختلف را در یک نمودار توزیع رسم می‌کنند. در این نمودار محور X نشان‌دهنده تعداد فوتون‌های شمارش شده در هر بار اندازه‌گیری و محور Y نشان‌دهنده تعداد دفعات مشاهده شده برای هر مقدار اندازه‌گیری شده است. در واقع شکل نمودار به دست آمده از پراکندگی مقادیر با معادله گوسی به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$p = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در این جا μ مقدار متوسط یا میانگین و σ انحراف معیار است [4]. اگر مقدار میانگین، یا مقدار میانی نمودار گوسی نشان‌دهنده سیگنالی باشد که برای به دست آوردن آن تلاش کرده‌ایم، آنگاه پهنای نمودار یا انحراف معیار نمودار مشخص کننده نویز است. شکل (۲) نمودار فوتون‌های فرودی بر روی خانه‌های یک CCD است. این نمودار نشان دهنده توزیع شمارش‌های اندازه‌گیری شده بر روی یک تعداد از خانه‌های CCD در یک بار نوردهی است. در این جا فرض شده که هر خانه شبیه به خانه‌های اطراف عمل می‌کند و نور به طور یکنواخت بر روی تمامی خانه‌ها افتاده است. منحنی نقطه‌چین صاف بهترین انطباق نمودار گوسی بر روی پراکندگی است. بر روی نمودار چندین کمیت مشخص شده است: مقدار متوسط یا میانگین و دو روش برای مشخص کردن پهنای نمودار: اول σ ، مولفه‌ی پهنای تقریب گوسی شکل نمودار و دوم پهنای کامل در نصف مقدار بیشینه که با FWHM نشان می‌دهند. اندازه FWHM به طور ساده دامنه کامل بر روی محور X بین نقاطی است که مقدار Y به نصف مقدار بیشینه نزول می‌کند. رابطه بین پراکندگی σ با تعداد فوتون‌های چنین است:

$$\sigma = \sqrt{n} \quad (2)$$



شکل ۲. نمودار توزیع گوسی شمارش‌های اندازه‌گیری شده بر روی تعداد از خانه‌ها در یک بار نوردهی.

اکنون به آسانی با توجه به رابطه گفته شده برای پراکندگی (σ)، اگر n فوتون شمارش شده باشد، مقدار نویز برابر \sqrt{n} خواهد بود و از این رو، نسبت سیگنال دریافتی به نویز عبارت است از:

$$S/N = \frac{n}{\sqrt{n}} = \sqrt{n} \quad (۳)$$

افزایش زمان نوردهی یکی از راه‌های رسیدن به نسبت S/N بهتر است. اگر زمان نوردهی را ۲۰ مرتبه زیادتر کنیم به تبع آن تعداد فوتون‌هایی که هر در خانه ثبت می‌شود، بیشتر می‌شود با این تصویری بهتر خواهیم داشت [4].

۲. میکروسکوپ رقومی

میکروسکوپ مجهز به یک حسگر تصویربرداری "CCD" است. از یک مدار یکپارچه شامل آرایه‌ای از اتصالات یا خازن‌های حساس متصل به هم تشکیل شده است. این دستگاه را دستگاه رنگ بردار هم می‌نامند. CCD یکی از ثمرات فیزیک حالت جامد است که کاربردهای بسیاری در سیستم‌های الکترونیکی و الکترواپتیکی دارا می‌باشد. آرایه‌ای از الکترودهای حساس به نور روی آن نصب شده است. این الکترودها ماتریکس یا پیکسل‌هایی هستند که اندازه آن‌ها کمتر از $0.3 \mu\text{m}$ نانومتر هستند که بارالکتریکی را ذخیره می‌کنند. فوتون‌های فرود آمده بر سطح این الکترودها به جریان الکتریکی تبدیل شده و

این جریان بعد از چندین بار تقویت به صورت تصویر در می آید و در حافظه کامپیوتر ذخیره می شود [1].

بزرگنمایی میکروسکوپ در این آزمایش بصورت زیر محاسبه می شود:

$$M=30 \times 40 = 1200 = \text{عدسی شیئی} \times \text{عدسی چشمی}$$

عدسی شیئی میکروسکوپ آزمایش ما از نوع 130UMD (1. 3M Pixel) می باشد.

