

توسعه راهکاری مبتنی بر تکنیک‌های فتومتری به منظور رصد پیوسته خورشید

محسن بهنودیان^۱، علیرضا صفدری نژاد^{۲*}، سیّد عبدالله کیانزاد تجنکی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری گرایش فتوگرامتری، گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش

۲- استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تفرش

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۳

چکیده

رصد مشاهداتی خورشید در کاربردهای مختلفی مانند تنظیم جهت‌گیری صفحات خورشیدی در نیروگاه‌های خورشیدی، بررسی نحوه اثرگذاری جو در تمایز راستای مشاهداتی و واقعی خورشید، تعیین لحظات شرعی و زمان قابل استفاده است. اندازه‌گیری آزمایشات و زاویه ارتفاعی خورشید در یک سیستم مختصات توپوسنتریک برای تعیین راستای خورشید کافی است. در این مقاله یک سامانه ساده جهت رصد پیوسته خورشید بدون نیاز به سازوکارهای رباتیک طراحی شده است. تصویربرداری از یک سطح محدب تیره و تعیین راستای تابش خورشید از طریق مشاهده بازتاب آن در سطح محدب، سنگ‌بنای طراحی این سامانه محسوب می‌شود. در روش پیشنهاد شده، موقعیت لکه براق خورشید در سطح محدب بطور خودکار شناسایی شده و با معلوم بودن راستای بازتاب و نرمال سطح، راستای خورشید بازیابی می‌گردد. مدل‌سازی سه‌بعدی سطح محدب و همچنین کالیبراسیون هندسی سامانه از اقدامات فنی اولیه در این روند محسوب می‌گردند. طراحی یک راهکار کالیبراسیون میدانی بمنظور تبدیل مشاهدات از سیستم مختصات محلی به مرجع یک سیستم مختصات توپوسنتریک از دیگر مشارک‌های نوآورانه این تحقیق قلمداد می‌شود. نتایج نشان داد که دقت این سامانه در تعیین ظهر شرعی ۲۹/۷ ثانیه، در بازیابی عرض جغرافیایی خورشید ۰/۳۱ درجه و در تعیین موقعیت جغرافیایی دقتی نزدیک به نیم درجه را برخوردار است. این دقت در کاربردهای غیردقیق نجومی و تنظیم جهت‌گیری صفحات خورشیدی مناسب خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: رصد خورشید، فتومتری، مدل‌سازی سه‌بعدی، سیستم مختصات توپوسنتریک، کالیبراسیون.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تفرش، ابتدای جاده تهران، دانشگاه تفرش، گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری. کد پستی: ۳۹۵۱۸-۷۹۶۱۱

تلفن: ۰۹۱۲۳۲۵۸۸۵۲

۱- مقدمه

بشر در حال حرکت به سمت بکارگیری انرژی‌های پاک بعنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی است. انرژی الکتریکی یکی از منابع انرژی تلقی شده که به کمک جریان آب، گرمایش زمین، نور خورشید و باد قابل تولید است [۱]. تولید انرژی الکتریکی برپایه بکارگیری چنین منابعی منجر به ایجاد چرخه پاک می‌گردد [۲]. بطور متوسط، انرژی تابشی تامین شده از نور مستقیم خورشید در سطح زمین حدود یک کیلو وات بر مترمربع بوده که در حالت ایده‌آل و در زمان بکارگیری صفحات خورشیدی با راندمان صد درصدی می‌تواند بطور کامل به انرژی الکتریکی تبدیل گردد [۳]. راندمان صفحات خورشیدی به شاخص‌هایی همچون میزان اتلاف گرمایی، کدر شدگی و جهت‌گیری صفحه نسبت به خورشید وابسته است [۳]. راستای خورشید بطور متوسط در هر چهار دقیقه یک درجه تغییر می‌کند. در صورت ثبات در جهت‌گیری صفحات خورشیدی، شدت انرژی الکترومغناطیس دریافت شده در واحد سطح بطور پیوسته در حال تغییر خواهد بود. چرخش صفحات خورشیدی در طول روز با هدف ایجاد زاویه مناسب نسبت به خورشید یک رویکرد اجرایی به‌منظور افزایش بهره‌وری در تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های فتوولتائیک محسوب می‌شود [۴]. از این رو، تعیین لحظه‌ای راستای خورشید پیش‌نیاز دستیابی به این مهم تلقی می‌شود. در کاربردهای دیگری نیز همچون اندازه‌گیری شار تابشی مستقیم و پراکنده شده خورشید در مطالعات جوی، مدلسازی انکسار جو، تعیین موقعیت و راستای شمال جغرافیایی، اندازه‌گیری زمان، پایش حرکت وضعی و انتقالی زمین در منظومه شمسی و تعیین لحظات شرعی، رصد راستای خورشید کارساز خواهد بود [۵، ۶ و ۷].

