



مطالعه تاثیر نورپردازی بر اسکن نوری سه بعدی با نشانه های لیزری

محمدرضا کریمی گوغری^۱، سید جلال هممتی^{۱*}، محمودرضا سایبانی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: hemmati@hormozgan.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در نمونه ای از استرئواسکنرهای نوری سه بعدی، الگوهای نوری به سطح جسم تابانده می شوند و دو دوربین تصاویر این الگوها را ثبت می کنند. با تحلیل الگوهای نوری، می توان اطلاعات سه بعدی دقیقی از سطح جسم به دست آورد. در این تحقیق به بررسی اثر نورپردازی بر شاخص های عملکردی سامانه استرئواسکن با نور ساختاریافته مشتمل بر آرایه نوری با چهل منبع لیزر خطی پرداخته شده است. برای کنترل موثر روشنایی محیط اسکن، از یک خیمه عکاسی پیرامون قطعه کار استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد سامانه، داده برداری از گوی های کروی در دو حالت درون و بیرون خیمه عکاسی انجام شده و نتایج حاکی از کاهش خطای فرم و انحراف معیار استاندارد بوده است. همچنین با انجام اندازه گیری ها روی سنج های استوانه ای درون خیمه، شاخص های دقت، اریبی آزمایشگاهی، تکرارپذیری و تجدیدپذیری محاسبه شده و با نتایج مشابه از تحقیقات پیشین در شرایط بدون خیمه مقایسه گردیده است. انحراف معیار میانی دقت سامانه ۲۹ میکرومتر، بیشینه اریبی ۵۵ میکرومتر، بیشینه انحراف استاندارد تکرارپذیری و تجدیدپذیری به ترتیب، ۴۴ و ۱۶۵ میکرومتر برآورد شده است. نتایج، نشان دهنده بهبود شاخص های فوق الذکر در اندازه گیری درون خیمه نسبت به داده برداری های انجام شده در بیرون آن و تحقیقات قبلی در محیط آزمایشگاه بوده است. بکارگیری خیمه، علاوه بر ارتقاء کیفی شاخص های اندازه گیری، به دلیل تثبیت روشنایی و رفع نیاز به کالیبراسیون های مجدد، می تواند به سهولت و تسریع اسکن در اتاق اندازه گیری کمک کند.	مقاله پژوهشی دریافت: ۲۸ آذر ۱۴۰۴ پذیرش: ۹ تیر ۱۴۰۵
	کلیدواژه ها: اسکن نوری سه بعدی رقومی سازی دید استرئو نورپردازی

Study of lighting effects on 3D optical scanning with laser targets

Mohammadreza Karimi Gughari¹, Seyed Jalal Hemmati^{1*}, Mahmoodreza Saybani²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2- Department of Computer Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

* Corresponding Author's Email: hemmati@hormozgan.ac.ir

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received: 19 December 2025 Accepted: 30 June 2026 Keywords: 3D Optical Scan Digitization Stereo Vision Lighting	In a type of a 3D optical stereo scanner, light patterns are projected onto the surface of the object and two cameras capture images of these patterns. By analyzing light patterns, accurate 3D information can be obtained from the surface of the object. This study investigates the effect of lighting on the performance indicators of a structured light stereo scanning system consisting of an optical array with forty-line laser sources. To effectively control the lighting of the scanning environment, a photography light-box was used around the work piece. To evaluate the performance of the system, sampling from spherical artifacts was performed inside and outside the light-box, and the results indicated a reduction in the form error and standard deviation. Also, by conducting measurements on a cylindrical artifact inside the light-box, the indices of accuracy, laboratory bias, repeatability, and reproducibility were calculated and compared with similar results from previous studies in conditions without a Light-box. The intermediate precision standard deviation of the system accuracy is estimated to be 29µm, the maximum bias is 55µm, and the maximum standard deviation of repeatability and reproducibility is estimated to be 44 and 165µm, respectively. The results showed an improvement in the aforementioned indicators measured inside the light-box compared to data taken outside and previous research in a laboratory environment. In addition to improving the quality of measurement indicators, using a light-box can help facilitate and speed up scanning in the measurement room by stabilizing the lighting and eliminating the need for recalibrations.

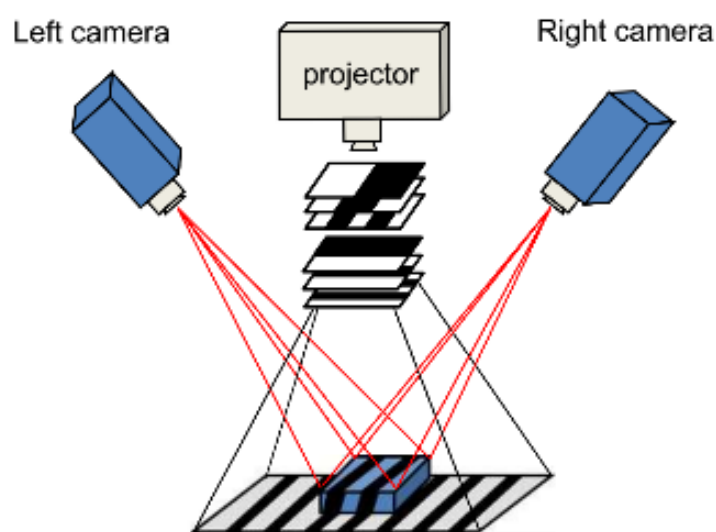
Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Karimi Gughari M, Hemmati SJ, Saybani M. Study of lighting effects on 3D optical scanning with laser targets. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2026 Jan 21;12(11):18-32. doi: 10.22034/ijme.2026.566353.2157 [In Persian]

۱- مقدمه

اسکن نوری سه بعدی^۱ به وسیله استرئواسکنرها^۲ با نور ساختاریافته یکی از روش‌های متداول در صنعت است. در این روش، با استفاده از دو دوربین در زوایای متفاوت با تصویربرداری از جسمی سه بعدی که در معرض تابش الگوهای نوری ساختاریافته قرار گرفته است اقدام به داده‌برداری از سطوح جسم می‌گردد. در شکل ۱، به‌طور شماتیک، جهت‌گیری دوربین‌ها و پروژکتور نسبت به قطعه در یک نمونه استرئواسکنر نشان داده شده است. عوامل متعددی مانند نوع و تنظیمات دوربین و لنز، کیفیت سطح جسم و فاصله آن تا دوربین، روشنایی محیطی و کیفیت نور تابانده شده به سطح، بر شاخص‌های عملکردی این نوع سامانه‌ها موثرند. روشنایی محیطی یکی از متغیرهای مهم تأثیرگذار در کارایی سامانه، به‌ویژه در اسکنرهای مبتنی بر نور ساختاریافته هستند. از آنجا که اساس عملکرد این سامانه بر مبنای تشخیص پروفایل سطوح و ثبت اعوجاجات ناشی از تابش پرتوهای نوری به سطح اجسام است و ویژگی‌های نور محیطی نیز این شاخص‌ها را تحت الشعاع قرار می‌دهد، لذا بررسی تأثیرات نورپردازی و عوامل مرتبط با آن‌ها بر شاخص‌های داده‌برداری، یکی از فعالیت‌های ضروری در این حوزه است.



شکل ۱ سامانه استرئو اسکن با نور ساختاریافته [۱]

اسکن نوری مبتنی بر نورساختاریافته در معرض نور محیطی قوی در فضای باز، به یک موضوع تحقیقاتی مهم تبدیل شده است [۲]. خارج از اتاق اندازه‌گیری، روشنایی نور محیط می‌تواند ۲ تا ۵ برابر بیش‌تر از روشنایی نور پروژکتور باشد و تداخل انرژی آن در نتایج اسکن تأثیر نامطلوب زیادی دارد. از خواص پلاریزاسیون نور برای پردازش اطلاعات فازی از دست‌رفته موقع بازسازی سطوح براق استفاده شده است [۳]. وقتی چند الگوی نوری کدگذاری شده با اختلاف فاز معینی به طور متوالی به سطح تابانده می‌شود موقع پردازش تصویر به دلیل تداخل نور محیطی، خطای تشخیص فازی ایجاد می‌شود. ژو و همکاران [۲]، از پلاریزاسیون نور در ورودی به دوربین و شی و همکاران [۴]، از پلاریزاسیون نور پروژکتور برای جداسازی نورساختاریافته از روشنایی محیطی استفاده کرده‌اند. فنگ و همکاران [۵]، با ارائه روشی موسوم به تنظیم خطای فازی پیکسل به پیکسل دقیق، یک مدل برای انعکاس و یک مدل برای تبدیل خطا، استخراج کرده‌اند که قادر است اختلالات ناشی از انعکاس نور از سطوح براق را در الگوهای نوری تصویربرداری شده، تحلیل کند. ژانگ و همکاران [۶] با پس‌پردازش تصویر به روش ضد نور محیطی مبتنی بر یادگیری عمیق، تلاش کرده‌اند تداخل نور محیطی را به صورت خطاهای فازی مدل کرده و اطلاعات فازی دقیقی را از تصاویر لبه‌ای مجزا متاثر از نور شدید محیطی استخراج کنند.