۳. روش کار

دوربین های CCD نیازمند استفاده از کامپیوتر به طور همزمان برای ذخیره داده ها و رؤیت تصاویر هستند لذا به کمک نرم افزار Image Analyse به بررسی و اندازه گیری خصوصیات فیزیکی اجسام همچون طول، قطر و ضخامت می پردازیم. تصاویر دریافتی از میکروسکوپ به صورت زنده بر صفحه مانیتور نمایش داده می شود، این مزیت به ما کمک می کند تا وضوح و کیفیت تصویر دریافتی را تنظیم کنیم پس از آن که مراحل تصویربرداری و ذخیره تصویر حاصل از نمونه ی آزمایش به کمک این نرم افزار انجام شد، حال نوبت به آنالیز تصویر بدست آمده از میکروسکوپ می رسد، آنالیز و پردازش تصویر نام کلی برای تغییرات و دستکاری تصاویر به وسیله کامپیوتر یا اندازه گیری هایی بر روی قسمت هایی از تصویر است که شامل دو اصل مهم ذیل است که هر آزمایشگر باید آن ها را کاملاً فراگیرد:

کالیبره کردن تصویر

نمایش تصویر و آشکارسازی جزئیات

۳-۱. کالیبره کردن تصویر

اندازه گیری دقیق و سنجش فواصل کوچک یکی از دغدغه های اصلی در صنایع حساس می باشد. دوربین های با کیفیت، امکان کالیبراسیون با دقت بسیار بالا در حد میکرون را فراهم می کنند. اندازه گیری به شیوه نوینو عکس برداری، به کمک میکروسکوپ انجام می گیرد بنابراین گام نخست در آنالیز و پردازش کالیبره کردن تصویر است. برای این که مطمئن باشیم که جزئیات آشکار شده واقعی هستند و ناشی از نواقص اپتیکی و دوربین

نیستند، باید نخست تصویر کالیبره شود. یکی از مشکلات موجود نویزهای الکتریکی هستند که در نوردهی‌های طولانی دوربین ممکن است آشکار گردند. یکی از راه‌های غلبه بر چنین مشکلی، خنک‌نگه داشتن دوربین در زمان عکس‌برداری است کالیبره کردن تصویر به این معنا است که شما باید اندازه واقعی تصویر را به کامپیوتر معرفی کنید. تنها واحدی که کامپیوتر می‌فهمد همان پیکسل است. در واقع عدد کالیبره‌اندازه یک پیکسل به واحد میکرومتر است. این عدد در محاسبات نقش بسیار مهمی دارد، مانند محاسبه متغیرهای محیط، طول، عرض، مساحت و قطر بزرگ که مستقیماً در عدد کالیبره ضرب می‌شوند، با اندازه‌گیری میانگین حاصل از قطر چند نمونه از آزمایش مانند کاغذ میلیمتری، میله نازک، سیم نازک بوسیله ریزسنج در مقیاس میکرومتر و مقایسه آن با اعداد بدست آمده از میانگین در روش تصویربرداری در مقیاس پیکسل به تناسبی دست یافتیم که حاصل، عدد کالیبره دستگاه شد.

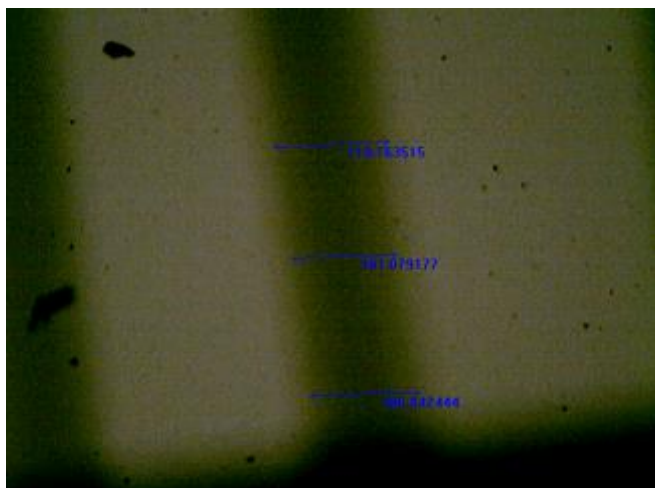
$$1 \text{ pixel} = 12 \mu\text{m}$$

۴. مشاهدات تجربی و تحلیل آن‌ها

هنگام اندازه‌گیری یک کمیت، عوامل مختلفی سبب بروز خطا می‌شود: خطای شخص، خطای دستگاه، خطای ناشی از عوامل محیطی. لذا نمی‌توان در یک اندازه‌گیری مقدار واقعی کمیت مورد نظر را اندازه گرفت. برای این که با دقت به اندازه واقعی کمیتی دست پیدا کنیم باید این کمیت را بارها اندازه بگیریم و عددها را یادداشت کنیم $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots$ مقدار واقعی کمیت به مقدار میانگین آن‌ها نزدیک است:

$$\text{مقدار واقعی کمیت} = X_m = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) / n$$