مسیر و راستای لحظه‌ای خورشید از طریق محاسبات

نجومی و یا بکارگیری روش‌های مشاهداتی قابل تعیین است [۸]. در روش‌های محاسباتی، با دانش به زمان، راستای شمال و موقعیت جغرافیایی، امتداد لحظه‌ای خورشید در قالب دو زاویه آزیموت و زاویه ارتفاعی تعیین می‌گردد [۹]. وجود انکسار موجب تمایز بین راستای حقیقی و ظاهری خورشید شده که به دلیل تغییرات روزانه در روند دما و فشار جو، این اتفاق به صورت یک انحراف زمانمند مشاهده می‌شود [۱۰]. تمایز راستای ظاهری و حقیقی خورشید در زمان طلوع و غروب خورشید به دلیل مسیر طولانی‌تر عبور نور در جو بیشتر از اواسط روز است [۱۱]. مسیر ظاهری خورشید در کاربردهای مرتبط با تنظیم جهت صفحات خورشیدی، اندازه‌گیری شار تابشی مستقیم و پراکنده شده خورشید، مدل‌سازی انکسار و تعیین زمان‌های شرعی موثر بوده و راستای حقیقی خورشید در کاربردهای نجومی دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تاکنون ابزارهای مختلفی با هدف رصد و تعقیب خورشید توسعه یافته است [۱۲ و ۱۳]. این ابزارها از جنبه طراحی به دو ساختار مشاهده مستقیم و غیرمستقیم خورشید قابل تفکیک بوده و از منظر روش پردازشی در دو شکل الگوریتم‌های ماشین بینایی^۲ و پردازش سیگنال^۳ به اجرا می‌رسند [۱۴ و ۱۵]. مشاهده مستقیم خورشید مستلزم تجهیز ابزارها به عملگرهای چرخش سنجنده بوده و روش‌های غیرمستقیم تجهیزات رباتیک^۴ کمتری را نیازمندند. در ادامه برخی از تحقیقات صورت گرفته در این حوزه مرور شده است [۱۶].

چنگ و همکاران (۲۰۱۳) یک سامانه رباتیک مبتنی بر بینایی ماشین جهت ردیابی خورشید توسعه داده‌اند. انطباق مرکز تصویر سامانه بینایی ربات با مرکز خورشید هدف نهایی سامانه توسعه یافته است. برای

² Machine vision³ Signal Processing⁴ Robotic¹ Photovoltaic Power Plants

روش‌های مشاهده مستقیم خورشید چالش بروز اشباع‌شدگی در جات روشنی تصویر را بر خودار است [۲۱]. جراردو و خوان (۲۰۱۹) با تعیین موقعیت مرکز خورشید در تصاویر اخذ شده از دوربین‌های مجهز به عدسی‌های چشم‌ماهی توانستند زاویه ارتفاعی و آزیموت خورشید را بازیابی نمایند. اینکار نیازمند تنظیم وضعیت دوربین نسبت به شمال و تعیین پارامترهای کالیبراسیون داخلی دوربین بوده است [۲۰]. عدم رؤیت‌پذیری خورشید در آسمان ابری منجر به توسعه راهکارهای پیش‌بینی شده است. از این رو، کوئنتین و لاسنی (۲۰۲۰)، تصاویر اخذ شده از آسمان توسط دوربین‌های مجهز به عدسی‌های چشم‌ماهی را از منظر رؤیت‌پذیری خورشید به دو دسته تفکیک نمودند. ایشان در زمان پنهان بودن خورشید از تقویم نجومی برای تکمیل مسیر حرکت خورشید استفاده نمودند. در این راهکار، معلوم بودن زمان دقیق و موقعیت جغرافیایی محل استقرار دوربین برای پیش‌بینی موقعیت حقیقی خورشید الزامی بوده و اختلافات در تعیین راستای ظاهری خورشید ناشی از انکسار در این فرایند لحاظ نشده است [۲۲]. سعیدی و عفت‌نژاد (۲۰۲۱) نیز در زمان وجود ابر از سنجنده‌های نوری غیر تصویری برای تعیین راستای خورشید استفاده نمودند [۲۳]. ترکیب نتایج محاسباتی موقعیت خورشید بر اساس مکان و زمان و مشاهده مستقیم نیز نمونه‌ای از اقدامات صورت گرفته در زمینه رصد خورشید است [۲۴، ۲۵، ۲۶]. کومار و همکاران (۲۰۲۱) با آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی موقعیت ثبت خورشید در تصویر اخذ شده از آسمان را به پارامترهای موقعیت خورشید تبدیل نمایند. در این روند، ثبت تصویر از موقعیت‌های مختلف خورشید در طول روز و موقعیت محاسباتی خورشید مبنای آموزش شبکه عصبی قرار گرفته است [۲۴].