در زمینه مترولوژی مهندسی، اسکن در اتاق اندازه‌گیری و پوشش سطح با پودر اسکن، از جمله اقدامات اصلاحی برای حصول دقت‌های بالاتر بوده است. در این شرایط، متغیرهایی نظیر شدت و دمای نور محیطی، نوع منبع روشنایی اتاق و نوع نورساختاریافته از نظر طول موج، رنگ و کدگذاری، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بلانکو و همکاران [۷] تأیید کردند که تأثیر نور محیطی بر مثلث‌بندی با

¹ 3D Optical Scanning

² Stereo Scanners

استفاده از نشانه های لیزری، بر کیفیت ابر نقاط تأثیر می گذارد. ثابت شده است که انواع لامپ هایی که انرژی زیادی را روی باند طول موج لیزر وارد می کنند باعث اشباع رنگ برخی از پیکسل های تصویر می شوند. در مجاورت نور شدید، مانند محیط پیرامون لامپ رشته ای شفاف، این وضعیت تقریباً به کل ابر گسترش می یابد. در چنین شرایطی اطلاعات هندسی یا ابعادی مناسبی به دست نخواهد آمد. در هم تنیده شدن نقاط به دلیل اشباع نور، به شدت در نقاط نزدیک به لامپ تأثیر می گذارد. با این وجود، نتایج بهتری برای لامپ های فلورسنت، جیوه ای و سدیمی به دست می آیند، زیرا ابرهای کامل تری را بدون نقاط گمشده به دلیل اشباع، ارائه می کنند.

تونگاما و همکاران [۸] بررسی های خود را در مورد تأثیر نور محیطی بر دقت اسکنر نوری سه بعدی متمرکز نمودند. آن ها با اسکن چهره تحت نورهای محیطی متفاوت با اسکنر سه بعدی EinScanPro2Xpluse، دقت آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در نور طبیعی محیط بهترین دقت حاصل شده است.

آراکیدا و همکاران [۹] تأثیر روشنایی و دمای رنگ نور محیط را بر صحت، دقت و زمان اسکن یک قالب ارزیابی کردند. روشنایی نور محیط با دیود نوری، روی ۵۰۰، ۲۵۰۰ لوکس^۱ تنظیم شد. با استفاده از فیلتر تبدیل، دمای رنگ ۳۹۰۰ کلوین^۲ (زرد)، ۴۱۰۰ کلوین (نارنجی)، ۷۵۰۰ کلوین (سفید) و ۱۹۰۰۰ کلوین (آبی) تنظیم شد. مدل مرجع پنج بار تحت هر شرایط توسط یک اسکنر داخل دهانی، اسکن شد. از لحاظ صحت داده ها، میانگین انحراف در ۵۰۰ لوکس به طور قابل توجهی کمتر از ۰ و ۲۵۰۰ لوکس بود. در روشنایی ۵۰۰ لوکس، میانگین انحراف در دمای ۳۹۰۰ کلوین به طور قابل توجهی کمتر از سایر دماها بود. صرف نظر از دمای رنگ، زمان اسکن در ۲۵۰۰ لوکس به طور قابل توجهی بیشتر از سایر سطوح روشنایی بود.

راچا کوندا و همکاران [۱۰] خطاهای سامانه را به دسته های زیر تقسیم بندی کرده اند: ۱- خطاهای ساخت، شامل: کالیبراسیون و اعوجاج، وضوح دوربین و پروژکتور، عمق میدان دوربین و پروژکتور، مثلث بندی و پیکره بندی زاویه ای، تکنیک های کدنویسی، طول موج / رنگ نور برای الگوهای کدگذاری تک رنگ، تفکیک رنگ در پروژکتورها، دمای لامپ ۲- خطاهای ناشی از شکل هدف/ سنج و خواص نوری/ مکانیکی ۳- خطاهای ناشی از محیط، شامل: نور محیط، دمای محیط و موارد دیگری مانند رطوبت، گرد و غبار، ۴- خطاهای عملکرد ۵- خطاهای ناشی از جمع آوری داده ها و پردازش پس از آن شامل: دریافت و یا رقومی سازی داده ها و پس پردازش.

گوپتا و همکاران [۱۱] اثرات روشنایی نور خورشید بر عملکرد اسکنر سه بعدی را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که روشنایی شدید محیطی در کاهش عملکرد روش های مبتنی بر نور ساختاریافته موثر است. آن ها نشان دادند برای سطح مطلوبی از دقت، می توان با توزیع مناسب نور، سرعت اسکن را افزایش داد که توزیع نور بهینه بر اساس اندازه گیری سطح روشنایی محیط تعیین می شود. وویزین و همکاران [۱۲] اثرات نور محیط را بر یک اسکنر تجاری مورد مطالعه قرار داده و در ادامه روشی را برای توصیف محدوده دقت به عنوان تابعی از نوسانات و تغییرات نور محیط ارائه دادند. آن ها نشان دادند که نور، علاوه بر تأثیر شناخته شده آن بر دقت رنگ اسکنرها، تأثیر زیادی بر دقت محدوده نور ساختاریافته دارد.

در این پژوهش، پس از طراحی و پیاده سازی مکانیزم خاصی جهت کنترل نرم افزاری و سخت افزاری عملکرد آرایه نوری سامانه استرئواسکن، سعی شده است شرایط نورپردازی بهینه و پایداری فراهم گردد که تحت آن، شاخص های اندازه گیری اسکنر، مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل در شرایط معمول مقایسه گردد. بر اساس گزارش قبلی [۹] و تجارب تیم تحقیقاتی، بهترین نتایج اسکن، در شرایط روشنایی ساعات اولیه روز غیر ابری پس از طلوع خورشید به دست می آید. بنابراین، با ترتیب دادن آزمایش های نورسنجی، این شرایط به طور کمی برآورد شده و با استفاده از خیمه عکاسی و نورپردازی مصنوعی، شرایط مذکور مهیا گردیده است. کاربرد خیمه برای این منظور قبلاً مورد مطالعه قرار نگرفته است.

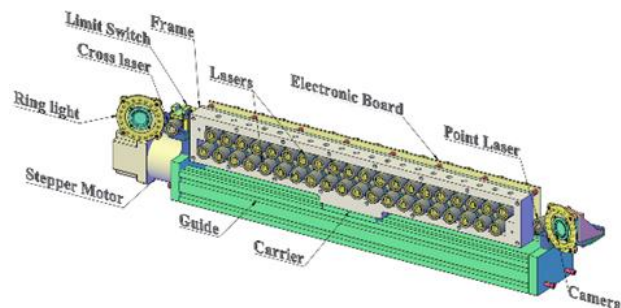
۲- روش تحقیق و تنظیمات

پیکره بندی سامانه ای آزمایشگاهی بکار رفته در این تحقیق، در شکل نشان داده شده است. در این سامانه از دو دوربین صنعتی BASLER مدل daA1920-160uc، با لنز C23-1620 و چهل منبع لیزر خطی، نصب شده بر روی یک حماله و پایه ثابت استفاده شده است. طول موج لیزرها، ۶۵۰ μm و توان آن ها ۵mw است و چینش آن ها به گونه ای است که فاصله خط اثر لیزرها با یکدیگر حدوداً ۱۰mm باشد. دو منبع لیزر، یکی نقطه ای و دیگری ضربدری در دو طرف حماله به صورت ثابت قرار گرفته اند. با توجه به این که این سامانه از روش