شکل (۳)، تصویر به دست آمده از میله نازک به کمک میکروسکوپ است. به کمک این روش بخشی از نور تابیده شده از منبع به نمونه، جذب شده و نقاط تاریک تصویر را شکل می‌دهد و بخش دیگر با عبور از اطراف نمونه نقاط روشن تصویر را شکل می‌دهند. حدفاصل یک نقطه تاریک تا نقطه تاریک دیگر، قطر میله را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تصویر گرفته شده از میله نازک به کمک میکروسکوپ الکترونی - رقومی (دیجیتالی).

جدول ۱. نتایج به دست آمده از اندازه گیری قطر میله.

آزمایش	Image(pixel)	Scale(pixel)	Scale(μm)
۱	۱۶۳۵۱۴۸۳۱۳۶۳.۱۱۰	۱۶۳۵۱۵.۱۱۰	۱۳۲۱.۹۶۲۱۸
۲	۰۷۹۱۷۶۸۸۶۲۴۱.۱۰۱	۰۷۹۱۷۷.۱۰۱	۱۲۱۲.۹۵۰۱۲۴
۳	۰۴۲۴۴۴۳۳۲۴۴۶.۱۰۶	۰۴۲۴۴۴.۱۰۶	۱۲۷۲.۵۰۹۳۲۸

اعداد ثبت شده بر تصویر پس از هر بار اندازه گیری به کمک نرم افزار پردازش تصویر، Image Analyse، به دست آمده است.

Average=105. 761712 pixel=1269. 140544μm
1pixel=12 μm

این مقدار میانگین نزدیکترین عدد به اندازه واقعی کمیّت است و با دانستن عدد کالیبره، نتیجه به دست آمده را به میکرومتر تبدیل می کنیم. مزیت استفاده از این روش نسبت به سایر روش های آزمایشگاهی همچون ریزسنج یا میکرومتر در اندازه گیری ابعاد اجسامی است که مستقیماً با دست قابل اندازه گیری نیستند. تنها راه محاسبه قطر خطوط کاغذ میلیمتری استفاده از روش عکسبرداری به کمک میکروسکوپ مجهز به CCD است (شکل ۴).



شکل ۴. تصویر خطوط نازک کاغذ میلیمتری به کمک میکروسکوپ الکترونی-رقومی (دیجیتالی).

همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود نقاط سایه روشنی در اطراف خط وجود دارد. این نقاط همان سایه و نیم‌سایه‌اند. برای اندازه‌گیری مقدار واقعی خطوط کاغذ میلیمتری باید اندازه قطر سایه را به روش میانگین‌گیری محاسبه کنیم.

جدول ۲. محاسبه قطر سایه به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر.

آزمایش	Image(pixel)	Scale(pixel)	Scale(μm)
۱	48. 0104155366312	48. 010414	576. 124968
۲	63. 0713881248859	63. 071388	756. 856656
۳	52. 1536192416212	52. 153618	625. 843416
۴	65. 1229606206597	65. 122963	781. 475556

با میانگین‌گیری از مقادیر بدست آمده از چند بار آزمایش، مقدار واقعی قطر سایه برابر است با:

$$\text{Average} = 57.08959588 \text{ Pixel}$$

که معادل است با: $685.07515056 \mu\text{m}$. این مقدار، حاصل تقسیم مقدار واقعی کمیت (مقدار میانگین) بر عدد کالیبره دستگاه است.

جدول ۳. محاسبه قطر نیم سایه.

آزمایش	Image(pixel)	Scale(pixel)	Scale(μm)
۱	65.0691939399898	65.069191	780.830292
۲	70.1141925718324	70.114189	841.370268
۳	73.1710325197069	73.171036	878.052432
۴	78.006409993025	78.006409	936.076908

مقدار میانگین نیم سایه برابر است با:

$$X_m = \text{Average} = 71.59020725 \text{ Pixels}$$

که معادل $0.82487.859 \mu\text{m}$ است.