در این تحقیق یک سامانه رصد غیرمستقیم خورشید به

این منظور ابتدا موقعیت مرکز دایره خورشید در تصویر لحظه‌ای اخذ شده از آسمان شناسایی شده و سپس، بازوهای ربات جهت دوربین را با هدف انطباق مرکز خورشید با مرکز تصویر اصلاح می‌کنند. شناسایی مرکز دایره خورشید برپایه برازش دایره بر لبه‌های روشنایی خورشید صورت گرفته و از فیلترهای کاهنده نور جهت جلوگیری از اشباع رادیومترکی تصاویر استفاده شده است. سردرگمی شناسایی خورشید در هنگام پوشش خورشید توسط ابر و ضرورت راه‌اندازی اولیه در شرایط رؤیت کامل خورشید از محدودیت‌های این سامانه قلمداد می‌شود [۱۷]. سازوکار مشابهی نیز توسط عبدالرحیم و همکاران (۲۰۱۴) توسعه یافته که در آن موقعیت مرکز خورشید از طریق تبدیل هاف‌آدر لبه‌های مستخرج از تصویر خورشید شناسایی می‌شود [۱۸]. شناسایی روشن‌ترین ناحیه تصویر پس از ضرب پیچشی آن با یک هسته گوسی نیز در زمره روش‌های توسعه یافته در سامانه‌های رصد خورشید برپایه روش‌های بینایی ماشین قرار دارد [۱۹].

بجز دوربین‌های معمولی از دوربین‌های مجهز به عدسی‌های چشم‌ماهی نیز در رصد آسمان استفاده شده است [۲۰]. امکان رؤیت همزمان افق تا افق در این دوربین‌ها نیاز به بکارگیری بازوهای رباتیک را کاهش می‌دهد. خوزه و همکاران (۲۰۱۸) از دوربین‌های مذکور برای رصد موقعیت خورشید در آسمان جهت تنظیم جهت‌گیری صفحات خورشیدی نیروگاه‌های فتوولتائیک استفاده نمودند. راهکار پردازشی ایشان مبتنی بر شبکه‌های عصبی الکسنت^۵ بوده که یادگیری عمیق آن با هدف شناسایی خورشید از سایر پدیده‌ها صورت پذیرفته بود. این روش مانند سایر

¹ Radiometer

² Hough Conversion

³ Fish Eye

⁴ Neural Networks

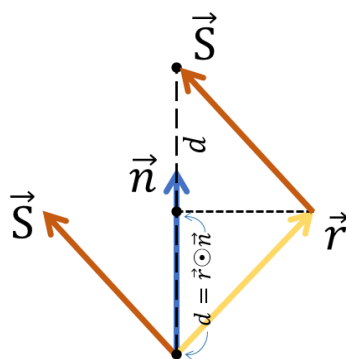
⁵ Alexnet

⁶ Azimuth

دیجیتال جلوگیری می‌کند. علاوه بر مزایای فنی مطرح شده در این سامانه، این مقاله در برگیرنده یک رویکرد نوآورانه جهت رصد خورشید بعنوان یکی از اجرام سماوی مورد رصد در مشاهدات نجوم ژئودزی برای دانشجویان رشته مهندسی نقشه‌برداری بوده که همچنین از گام‌های اجرایی آن می‌توان در کاربردهای دیگری همچون ترازگذاری ابرنقاط سه‌بعدی نیز استفاده نمود.