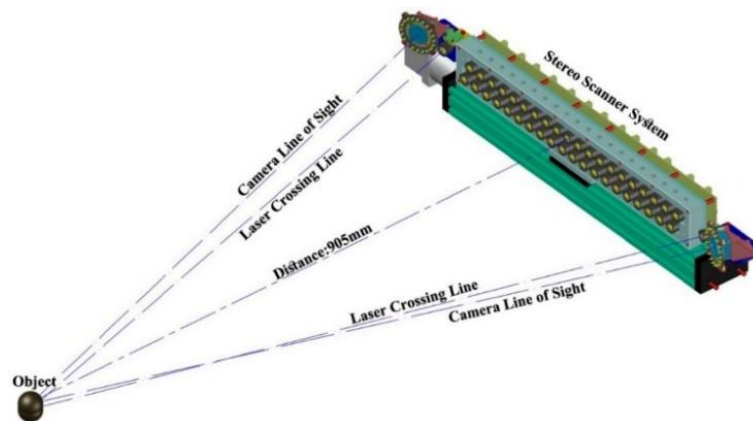
¹ Lux

² Kelvin

مثلث‌بندی جهت استخراج ابر نقاط استفاده می‌نماید لذا اطمینان از استقرار جسم مورد اسکن در فاصله مورد نظر، امری ضروری است. به‌همین منظور لیزرهای نقطه‌ای و ضربدری به‌گونه‌ای در دو طرف حماله قرار گرفته‌اند که راستای تابش پرتو لیزرها دقیقاً در صفحه‌ای که فاصله آن از لیزرها مقدار مورد نظر است، بر هم منطبق گردند. شکل ۳، فاصله و نحوه استقرار دوربین‌ها و لیزرها را نشان می‌دهد. حماله لیزرها توسط موتور، قابل جابجایی عرضی به طول ۱۰ mm و حداقل گام ۰/۰۱ mm است. با توجه به ابعاد قطعه، تعدادی از لیزرها و یا تمام آن‌ها بکار گرفته خواهند شد. محدوده فیزیکی اسکن، تقریباً مکعبی به طول اضلاع ۴۰۰ mm در نظر گرفته شده است. برای این ابعاد با توجه به زوایای دید و فاصله کانونی لنز، فاصله مرکز به مرکز دوربین‌ها ۶۰۰ mm و فاصله‌ی کاری دوربین‌ها، ۹۰۰ mm است. دو رینگ لایت در دو طرف سامانه محیط بر دوربین‌ها تعبیه شده‌اند که از ایجاد سایه در تصویر جلوگیری شود. در شکل ۴ یک نمونه از اسکن انجام شده و ابر نقاط متناظر با آن نشان داده شده است. برای اسکن قطعه در این تصویر، تعداد ۲۲ لیزر خطی از مجموع ۴۰ لیزر، فعال گردیده است.



شکل ۲ مدل سه بعدی (سمت راست) و نمایی از پیکره‌بندی سامانه استرئو اسکن بکار رفته در این تحقیق (سمت چپ)



شکل ۳ فواصل، خط سیر لیزرها و مسیر دید دوربین‌ها



شکل ۴ نمایی از قطعه در حال تصویربرداری (سمت راست) و ابر نقاط خروجی اسکن (سمت چپ)

کنترل سخت افزار، تصویربرداری و پردازش تصاویر به کمک برنامه‌ای انجام می‌گیرد که به زبان پایتون نوشته شده و از کتابخانه‌های آن استفاده می‌کند. مولفان در گزارش قبلی خود [۱۳]، اصول بکار رفته برای کالیبراسیون و مثلث‌بندی در فرایند استرئواسکن نوری را توضیح داده‌اند.

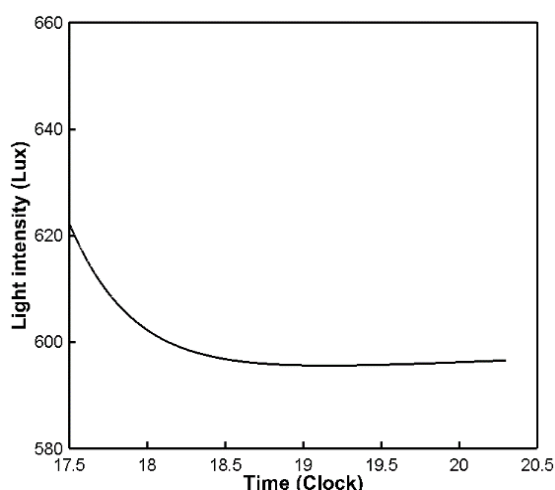
۳- نورسنجی محیط آزمایشگاه

هدف این مطالعه، بررسی اثرات نورپردازی بر استرئواسکن نوری سه بعدی با نشانه های لیزری است. منظور از نورپردازی، می تواند شرایط تابش لیزرها به سطح جسم به عنوان نور ساختاریافته و یا شرایط روشنایی طبیعی و مصنوعی محیط باشد که در این جا، هدف مطالعه نقش روشنایی محیط می باشد. با توجه به شرایط آزمون ها و زمان لازم برای ثبت تصاویر در هر آزمون، بایستی از ثبات روشنایی محیطی در طول مدت آزمون اطمینان حاصل نمود.

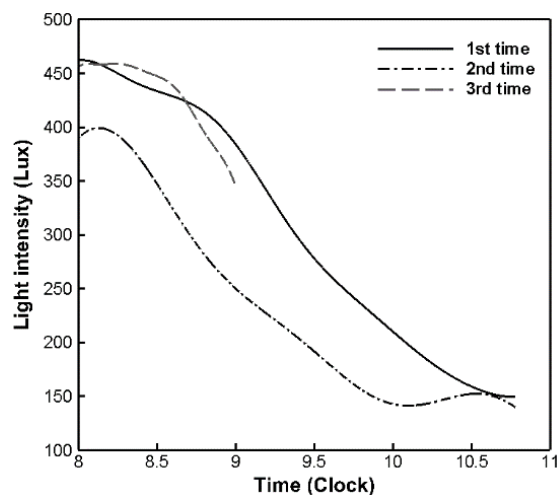
برای اندازه گیری شدت نور محیطی در شرایط کاری، از ماژول حسگر نوری GY-30 در وسط یک صفحه ی مستطیل شکل به ابعاد دامنه اندازه گیری، استفاده شده است. نورسنجی، در شرایط نور طبیعی محیط آزمایشگاه و در سه نوبت مختلف انجام شده است. در مدت زمان نورسنجی، هوا آفتابی و دما بین ۲۴/۶ تا ۲۵°C و رطوبت بین ۲۹/۵ تا ۳۲/۵٪ متغیر بوده است. حسگر رو به پنجره و به فاصله حدوداً ۳ متری از آن قرار داشته است.

از نمودار شکل ۵-الف مشاهده می گردد که تغییرات روشنایی اتاق، در طول حدوداً ۳ ساعت، به اندازه ۳۲۵ لوکس کاهش یافته است. تغییرات شدت نور در نوبت های دوم و سوم در همین شکل نشان داده شده است. با توجه به زمان داده برداری و نمودارهای مذکور، کاهش شدت نور ۱۰۰ تا ۳۰۰ لوکس، نشان دهنده تغییرات زیاد در این کمیت است. همان طور که ملاحظه می شود شرایط روشنایی هر سه نوبت، تقریباً مشابه بوده و با نزدیک شدن به ظهر، از میزان روشنایی طبیعی کاسته شده است. بدیهی است در صورت انجام اسکن در این شرایط، بایستی یا کالیبراسیون قبل از انجام فرایند اندازه گیری تجدید شود و یا تنظیمات جبرانی متناسب با تغییرات روشنایی صورت بگیرد.

نمودار شکل ۵-ب، از داده های نورسنجی در غروب و اول شب در مجاورت یک لامپ ال ایی دی ۲۵ وات و در همان موقعیت قبلی رسم گردیده است. نمونه برداری، از حدوداً نیم ساعت قبل از غروب شروع شده است. در نیم ساعت اول، با کاهش تدریجی تابش نور خورشید، شدت نور کاهش یافته و پس از آن، تقریباً ثابت مانده است. هم چنین مشاهده شد خاموش و روشن کردن و چشمک زدن لامپ (های) مجاور، با تغییر شدت نور محیطی، بر فرایند اندازه گیری اثرات نامطلوب خواهد داشت. همان گونه که از نمودار این شکل مشخص می گردد شدت نور در حین غروب آفتاب نیز ثابت نداشته و به میزان تقریبی ۸۵ لوکس کاهش داشته است. میزان روشنایی شب (۶۰۰ لوکس) در این حالت نیز در مقایسه با حالت مطلوب صبحگاهی، بیشتر است.



(ب)



(الف)

شکل ۵ نمودار نورسنجی در (الف) روز و (ب) شب

هنگام تصویربرداری در روز و یا شب، به واسطه تغییر شدت و زاویه تابش نور، با ایجاد سایه روی سطح جسم، از دقت اندازه برداری کاسته می شود. یکی از راهکارهای جبرانی برای این مشکل، استفاده از خیمه نور^۱ است. خیمه نور یک محفظه قابل حمل است که از

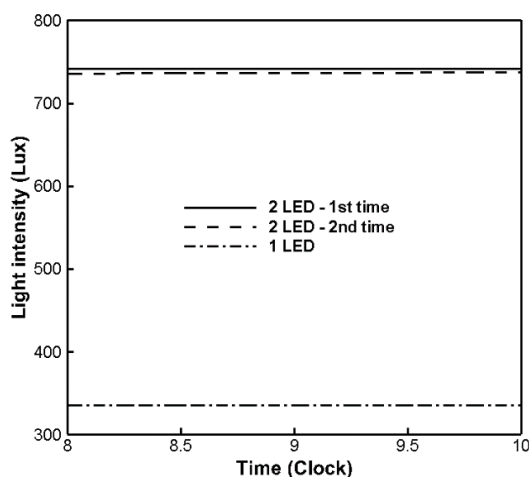
¹ Light Box

پرده های سفید یا مشکی با سطوح منعکس کننده نور ساخته شده و نور را به صورت یکنواخت پخش می کند. هم چنین همراه این تجهیز، دو یا سه پنل LED خطی با دمای رنگ طبیعی عرضه می شود که شدت نور آن ها با یک دیمر، قابل تنظیم است. در شکل ۶ یک نمونه خیمه عکاسی نشان داده شده است.