هدف ما به دست آوردن دقیق ترین تصویر با کمترین نویز ممکن است. هرچه مقدار نیم سایه به حداقل ممکن برسد، مقدار قطر سایه به مقدار واقعی نزدیک تر است برای رسیدن به این مطلوب از تاثیر زوایای تابش بر تصویر استفاده کردیم (شکل ۵ و ۶ و ۷ و ۸).



شکل ۵. تصویر گرفته شده در نتیجه تابش نور از بالا بر کاغذ میلیمتری.

۶۸ / بررسی میکروسکوپ رقومی و کاربرد آن در شکل‌گیری تصویر و اندازه‌گیری

جدول ۴. محاسبه قطر نیم سایه در تابش از بالا بر کاغذ میلیمتری.

آزمایش	Image(pixel)	Scale(pixel)	Scale(μm)
۱	74. 215901261179	74. 21590	890.5908
۲	74. 0405294416511	74. 040529	888.486348
۳	72. 5327512231544	72. 532751	870.393012

مقدار میانگین قطر نیم سایه:

$$X_m = \text{Average} = 73.59639397 \text{ Pixel} = 883.15672764 \mu\text{m}$$

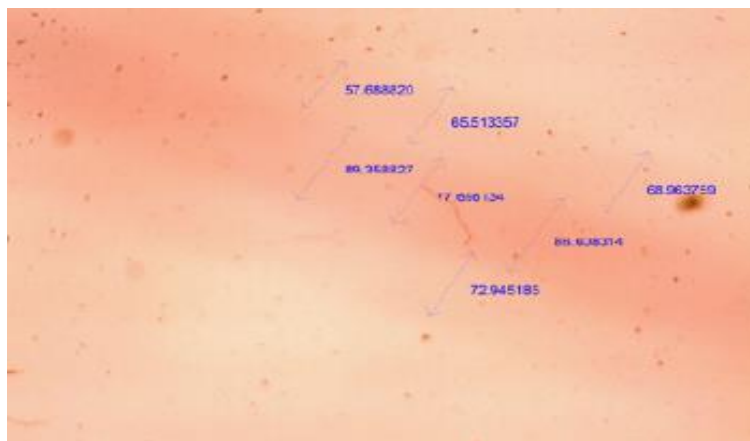


شکل ۶. تصویر گرفته شده از کاغذ میلیمتری در نتیجه تابش نور از پایین.

جدول ۵. محاسبه قطر نیم سایه در نتیجه تابش از پایین.

آزمایش	Image(pixel)	Scale(pixel)	Scale(μm)
۱	51. 10772935667226	51. 107729	613.292748
۲	62. 4339651151519	62. 433965	749.20758
۳	69. 1158447825099	69. 115845	829.39014

$$X_m = \text{Average} = 60.88584641 \text{ Pixel} = 730.63015692 \mu\text{m}$$

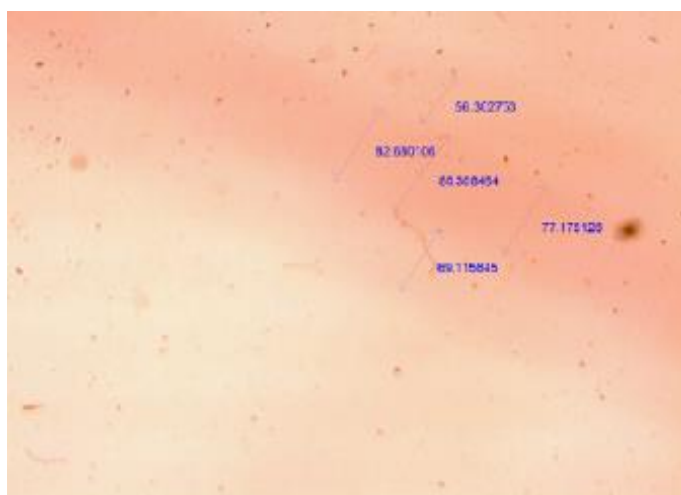


شکل ۷. تابش نور از سمت چپ بر کاغذ میلیمتری.

جدول ۶. محاسبه قطر نیم سایه در نتیجه تابش از چپ.