۲- روش‌شناسی

مطابق با شکل (۱-الف)، سامانه توسعه یافته در این تحقیق مشتمل بر یک سطح محدب و یک دوربین ویدئویی با موقعیت ثابت بوده که بطور پیوسته از سطح محدب تصویربرداری می‌کند. سازوکار این سامانه مبتنی بر شناسایی خودکار لکه براق ناشی از تابش خورشید در سطح محدب و بازیابی راستای خورشید برپایه راستای بازتاب نور و بردار عمود بر سطح در موقعیت لکه براق است (شکل (۱-ب)).



ب) سازوکار هندسی برآورد راستای خورشید

شکل ۱: نمایی شماتیک از اجزاء و سازوکار هندسی سامانه رصد خورشید مبتنی بر روش‌های فتومتریک

وسیله یک سطح محدب، تیره و براق مبتنی بر روش‌های فتومتریک توسعه یافته است. عدم نیاز به نشانه‌روی مستقیم به خورشید و تجهیزات رباتیک، نصب و راه‌اندازی ساده با امکانات محدود، امکان کالیبراسیون صحرائی صرفاً به کمک خطوط شاقولی و رویکرد هندسی بکاررفته در طراحی و آماده‌سازی این سامانه از جنبه‌های نوآورانه آن قلمداد می‌شود. ویژگی‌های ذکر شده باعث شده که سامانه توسعه یافته را بتوان در هر محیطی به سادگی راه‌اندازی نمود. از دیگر ویژگی‌های این سامانه می‌توان به عدم نیاز به دانش نسبت به موقعیت جغرافیایی محل استقرار و یا زمان محلی بوده که برخی از سامانه‌های رصد خورشید به آنها برای نشانه‌گیری اولیه ابزارک‌های رباتیک نیازمندند. سطح تیره بکاررفته در این سامانه نسبت به آینه‌های محدب با بازتابندگی بالا نیز امکان شناسایی موقعیت خورشید را بدون احتمال اشباع شدگی درجات خاکستری در سایر نواحی سطح محدب فراهم آورده و از تداوم ورود شار تابشی شدید بعنوان یکی از عوامل استهلاک آرایه‌های حساس به نور در دوربین‌های



الف) نمایی از سامانه رصد خورشید

در رابطه (۱)، $\odot$ نماد ضرب داخلی دو بردار و $\times$ نماد ضرب اسکالر و یک بردار را نشان می‌دهند. در این رابطه راستای خورشید به نحوی برآورد شده که در صفحه گذرنده از دو بردار $\vec{r}$ و $\vec{n}$ واقع گردیده و زاویه آن با بردار $\vec{n}$ هم‌اندازه با زاویه بین دو بردار $\vec{r}$ و

بافرض بازتاب نزدیک به آینه‌ای در محل لکه براق و معلوم بودن مولفه‌های بردار راستای بازتاب ($\vec{r}$) و بردار یکه عمود بر سطح ($\vec{n}$)، بردار راستای خورشید ($\vec{S}$) بصورت رابطه (۱) قابل برآورد خواهد بود.

$$\vec{S} = 2\langle \vec{r} \odot \vec{n} \rangle \times \vec{n} - \vec{r} \quad \text{رابطه (۱)}$$