شکل ۶ خیمه نور

نتایج نورسنجی انجام گرفته در حالت استفاده از خیمه در نمودارهای شکل ۷ نشان داده شده است. در حالت اول، دو LED، روشن و ولوم دیمر در کمترین مقدار خود تنظیم گردید. LEDها در دو ستون انتهایی خیمه، به صورت عمودی مستقر شدند و درب خیمه به گونه ایی که در شکل ۸ ملاحظه می شود باز بوده است. نمودار نوبت اول شکل ۷، تغییرات شدت نور در مدت تقریباً ۲ ساعت، به میزان ۴ لوکس را نشان می دهد. این مقدار با توجه به محدوده ۷۴۰ تا ۷۴۴ لوکس نشان داده شده در نمودار، بسیار ناچیز بوده و قابل چشم پوشی است و ثبات قابل قبولی را ارائه می دهد. در نوبت بعدی، شرایط مذکور در بالا، مجدداً تکرار و نورسنجی انجام شد. در این حالت نیز نتایج حاکی از تغییر شدت نور به میزان ۵ لوکس در طول زمان داده برداری در محدوده ۷۳۴ تا ۷۳۹ لوکس است. کاهش نسبی روشنایی در این دو نوبت می تواند ناشی از تغییرات روشنایی روز باشد که به دلیل باز بودن درب خیمه مشاهده شده است ولی قابل ملاحظه نیست. با مقایسه این دو حالت اطمینان حاصل گردید که LEDهای خیمه نور، از ثبات شدت نور قابل قبولی برخوردار هستند اما چون شدت نور بیش از حالت مطبوع صبحگاهی است یکی از LEDها خاموش شده است. ولوم دیمر در این حالت نیز در کمترین مقدار خود تنظیم شده است. نتایج نشان می دهد که شدت نور به مقدار متوسط ۳۳۵/۵ لوکس تقلیل یافته است. تغییرات شدت نور به میزان تقریباً ۳/۵ لوکس بوده که به دلیل ناچیز بودن در مقایسه با مقدار متوسط قید شده، قابل صرف نظر کردن است. به این ترتیب، برخلاف تغییرات شدید و غیر قابل کنترل شدت نور در روز با نور طبیعی و شب با نور مصنوعی، شدت نور درون خیمه قابل کنترل و تثبیت شده است.



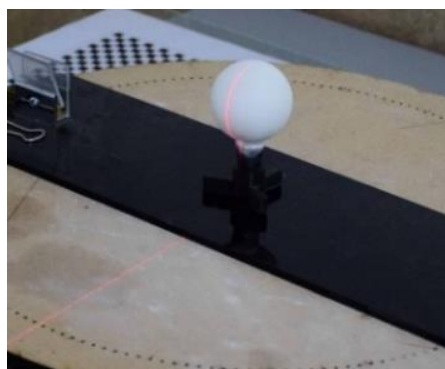
شکل ۷ نمودار نورسنجی در خیمه نور با یک و دو LED روشن

۴- ارزیابی شاخص‌های اندازه‌گیری

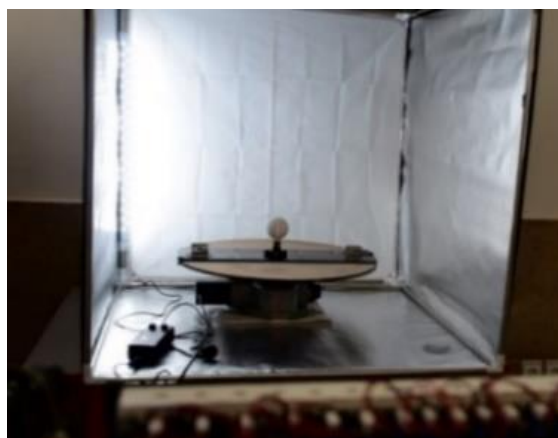
برای ارزیابی عملکرد سامانه، با اقتباس از دستورالعمل‌های استانداردهای VDI/VDE2634-3:2008 [۱۴] و ISO 5725-2:2019 [۱۵]، دو دسته آزمون ترتیب داده شده است. در دسته اول، خطاهای اندازه و فرم دو گوی کروی پلاستیکی واقع در ارتفاع‌های مختلف از سطح میز، اندازه‌گیری شده است. در دسته دوم، سه سنجه استوانه‌ای متشکل از ۲۰ پله با قطرهای مختلف، اندازه‌گیری شده و شاخص‌های اندازه‌گیری مطالعه گردیده است. ابعاد سنجه‌های بکاررفته، توسط آزمایشگاه ذی‌صلاح، اندازه‌گیری شده است. پیش از داده‌برداری، ۲۰ دقیقه زمان برای گرم شدن دوربین‌ها، فاصله در نظر گرفته شده است. در آزمون‌های فوق‌الذکر، یکبار در حضور خیمه و بار دیگر در غیاب آن، اندازه‌گیری‌ها انجام گرفته‌اند تا تأثیر شرایط نورپردازی در این دو حالت بررسی شود.

۴-۱- آزمون‌های دسته اول

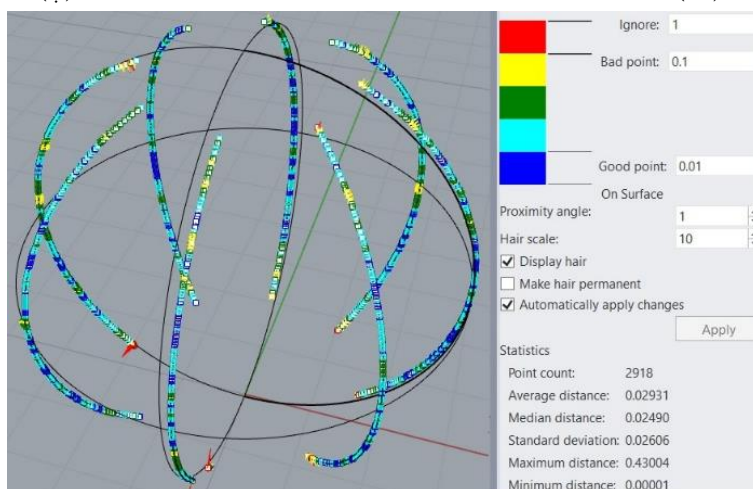
در این آزمون‌ها، از یک نشانه لیزر خطی روی سطح گوی‌ها، استفاده شده و با چرخش میز در مناظر مختلف، کانتوربرداری از سطح گوی‌ها در دو حالت که میز و قطعه درون و یا بیرون از خیمه قرار داشته‌اند انجام گردیده است. آزمون‌ها در هر دو حالت، ۷ بار تکرار شده‌اند. در شکل ۸ نحوه استقرار گوی در خیمه نشان داده شده است. دو نمونه گوی کروی به قطرهای ۵۶/۲۸۷ و ۵۷/۴۶۵mm در دو ارتفاع مختلف نسبت به سطح میز بکار گرفته شده است. در شکل ۸-ج، نمونه‌ای از ابر نقاط در نرم‌افزار CAD، کره برازنده آن و گزارش تحلیل آماری در نرم‌افزار نشان داده شده است.



(ب)



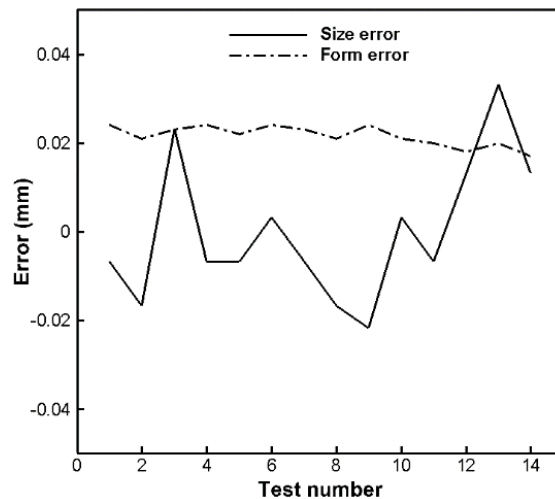
(الف)



(ج)

شکل ۸ الف) نحوه استقرار سنجه کروی درون خیمه، ب) تصویر نشانه لیزری روی گوی و ج) نمونه‌ای از ابر نقاط خروجی اسکن و کره برازنده آن به همراه نتایج تحلیل آماری در نرم‌افزار CAD

در این جا خطای اندازه‌ای کاوش^۱ و خطای فرمی کاوش^۲ گزارش شده است. خطای اندازه، تفاضل قطر کالیبره شده از قطر اندازه‌گیری شده است. خطای فرم نیز، به متوسط فاصله شعاعی بین کره برازنده از داده‌های اسکن اطلاق می‌شود. در شکل ۹، نتایج ۷ بار تکرار اندازه‌گیری برای هر سنجه کروی درون خیمه نشان داده شده است. در جدول ۱، نتایج داده‌برداری فوق‌الذکر در غیاب خیمه و در حضور آن، نشان می‌دهد بیشینه خطای فرم و انحراف استاندارد در حالت اندازه‌گیری درون خیمه عکاسی حدوداً ۳۰٪ از حالت خارج خیمه، کمتر است.