آزمایش	Image	Scale(pixel)	Scale(μm)
۱	65. 5133574166368	65. 513357	786. 160284
۲	57. 6888204074238	57. 688820	692. 26584
۳	68. 9637585982667	68. 963759	827. 565108
۴	72. 9451848993475	72. 945185	875. 34229

$$X_m = \text{Average} = 66.27778032 \text{ Pixel} = 795.33336384 \mu\text{m}$$



شکل ۸. تصویر بدست آمده از کاغذ میلیمتری در نتیجه تابش از سمت راست.

جدول ۵. محاسبه قطر نیم سایه در نتیجه تابش از راست.

آزمایش	Image	Scale(pixel)	Scale(μm)
۱	56. 302753041037	56. 302753	675. 633036
۲	69. 1158447825099	69. 115845	829. 39014

$$X_m = \text{Average} = 62.70929891 \text{ Pixel} = 752.5115869 \mu\text{m}$$

با مقایسه مقادیر میانگین حاصل از زوایای تابش مختلف در می‌یابیم که در تابش از پایین، قطر نیم سایه کم‌ترین مقدار ممکن را دارد بنابراین در این حالت قطر سایه نزدیک‌ترین عدد به مقدار واقعی خطوط کاغذ میلیمتری است. از این واقعیت می‌توان برای اندازه‌گیری تمامی اجسام استفاده کرد. به کمک این روش می‌توان از تار موی افراد در سنین مختلف عکس برداری کرد. استفاده از تکنیک تصویربرداری یک روش بسیار مفید، دقیق و ساده برای مطالعه ویژگی‌های منابع نوری و نمونه‌های اندازه‌گیری می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

برای انجام آزمایش از یک سیستم اپتیکی ساده مجهز به تراشه CCD استفاده شده است و تصویر خروجی آن در فرمت BMP ارائه می‌شود. در این روش به شیوه جدیدی از اندازه‌گیری ابعادی پرداختیم، در آزمایش‌های اندازه‌گیری ابعادی تماس مستقیم آزمایشگر با نمونه موجب بروز خطاهایی در آزمایش می‌شود اما در روش اندازه‌گیری به کمک عکس‌برداری، اندازه‌گیری بدون تماس فرد صورت می‌گیرد که از بروز خطای فردی جلوگیری می‌کند نتایج حاصل بر مقیاس پیکسل بوده است. با انجام دوباره اندازه‌گیری با روش مستقیم (در این تحقیق از ریزسنج بدین منظور استفاده شد) ابعاد را در مقیاس میکرومتر محاسبه کردیم. استفاده از میکروسکوپ مجهز به CCD می‌تواند موجب افزایش کیفیت تصویر گرفته شده و در نتیجه بالا بردن دقت نتایج گردد. البته این روش نیز همچون سایر روش‌ها با درصدی خطا همراه است. دو منبع اصلی نویز در دوربین‌های CCD وجود

دارد: نویز تاریک، نویز خوانش. هرچند در طول سال‌های گذشته پیشرفت‌های بزرگی در مورد کاهش نویز تاریک CCD در دمای اتاق وجود داشته است، سرد کردن بیشتر تراشه نویز را تا ده برابر در هر ۲۰ درجه‌ی سانتیگراد کاهش می‌دهد. نویز تاریک بیشتر در هات پیکسل‌ها یا نقطه‌های سفید در تصاویری مشهود است که با دوربین‌های CCD دمای اتاق پس از ۴ یا ۵ ثانیه به دست می‌آید. سرد کردن تا صفر درجه سانتیگراد معمولاً برای دوره زمانی ۳۰ ثانیه کافی می‌باشد. آزمایش‌هایی که نیازمند نمایش طولانی مدت می‌باشند، حتی مستلزم دمای پایین‌تر حسگر می‌باشند.

۶. منابع

[1] Baxter, Les (2007-11-01), "New developments in IEEE 1394 (a.k.a. Fire Wire)", Lightwave.

[2] Alan Holmes, *Optimizing a CCD Imaging System*, Sky & Telescope Magazine, 1998 .

[3] معین مصلح، «عکس‌برداری دیجیتال و پردازش تصاویر نجومی»، ۱۶۳-۱۶۴، ۱۳۸۵.

[4] Michael V. Newberry, *The Signal-to-Noise Connection*, Sky & Telescope Magazine, 1998.