پوسته خارجی آنتن‌های مقعر به دلایل مختلفی همچون باقی ماندن زوائد و عدم امکان تامین شعاع انحنای یکنواخت کنار گذاشته شده‌اند. با توجه به اینکه در بهترین حالت (نبود هرگونه مانع در افق) طلوع و غروب خورشید در زاویه ارتفاعی صفر درجه رخ می‌دهد؛ یک مقطع نیم‌کره‌ای از این حباب‌ها برای ساخت سطح محدب کافی است. از این رو، با ساخت یک محفظه تلاش شده تا از باقیمانده حباب به‌عنوان بخش متصل به پایه دستگاه استفاده شود (شکل ۲-ب). رنگ اولیه پوسته حباب، سفید مات با قابلیت عبور نور بود. هرچند که رنگ‌های دیگری نیز در ساخت حباب‌های مشابه استفاده شده، اما قابلیت عبور نور در همه آن‌ها وجود داشت. قابلیت عبور نور منجر به تضعیف شدت بازتاب لکه برآق خورشید شده و به همین دلیل سطح آن از طریق رنگ مشکی کدر رنگ‌آمیزی گردید. استفاده از رنگ‌های روشن امکان اشباع‌شدگی درجات خاکستری هنگام قرارگیری سطح محدب در معرض نور خورشید را تشدید ساخته و تمایز کمتری را بین لکه برآق و سایر نواحی ایجاد می‌سازند. این موضوع آشکارسازی خودکار لکه برآق را با محدودیت مواجه می‌سازد. از دیگر نکات مهم در روند ساخت سطح سه‌بعدی، رنگ‌آمیزی نیمه‌کاره آن قبل از تولید مدل سه‌بعدی بود (شکل ۲-ب). این اقدام منجر به ایجاد بافت کافی در روند بازسازی سه‌بعدی به کمک روش‌های ساختار از حرکت (SfM) گردید [۲۸]. مطابق با شکل (۲-پ)، سطح محدب دارای یک پایه مسطح بوده که بر روی آن علائمی ترسیم شده است. این علائم در مرحله بعد (مدل‌سازی سه‌بعدی و برآورد بردارهای نرمال سطح) مختصات‌دهی شده و از آن برای تعیین پارامترهای خارجی دوربین ویدئویی استفاده می‌شود.

خواهد بود. توصیف هندسی این رابطه را می‌توان به سادگی در شکل (۱-ب) مشاهده نمود. برآورد بردار لحظه‌ای $\vec{g}$ در یک سیستم مختصات توپوسنتریک^۱ دست‌راستی هدف نهایی این تحقیق است. مبداء یک سیستم مختصات توپوسنتریک، نقطه‌ای در سطح زمین، راستای محور سوم (z) هم‌جهت با امتداد زنیط^۲ و محور دوم (y) آن در صفحه نصف‌النهار گذرنده از مبداء و هم‌سو با امتداد شمال جغرافیایی است [۲۷]. تعیین راستای بردارهای لحظه‌ای $\vec{g}$ در چنین سیستم مختصاتی قابل تبدیل به زوایای آزیموت و زاویه ارتفاعی خورشید در موضع ظاهری آن خواهد بود. روند ساخت، آماده‌سازی و کالیبراسیون^۳ این سامانه مشتمل بر هفت گام ۱- ساخت سطح محدب، ۲- مدل‌سازی سه‌بعدی و برآورد بردارهای نرمال سطح^۴ محدب، ۳- کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی، ۴- نصب و توجیه دوربین ویدئویی نسبت به سطح محدب، ۵- سازوکار پردازشی به‌منظور رصد لکه برآق خورشید و تعیین راستای اولیه خورشید، ۶- تبدیل بردارهای راستای اولیه خورشید به مرجع یک سیستم مختصات توپوسنتریک و ۷- سازوکار پیش‌بینی موقعیت خورشید، بوده که هر کدام در زیربخش‌ها بعدی به تفصیل تشریح شده‌اند.

۲-۱- آماده‌سازی سطح محدب

در این تحقیق از حباب روشنائی معابر بعنوان سطح محدب استفاده شده است (شکل ۲-الف). این حباب‌ها با جنس پلاستیک خشک در قطرهای مختلفی بصورت صنعتی تولید شده و در بازار موجود است. انتخاب این سطوح به دلیل شکل کروی و انحنای ثابت آنها بوده است. در این تحقیق، تلاش‌های اولیه به منظور ساخت سطح محدب از طریق قالب‌گیری گچی و یا بکارگیری

¹ Topocentric Coordinate System

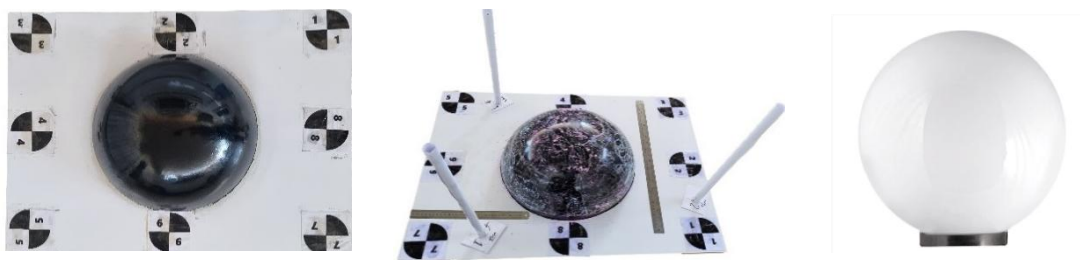
² Zenith

³ Calibration

⁴ Surface Normal Vectors

⁵ Structure from Motion

⁶ Target



الف) حباب با قطر ۴۰ سانتی‌متر (ب) سطح محدب و پایه هنگام مدل‌سازی سه‌بعدی (پ) سطح محدب نهایی پس از رنگ‌آمیزی