شکل ۹ خطاهای اندازه و فرم اندازه‌برداری درون خیمه برای سنجه‌های کروی

جدول ۱ نتایج دسته اول آزمون‌ها با و بدون استفاده از خیمه

بدون خیمه	با خیمه	
۰/۰۳۵	۰/۰۲۴	بیشینه خطای فرم (mm)
۰/۰۳۰	۰/۰۲۱	انحراف استاندارد خطای فرم (mm)

با بررسی نتایج اندازه‌گیری سنجه‌های کروی، به نظر می‌رسد که بهبود کیفیت اندازه‌گیری، حاصل کنترل و تثبیت روشنایی باشد. شدت نور بالا، باعث اشباع رنگ در تصاویر دریافتی از دوربین‌ها و ایجاد خطا در تشخیص پروفایل سطح جسم و در نهایت خطای داده‌برداری خواهد شد. اشباع یک رنگ، فاصله آن رنگ از رنگ خاکستری با شدت برابر است [۱۶]. در تصویربرداری، اشباع، نوعی اعوجاج است که در آن تصویر ضبط شده به مقداری حداکثر، محدود می‌شود و در مناطق روشن صحنه (در محل برخورد باریکه لیزر به سطح قطعه) اختلال ایجاد می‌کند. شدت نور کم نیز باعث ایجاد انسداد و یا خطا در ردیابی خط لیزر می‌گردد. بخشی از خطای موجود در نمودارهای شکل ۹ می‌تواند ناشی از خطای کالیبراسیون و یا خطای رجیسترینگ باشد.

۴-۲- آزمون‌های دسته دوم

در این تحقیق شاخص‌های آریبی آزمایشگاهی، دقت، تکرارپذیری و تجدیدپذیری سامانه در حالت تصویربرداری داخل و خارج خیمه بررسی شده و با نتایج تحقیقات قبلی مورد مقایسه قرار گرفته است. در هر بار آزمایش، کالیبراسیون سامانه تکرار گردیده است. فرایند کالیبراسیون در این تحقیق و تحقیقات قبلی [۱۹، ۲۰] یکسان بوده است تا نتایج قابل مقایسه باشند. برای تنظیم متغیرهای تصویربرداری از جمله توازن سفیدی، دیافراگم و زمان نوردهی، از سامانه نورسنجی دوربین‌ها استفاده شده و پس از تشخیص مقادیر بهینه توسط سامانه، تمام متغیرهای قابل تنظیم به حالت غیراتوماتیک برگردانده شده‌اند تا در طول کالیبراسیون و تصویربرداری ثابت بمانند.

¹ Probing Size Error

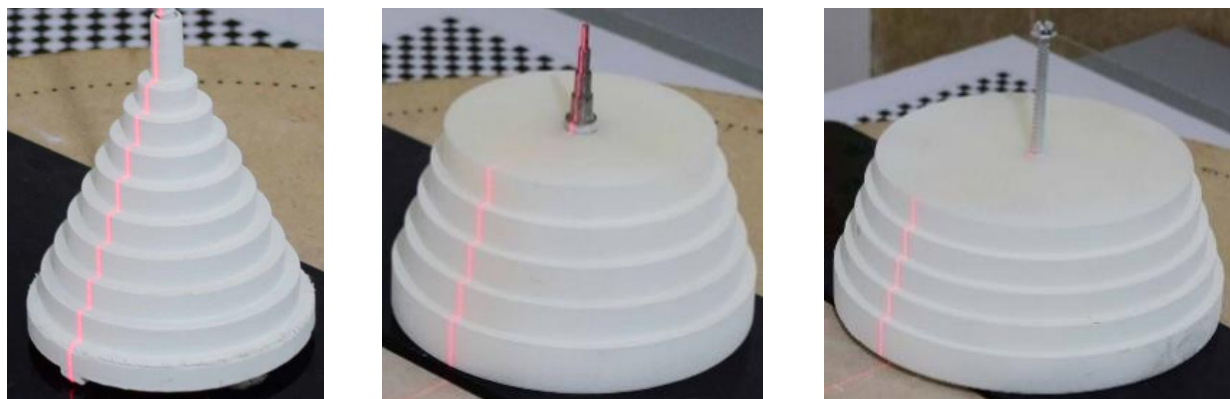
² Probing Form Error

۴-۳- ارزیابی اریبی

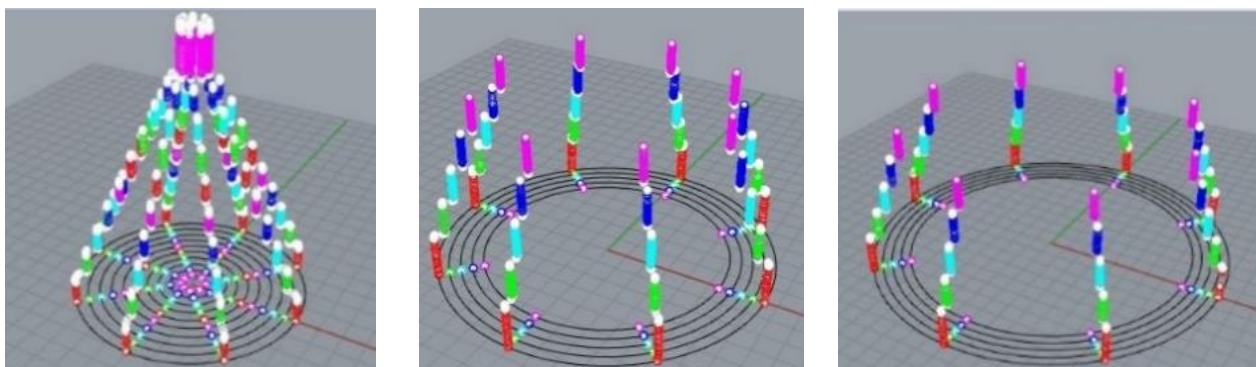
اریبی در برآورد دقت و صحت بر اساس استاندارد ISO5725-4:2020 [۱۸]، به معنای انحراف سیستماتیک نتایج اندازه‌گیری از مقدار واقعی است. به عبارت دیگر، اریبی نشان‌دهنده تفاوت میانگین نتایج اندازه‌گیری‌ها با مقدار مرجع است. این انحراف می‌تواند به دلیل خطاهای سیستماتیک در روش اندازه‌گیری، ابزارهای اندازه‌گیری، یا شرایط آزمایش باشد. اریبی می‌تواند باعث شود که نتایج به‌طور مداوم بالاتر یا پایین‌تر از مقدار واقعی باشند که این موضوع می‌تواند دقت و صحت نتایج را تحت تأثیر قرار دهد [۱۵].

برای بررسی تأثیر نورپردازی در شاخص‌های عملکردی سامانه استرنواسکن نوری سه بعدی، از سنج‌های استوانه‌ای شکل پله‌ای^۱ درون و بیرون خیمه داده‌برداری شده است. سنج‌ها و نحوه استقرار آن‌ها روی میز دوار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در الگوی روش پایه، نمونه‌ها از t دسته ماده که بیانگر t سطح مختلف از آزمون است، به i آزمایشگاه فرستاده می‌شود. در هر یک از آزمایشگاه‌ها نتایج آزمون، با n بار تکرار برای هر یک از سطوح t ، تحت شرایط تکرارپذیر فراهم می‌شود. در این استاندارد، یک آزمایشگاه شامل کاربر، تجهیزات و محل آزمون است. هر گروه از n آزمون باید تحت شرایط تکرارپذیر به شکل جدا از هم اجرا شوند. منظور از آزمایشگاه در استاندارد ISO5725 به معنی مصطلح آن است؛ یعنی آزمایشگاه‌های مختلف در شهر یا کشورهای مختلف که بتوان محصول را در آن‌ها مورد آزمایش قرار داد. اما به دلیل وجود محدودیت در انجام آزمون‌ها در مناطق مختلف و توسط پرسنل مختلف، به انجام آزمون‌ها در شرایط مندرج در استاندارد ISO 5725-3 [۱۸] پرداخته شده است.