شکل ۲: حباب تیرهای روشنایی با قطر ۴۰ سانتی‌متر، سطح محدب نهایی پس از رنگ‌آمیزی و پایه‌گذاری

در روند بازسازی سه‌بعدی از دوربین ۱۲ مگاپیکسلی و غیرمتریک تلفن همراه هوشمند *SUMSUNG S21fe* استفاده شده است. تمامی تنظیمات مرتبط با وضوح خودکار دوربین غیرفعال بوده و پارامترهای داخلی دوربین لحظاتی قبل از اخذ تصاویر مربوط به سطح محدب به کمک اخذ تصاویر متعدد دیگری از یک میدان آزمون متشکل از یک صفحه شطرنجی در محیط نرم‌افزار متاشپ برآورد شده بود. این اقدام با هدف حصول اطمینان از تامین مشاهدات تصویری کافی و دقیق در روند کالیبراسیون داخلی دوربین به اجرا رسیده است.

در روند بازسازی سه‌بعدی سطح محدب، چند فاصله معلوم^۳ در جهات مختلف نیز با هدف مقیاس‌دهی و تضمین مقیاس یکنواخت در سطح مدل سه‌بعدی استفاده شده است. این اقدام مطابق با شکل (۳)، از طریق دو خط‌کش بصورت افقی و سه میله با طول مشخص و علامت‌گذاری شده بصورت عمود بر سطح پایه به اجرا رسیده است. انتظار می‌رود که بکارگیری فواصل معلوم در راستاهای مختلف علاوه بر تنظیم مقیاس مدل سه‌بعدی، از بروز خطای عدم یکنواختی مقیاس نیز در بازسازی سه‌بعدی جلوگیری نماید. دقت بازسازی سه‌بعدی سطح در این مرحله از دو منظر اندازه‌گیری شده است. در منظر نخست، دقت بازیابی فواصل معلوم بعنوان معیاری از صحت بازسازی

۲-۲- مدل‌سازی سه‌بعدی و برآورد بردارهای

نرمال سطح محدب

مطابق با رابطه (۱)، دستیابی به بردار عمود بر سطح برای هر نقطه به منظور بازیابی راستای خورشید ضروری است. بردار عمود بر سطح یک ویژگی هندسی محلی از سطح تلقی شده که پس از مدل‌سازی سه‌بعدی و از طریق تحلیل‌های ساده مکانی قابل برآورد است. در این تحقیق، از روش‌های SfM جهت بازسازی سه‌بعدی سطح استفاده شده است [۲۹]. اخذ تصاویر متعدد از منظرهای متفاوت، داده‌های لازم را برای بازسازی سه‌بعدی در روش‌های SfM فراهم می‌آورند [۳۰]. نرم‌افزارهای متنوعی برای این منظور توسعه یافته‌اند که در این تحقیق از یکی از مشهورترین آنها با نام متاشپ^۱ نسخه ۱،۸،۴ استفاده شده است. سازوکار نرم‌افزارهای SfM مبتنی بر تناظریابی عارضه‌مبنای میان تصاویر ورودی با هدف تشکیل معادلات مرتبط با برآورد همزمان موقعیت ایستگاه‌های عکسبرداری در قالب یک مثلث‌بندی آزاد و سپس بکارگیری روش‌های تناظریابی متراکم به منظور تولید ابرنقاط سه‌بعدی از طریق اجرای مکرر فرایند تقاطع فضایی است [۳۱]. شکل (۳) جانمایی ایستگاه‌های عکسبرداری و همچنین چند تصویر نمونه از تصاویر اخذ شده با هدف بازسازی سه‌بعدی سطح محدب را نشان می‌دهد.

^۱ Metashape

^۲ Based Matching

^۳ Scale bar

دستگاه در این فرایند مشارکت نداشته‌اند. جدول (۱) گزارشی از تعداد فواصل معلوم، صحت بازسازی آنها و همچنین دقت برازش کره به ابرنقاط سطح محدب ارائه شده است.