دقت سامانه در $t = 20$ سطح و $i = 2$ آزمایشگاه بررسی شده است. آزمایشگاه‌ها در دو حالت، درون و بیرون خیمه در طول ساعات شبانه‌روز تعریف شده‌اند و از هر سطح در شرایط تکرارپذیر $n = 5$ تصویربرداری شده است. منظور از سطح، یک شعاع مشخص از سنج نشان داده شده در شکل ۱۰ است. مقادیر شعاع به عنوان مقدار مرجع پذیرفته شده توسط دیجیتالایزر سه بعدی COMET5 اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱۱ برای نمونه، ابر نقاط خروجی اسکن، نشان داده شده که با برازش استوانه در نرم‌افزار CAD روی هر پله، قطر آن، اندازه‌گیری می‌شود.



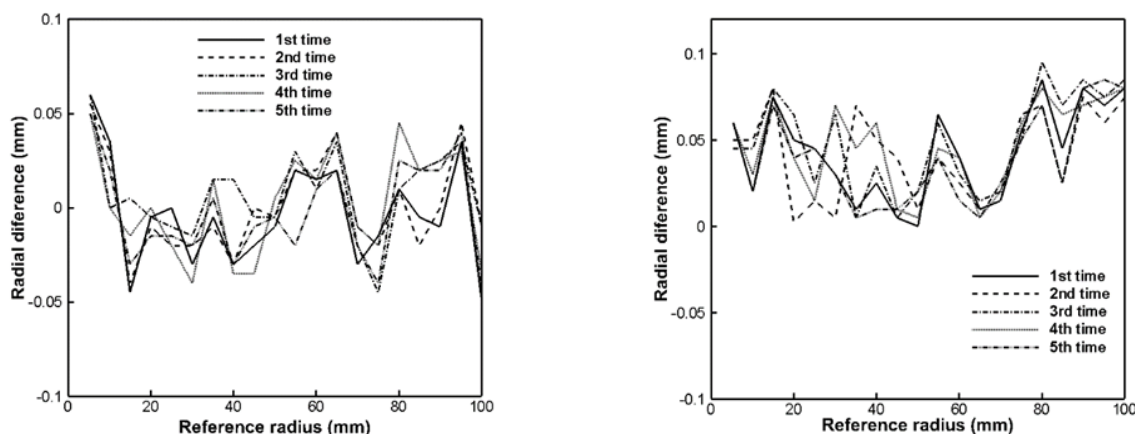
شکل ۱۰ تصاویری از سنج‌های استوانه‌ای بکار رفته جهت ارزیابی شاخص‌های عملکرد سامانه



شکل ۱۱ نمونه‌ایی از ابر نقاط اندازه‌برداری شده از سنج‌های پله‌ای

^۱ Step Gauge Cylindrical Artifact

در نمودارهای شکل ۱۲، تفاضل مقادیر خوانده شده از مقادیر اندازه‌گیری شده (مرجع)، نشان داده شده است. میانگین و انحراف استاندارد خطاهای اندازه در نوبت‌های مختلف، در جدول ۲ گزارش شده‌اند. از داده‌های شکل ۱۲ و جدول ۲ ملاحظه می‌شود میانگین خطاها و دامنه نوسان آن‌ها در حضور خیمه کمتر شده است. همچنین، میانگین خطا در حالت خارج خیمه نسبت به خط صفر، به سمت بالا جابجا شده است که نشان‌دهنده افزایش اریبی آزمایشگاهی در این حالت است. همان‌طور که قبلاً بیان شد در هر آزمون متغیرهای تصویربرداری، تنظیم می‌شوند. لذا در حالت خارج خیمه با شرایط روشنایی غیربهبوده و متغیر، این تنظیمات، متغیر خواهند بود. به عنوان مثال، با افزایش روشنایی، نوردهی و دیافراگم کاهش داده می‌شود که با تغییرات عمق میدان همراه خواهد بود. در مقابل، درون خیمه در هر ساعتی از شبانه روز، بدون نیاز به کالیبراسیون مجدد می‌توان در شرایط کنترل شده و تقریباً ثابتی، آسان‌تر و دقیق‌تر کار کرد.

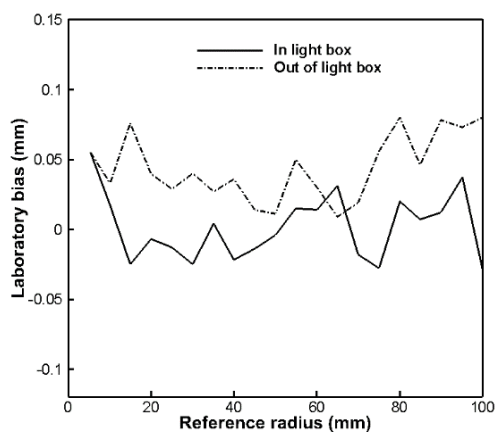


شکل ۱۲ نمودار نتایج اندازه‌گیری سنج‌های استوانه‌ای بیرون خیمه (سمت راست) و درون خیمه (سمت چپ)

جدول ۲ مقایسه خطای اندازه در اندازه‌گیری سنج‌های استوانه‌ای درون و بیرون خیمه

میانگین	Δr_5	Δr_4	Δr_3	Δr_2	Δr_1	تعداد نمونه	
۱/۲	-۲	۳	۷	۱	-۳	۲۰	میانگین خطای اندازه در نوبت (μm)
۲۵/۲	۲۶	۲۵/۲	۲۳	۲۵	۲۷	۲۰	انحراف استاندارد خطا در نوبت (μm)
۴۴/۱	۳۹/۳	۴۷/۵	۴۸/۸	۴۱/۶	۴۳/۳	۲۰	میانگین خطای اندازه در نوبت (μm)
۲۶/۳	۲۶/۲	۲۸/۰	۲۷/۷	۲۵/۷	۲۷/۰	۲۰	انحراف استاندارد خطا در نوبت (μm)

نمودار اریبی آزمایشگاهی درون و بیرون خیمه، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. از مقادیر میانگین و انحراف استاندارد در حالت درون خیمه در جداول ۲ و ۳، ملاحظه می‌شود نورپردازی در خیمه عمده‌تأثیر باعث افزایش اریبی و تبعاً خطا، می‌شود و تأثیر آن بر کاهش نوسانات دامنه خطا و اریبی در این آزمون‌ها نسبت به حالت بیرون خیمه نور محدودتر است. بدیهی است با افزایش زمان داده‌برداری نوسانات دامنه‌ای نیز زیادتر خواهد شد.

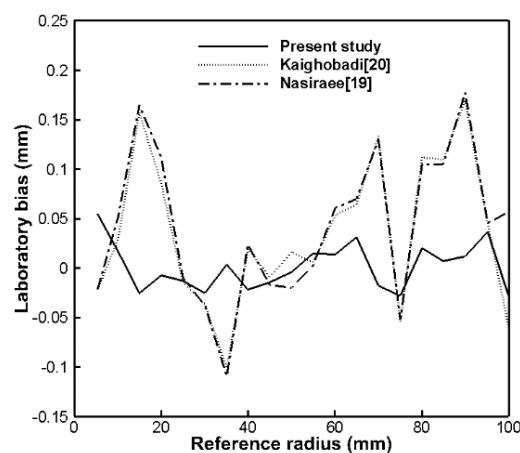


شکل ۱۳ نمودار اریبی آزمایشگاهی

جدول ۳ مقایسه نتایج اریبی با تحقیقات قبلی

تعداد نمونه ها	تحقیق حاضر		تحقیق [۲۰]		تحقیق [۱۹]	
	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد
اریبی (μm)	۱/۳	۲۳/۳	۳۵/۲	۷۳/۸	۴۲/۲	۷۴/۱

اریبی آزمایشگاهی تحقیق حاضر درون خیمه با تحقیقات نصیرایی [۱۹] و کیقبادی [۲۰] در نمودار شکل ۱۴ مقایسه شده است. بیشینه و کمینه اریبی آزمایشگاهی سامانه در تحقیق حاضر، به ترتیب ۰/۰۶ mm و -۰/۰۴ mm حاصل شده است. به این ترتیب دامنه اریبی سامانه ۰/۱۰ mm خواهد بود. این کمیت در تحقیقات تیم های قبلی [۲۰، ۱۹] روی این سامانه، به ترتیب حدود ۰/۲۷ mm و ۰/۲۲ mm برآورد شده است. در جدول ۳، میانگین و انحراف استاندارد اریبی تحقیق حاضر با اریبی تحقیق های قبلی مقایسه شده است. شیفت میانگین اریبی در تحقیق حاضر حول خط صفر و پراکندگی کمتر، نشان دهنده بهبود عملکرد سامانه است.



شکل ۱۴ نتایج اریبی آزمایشگاهی تحقیق حاضر و تحقیقات قبلی

۴-۴-۴ ارزیابی دقت

دقت که اغلب به عنوان تکرارپذیری درون آزمایشگاهی شناخته می شود، میزان سازگاری نتایج به دست آمده از یک آزمایشگاه را در یک دوره طولانی تر، اندازه گیری می کند [۱۸]. برخلاف تکرارپذیری که دقت را تحت شرایط کنترل شده ارزیابی می کند، دقت تغییراتی را که در طول زمان رخ می دهد در نظر می گیرد. به طور کلی این کمیت، نشان می دهد که نتایج به چه میزان به دلیل خطاهای تصادفی، پراکنده هستند. انحراف معیار میانی دقت اندازه گیری، $S_l(T)$ ، از رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$S_l(T) = \sqrt{\frac{1}{t(n-1)} \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^n (y_{jk} - \bar{y}_j)^2} = 0.112\sqrt{0.006932} = 0.029 \text{ (mm)} \quad (1)$$

که در آن y_{jk} شعاع اندازه گیری شده در سطح z و تکرار k ام، $\bar{y}_j$ میانگین شعاع های این سطح و $t=20$ ، تعداد سطوح اندازه گیری شده هستند. مقدار این کمیت برای هر دو حالت درون و بیرون خیمه، تقریباً یکسان بوده است یعنی پراکندگی نتایج حدوداً یکی است ولی اریبی در حالت خارج خیمه به مقدار قابل ملاحظه ای بیشتر است. در جدول ۴ انحراف معیار میانی محاسباتی در تحقیق حاضر با تحقیقات قبلی مقایسه شده است. برای مقایسه پذیر بودن نتایج، اندازه گیری هایی در روز انجام گرفته است.

جدول ۴ مقایسه نتایج انحراف معیار میانی دقت با تحقیقات قبلی

نتایج	انحراف معیار میانی دقت (mm)
تحقیق فعلی	۰/۰۲۹
نصیرایی [۱۹]	۰/۰۷۹
کیقبادی [۲۰]	۰/۰۷۱

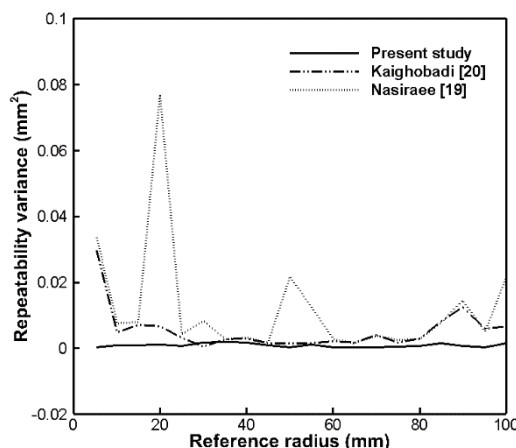
۴-۵- ارزیابی تکرارپذیری

تکرارپذیری عبارت است از قابلیت سامانه اندازه گیری در تولید نتایجی که بسیار به هم نزدیک هستند؛ با این شرط که از اپراتور و تجهیزات اندازه گیری ثابتی استفاده شود [۱۵]. در این حالت، زمان، تنها عاملی است که تغییر می کند. یک سامانه اندازه گیری تکرارپذیر، این اطمینان را فراهم می سازد که نتایج به دست آمده در زمان های مختلف، اختلاف ناچیزی با هم دارند. جهت بررسی تکرارپذیری، انحراف معیار هسته سلول، S_{ij} ، از رابطه ۲ و واریانس تکرارپذیری سطح j ، S_{rj}^2 ، نیز از رابطه ۳ محاسبه شده است. در این روابط، $\bar{y}_{ij}$ ، میانگین شعاع خوانده شده از آزمایشگاه i در سطح j و y_{ijk} شعاع خوانده شده در تکرار k ام هستند. تعداد تکرار آزمون ها در هر سطح، $n_{ij} = 5$ بوده است. چون در این آزمون ها هدف، مطالعه تغییرات زمانی اندازه گیری ها بوده است فقط داده های درون خیمه در نوبت های مختلف استفاده شده اند ($i = 1$). از مقایسه تکرارپذیری به دست آمده با نتایج تحقیقات قبلی می توان به بهبود تکرارپذیری سامانه پی برد (شکل ۱۵).

$$S_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n_{ij}} (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2 / 2} \quad (2)$$

$$S_{rj}^2 = \left(\sum_{i=1}^2 S_{ij}^2 \right) / 2 \quad (3)$$

در جدول ۵، میانگین و انحراف استاندارد واریانس تکرارپذیری در تحقیق فعلی نسبت به تحقیقات [۱۹، ۲۰] به طوری معناداری بهبود یافته است.



شکل ۱۵ نمودار مقایسه تکرارپذیری با نتایج تحقیقات قبلی

جدول ۵ مقایسه نتایج واریانس تکرارپذیری با تحقیقات قبلی

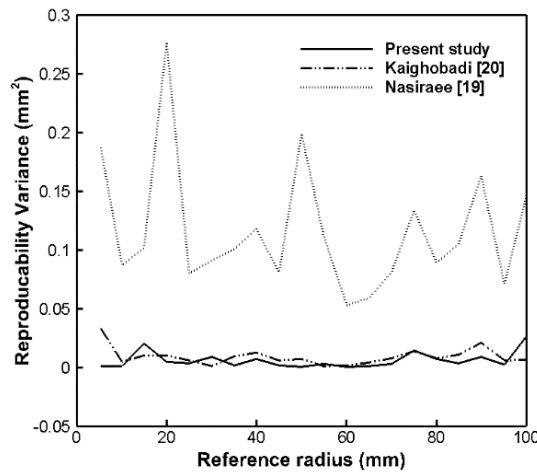
تحقیق حاضر		تحقیق [۲۰]		تحقیق [۱۹]		تعداد نمونه ها	
میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد		
۰/۸	۰/۶	۵/۰	۶/۲	۱۱/۹	۱۷/۴	۲۰	واریانس تکرارپذیری (μm^2)

۴-۶- ارزیابی تجدیدپذیری

تعریف استاندارد تجدیدپذیری سطح j ، S_{Rj}^2 ، طبق روابط ۴، مجموع واریانس تکرارپذیری (S_{rj}^2) و واریانس بین آزمایشگاهی (S_{Lj}^2) در آن سطح است [۱۵]. متغیرهای $\bar{y}_{ij}$ و $\bar{z}_j$ در روابط ۴، به ترتیب میانگین مقادیر قطر خوانده شده از سطح j در آزمایشگاه i و میانگین میانگین آزمایشگاه ها در سطح j هستند. در این بخش، واریانس تکرارپذیری سطح j ، S_{rj}^2 ، با احتساب $i = 2$ برای هر دو حالت درون و بیرون خیمه محاسبه شده است. واریانس بین آزمایشگاهی برای هر سطح نیز در این بخش محاسبه شده است. عنصر متغیر در آزمون های تجدیدپذیری در مطالعات [۱۹، ۲۰]، اپراتور اندازه گیر بوده است. بر این اساس، مقایسه نتایج محاسباتی در شکل ۱۶ نشان می دهد تجدیدپذیری، در تمامی موارد نسبت به تحقیقات [۱۹] و در حدود ۸۰٪ موارد نسبت به نتایج [۲۰]، بهبود یافته است. در جدول ۶ نیز مشاهده می شود

که میانگین و پراکندگی واریانس تجدیدپذیری در روش حاضر نسبت به تحقیق های قبلی بهتر است. بهبود واریانس تجدیدپذیری تحقیق فعلی با تحقیق [۲۰] کمتر بوده است که با انجام تست T بین این دو دسته داده، مقدار $p = ۰/۰۴۳$ به دست می آید که در مقایسه با معیار $p = ۰/۰۵$ ، موثر بودن روش آزمایش به روش فعلی تایید می گردد. یکی از نکاتی که در مورد مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج مراجع [۱۹، ۲۰] باید در نظر داشت نوع دوربین و لنز بکار رفته در این تحقیقات است. چون در مطالعات فوق الذکر از دوربین های نیکون D5300 با لنز Nikor18-140 استفاده شده است قطعاً بخشی از بهبود شاخص های اندازه گیری در تحقیق فعلی ناشی از بکارگیری اپتیک صنعتی دقیق تر است. اما همان طور که از مقایسه نتایج بیرون و درون خیمه در آزمایش های مطالعه فعلی مشاهده می شود بخش قابل ملاحظه ای از بهبود نتایج مرهون استفاده از خیمه عکاسی و نورپردازی موثرتر می باشد. همان طور که انتظار می رود شاخص های تجدیدپذیری در جدول ۶، به دلیل اضافه شدن عنصر خیمه و نورپردازی به متغیر زمان، از شاخص های تکرارپذیری بیشتر شده اند.