سه‌بعدی و در منظر دوم، ضخامت ابرنقاط نسبت به یک رویهٔ کره‌ای برازش یافته به آن، بعنوان معیاری از دقت بازسازی سه‌بعدی محاسبه شده است. برای اینکار، از معادله کره جهت برازش به ابرنقاط استفاده شده است. لازم به ذکر است که کره صرفاً در محدوده سطح محدب برازش یافته و نقاط سه‌بعدی واقع در پایه



شکل ۳: شبکهٔ ایستگاه‌های عکسبرداری و چند نمونه از تصاویر اخذ شده از سطح محدب با هدف بازسازی سه‌بعدی در نرم‌افزار متاشیپ

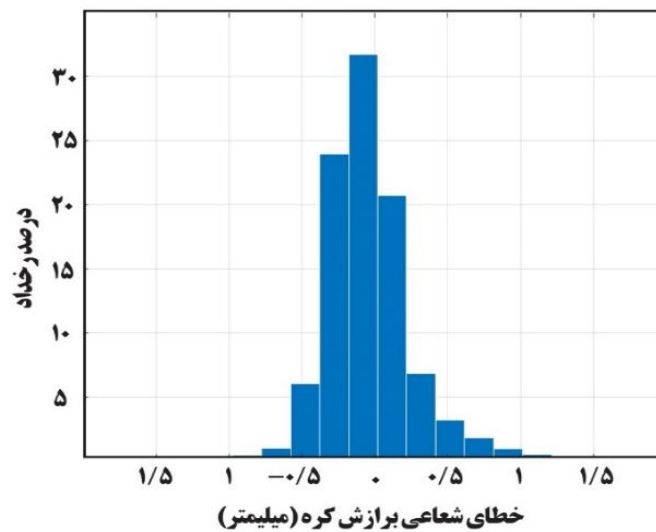
جدول ۱: جزئیات مرتبط با سنجش دقت و صحت بازسازی سه‌بعدی سطح محدب

مقدار	پارامتر
۵	تعداد فواصل معلوم
۲/۱۴۵ میلی‌متر	$RMSE$ بازسازی فواصل معلوم
۰/۱۹۷ میلی‌متر	$RMSE$ بردار باقیمانده‌های برازش کره به ابرنقاط

اجرایی به‌منظور تولید بردارهای نرمال سطح در این نرم‌افزار، برازش محلی صفحه به هر نقطه از ابرنقاط با در نظر گرفتن نقاط هم‌جوار در یک شعاع همسایگی محدود است. شعاع همسایگی در این فرایند معادل با ۱/۵ برابر تراکم ابرنقاط تعیین می‌گردد. تراکم ابرنقاط سه‌بعدی نیز از طریق محاسبهٔ میانگین فاصله سه‌بعدی بین نقاط در ابرنقاط تعیین می‌شود.

شکل (۴) هیستوگرام اختلاف شعاعی ابرنقاط نسبت به سطح کره را نشان می‌دهد. مطابق با این هیستوگرام، اختلاف سطح بازسازی شده نسبت به یک کره ناچیز و در بدترین شرایط نزدیک به یک میلی‌متر بوده است. پس از تولید ابرنقاط سه‌بعدی مربوط به سطح محدب، به ازای هر نقطه یک بردار نرمال از طریق تحلیل نقاط هم‌جوار آن برآورد می‌شود. این اقدام از طریق نرم‌افزار کلود کامپیر نسخه ۲،۸،۱ به اجرا رسیده است. سازوکار

^۱ Cloud Compare



شکل ۴: هیستوگرام اختلاف شعاعی ابرنقاط نسبت به سطح کره برازش یافته

مقیاس به منظور هم‌اندازه‌سازی بردارهای فضای شی و تصویر و $R_X(w)$ ، $R_Y(\varphi)$ و $R_Z(\kappa)$ نیز به ترتیب ماتریس‌های دوران سه‌بعدی حول محورهای اول، دوم و سوم سیستم مختصات سه‌بعدی جهت موازی ساختن دو سیستم مختصات شی و تصویر هستند [۳۲].