$$\begin{aligned} S_{Rj}^2 &= S_{rj}^2 + S_{Lj}^2 \\ S_{Lj}^2 &= (S_{d_j}^2 S_{rj}^2) / 5 \\ S_{d_j}^2 &= \sum_{i=1}^2 5(\bar{y}_{ij} - \bar{\bar{y}}_j)^2 \end{aligned} \quad (۴)$$



شکل ۱۶ نمودار مقایسه نتایج تجدیدپذیری با تحقیقات قبلی

جدول ۶ مقایسه نتایج واریانس تجدیدپذیری با تحقیقات قبلی

تحقیق حاضر		تحقیق [۲۰]		تحقیق [۱۹]		تعداد نمونه ها	واریانس تجدیدپذیری (μm^2)
میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد		
۵/۶	۶/۸	۱۰/۰	۸/۳	۱۱۷/۰	۵۳/۳	۲۰	

۵- نتیجه گیری

همان طور که مشخص شد، روشنایی طبیعی و نورپردازی مصنوعی، نقش قابل ملاحظه ای در نتایج اندازه گیری به روش اسکن نوری با نشانه های لیزری دارند. در این تحقیق، تاثیر روشنایی محیطی بر عملکرد یک سامانه خاص از استرنواسکن نوری سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا تغییرات شدت نور محیطی در اتاق اندازه گیری در ساعات مختلف شبانه روز، اندازه گیری شده و سپس، شرایط مناسب برای اسکن قطعات صنعتی با کاربرد متروлоژی مهندسی تعیین شده است. اعتبارسنجی روش بکار رفته، با استفاده از رویه های استاندارد مرتبط انجام گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده می توان به عنوان نتیجه گیری، به چند نکته زیر اشاره کرد:

(۱) فرض تناسب روشنایی ساعات اولیه صبحگاهی در روزهای آفتابی، برای اسکن قطعات آماده سازی شده با پودر، فرض معتبری است. مقادیر تجربی دما و شدت نور سفید محیطی در حجم اندازه گیری به ترتیب در حدود ۵۸۰۰ ± ۲۰۰ کلوین و ۳۵۰ تا ۴۰۰ لوکس هستند.

۲) ایده استفاده از خیمه عکاسی پیرامون قطعه کار و نورپردازی با پنل‌های LED خطی در تامین پایدار و یکنواخت شرایط پیش گفته موثر است. جلوگیری از پراکنش نور در برخورد با سطح، جلوگیری از ایجاد سایه روی سطوح و جلوگیری از اشباع رنگ تحت این شرایط، در ردیابی نشانه‌های لیزری، به بهبود شاخص‌های اندازه‌گیری کمک می‌کند. پس از ایجاد شرایط مطلوب نورپردازی، بایستی با استفاده از امکانات نورسنجی دوربین‌ها، متغیرهای تصویربرداری به طور خودکار تنظیم شده و از زمان شروع کالیبراسیون تا پایان اسکن ثابت نگه‌داشته شوند.

۳) بر اساس نتایج اندازه‌گیری، بهبود نورپردازی در این فرایند می‌تواند ارببی و در نتیجه دقت اندازه‌گیری را به طور متوسط از مرتبه چند ده میکرون متر و تکرارپذیری و تجدیدپذیری را از مرتبه چند میکرون متر ارتقاء دهد. در صورت افزایش زمان اسکن، پیش‌بینی می‌شود تاثیر نورپردازی بر تکرارپذیری و تجدیدپذیری بیشتر خواهد بود.

۴) در شرایط محیطی یکسان در اتاق اندازه‌گیری، استفاده از خیمه عکاسی به دلیل رفع نیاز به کالیبراسیون مجدد و بازتنظیم متغیرهای تصویربرداری، باعث سهولت و تسریع فرایند می‌گردد.

Reference

- [1] Khoiruddin AA. Linear Profilometry: A low cost 3D acquisition system. IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII); 2015 December 11-13; Nagoya, Japan. IEEE; p. 783-788. doi: 10.1109/SII.2015.7405079
- [2] Zhu Z, Wang Y, Huang C, Xu J, Zhou X. Three-dimensional reconstruction with separation of strong ambient light and depolarization error correction. Optics & Laser Technology. 2026 Jan 1;193:114246. doi: 10.1016/j.optlastec.2025.114246
- [3] Liang J, Ye Y, Gu F, Zhang J, Zhao J, Song Z. A polarized structured light method for the 3D measurement of high-reflective surfaces. In Photonics 2023 Jun 19 (Vol. 10, No. 6, p. 695). MDPI. doi: 10.3390/photonics10060695
- [4] Shi W, Quan H, Kong L. Adaptive specular reflection removal in light field microscopy using multi-polarization hybrid illumination and deep learning. Optics and Lasers in Engineering. 2025 Mar 1;186:108839. doi: 10.1016/j.optlaseng.2025.108839
- [5] Feng L, Kang J, Yuan L, Li H, Chen Y, Zhang Z, Sun Z, Liang J, Wu B. 3D shape measurement method for multi-reflective scenes based on accurate pixel-by-pixel phase-error adjustment strategy. Optics & Laser Technology. 2024 Jul 1;174:110661. doi: 10.1016/j.optlastec.2024.110661
- [6] Zhang R, Duan M, Fan X, Zheng Y, Sun Z, Zheng J, Jin Y. Deep learning-enabled anti-ambient light approach for fringe projection profilometry. Optics Express. 2022 Dec 14;30(26):47672-89. doi: 10.1364/OE.477747
- [7] Blanco D, Fernández P, Valiño G, Rico JC, Rodríguez A. Influence of ambient light on the repeatability of laser triangulation digitized point clouds when scanning EN AW 6082 flat faced features. In AIP Conference Proceedings 2009 Nov 23 (Vol. 1181, No. 1, pp. 509-520). American Institute of Physics. doi: 10.1063/1.3273669
- [8] Thongma-Eng P, Amornvit P, Silthampitag P, Rokaya D, Pisitanusorn A. Effect of Ambient Lights on the Accuracy of a 3 - Dimensional Optical Scanner for Face Scans: An In Vitro Study. Journal of Healthcare Engineering. 2022;2022(1):2637078. doi: 10.1155/2022/2637078
- [9] Arakida T, Kanazawa M, Iwaki M, Suzuki T, Minakuchi S. Evaluating the influence of ambient light on scanning trueness, precision, and time of intra oral scanner. Journal of prosthodontic research. 2018;62(3):324-9. doi: 10.1016/j.jpor.2017.12.005
- [10] Rachakonda P, Muralikrishnan B, Sawyer D. Sources of errors in structured light 3D scanners. In Dimensional optical metrology and inspection for practical applications viii 2019 May 13 (Vol. 10991, pp. 25-37). SPIE.
- [11] Gupta M, Yin Q, Nayar SK. Structured light in sunlight. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision 2013 (pp. 545-552).
- [12] Voisin S, Foufou S, Truchetet F, Page D, Abidi M. Study of ambient light influence for three-dimensional scanners based on structured light. Optical Engineering. 2007 Mar 29;46(3):030502-. doi: 10.1117/1.2717126
- [13] Ansari M, Amirian G, Emam SM, Hemmati SJ. Design and build an active stereo scanner and validation of results from a metrological viewpoint. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2019 May 22;6(2):20-9. [In Persian]
- [14] VDI/VDE 2634 Blatt 3:2008-12. Optical 3D-measuring systems - Multiple view systems based on area scanning. Germany: Verein Deutscher Ingenieure/ Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik; 2008.

- [15] ISO 5725-2:2019. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. Geneva: International Organization for Standardization; 2019.
- [16] Hasinoff SW. Saturation (imaging). In: Ikeuchi K, editor. Computer Vision: A Reference Guide. Cham: Springer; 2021. doi: [10.1007/978-3-030-63416-2_483](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63416-2_483)
- [17] ISO 5725-4:2020. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 4: Basic methods for the determination of the trueness of a standard measurement method. Geneva: International Organization for Standardization; 2020.
- [18] ISO 5725-3:2023. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 3: Intermediate precision and alternative designs for collaborative studies. Geneva: International Organization for Standardization; 2023.
- [19] Mokar Nasiraei A. Performance evaluation of a 3D scanning system with multiple line laser targets [master's thesis]. Bandar Abbas, Hormozgan, Iran: University of Hormozgan; 2022. [In Persian]
- [20] Kaighobadi M. Evaluation of measurement indices for a structuralized light stereo-scanner [master's thesis]. Bandar Abbas, Hormozgan, Iran: University of Hormozgan; 2020. [In Persian]