مطابق با رابطه (۲)، تمامی عوامل برهم زننده هم‌خطی در صورت برخورداری از رفتار سیستماتیک بعنوان اعوجاج‌های یک سامانه تصویربرداری پرسپکتیو تلقی می‌شوند [۳۳]. تعیین پارامترهای اصلی دوربین اعم از فاصله اصلی، موقعیت مرکز تصویر و همچنین مدل‌سازی رفتار اعوجاجات یک دوربین عکسبرداری، کالیبراسیون داخلی شناخته می‌شود [۳۴]. روند تخمین پارامترهای مرتبط با کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی (و همچنین دوربین بکاررفته در بازسازی سه‌بعدی سطح محدب) از طریق روش خود-کالیبراسیون^۴ به اجرا رسیده است [۳۵]. بکارگیری یک صفحه شطرنجی و اخذ تصویر از زوایای مختلف نسبت به آن، داده‌های لازم برای اجرای روش خود-

۲-۳- کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی

معادله مبنایی فتوگرامتری در برقراری ارتباط موقعیت‌های سه‌بعدی فضا شی با موقعیت متناظر در فضای تصویر معادله مشهور شرط هم‌خطی است (رابطه (۲)).

رابطه (۲)

$$\begin{bmatrix} x - x_0 + \Delta x \\ y - y_0 + \Delta y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R_X(w) R_Y(\varphi) R_Z(\kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

در رابطه (۲)، بردار متصل‌کننده موقعیت سه‌بعدی یک نقطه در فضای شی $[X, Y, Z]^T$ به موقعیت سه‌بعدی مرکز تصویر در فضای شی $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ در لحظه ثبت تصویر، هم‌راستا با بردار موقعیت سه‌بعدی و پالایش‌شده متناظر آن در سیستم مختصات تصویر $[x - x_0 + \Delta x, y - y_0 + \Delta y, -f]^T$ پنداشته می‌شود. در این رابطه، $[x_0, y_0]$ مختصات مرکز تصویر نسبت به مرکز ماتریس تصویر، $[\Delta x, \Delta y]$ اصلاحات لازم به منظور حذف اعوجاجات هندسی تصویر از مختصات مشاهداتی $[x, y]$ ، f فاصله اصلی دوربین، λ ضریب

² Systematic

³ Perspective

⁴ Self Calibration

¹ Geometric Distortions

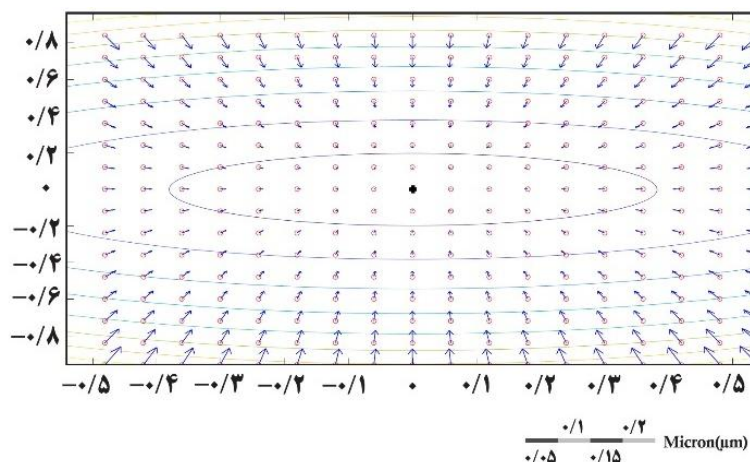
استرالایس، پارامترهای بدست آمده از آن به سادگی در محیط خارج از نرم‌افزار قابل استفاده خواهند بود. مشخصات دوربین ویدئویی مورد استفاده در سامانه رصد خورشید و پارامترهای داخلی محاسبه شده برای آن در جدول (۲) ارائه شده است. در شکل (۵) نیز الگوی اعوجاجات هندسی این دوربین ترسیم شده است.

الگوی سیستماتیک ارائه شده در شکل (۵)، برآیند اعوجاجات شعاعی و مماسی برآورد شده را در روند کالیبراسیون داخلی برای دوربین ویدئویی بکارگرفته شده در سامانه رصد خورشید نشان می‌دهد. بدیهی است که لحاظ نشدن این اختلافات سیستماتیک در تعیین موقعیت نقاط در فضای تصویر اعتبار هندسی رابطه مشهور شرطهم‌خطی را مخدوش خواهد ساخت.

کالیبراسیون را فراهم می‌آورد. محاسبات مرتبط با کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی پس از شناسایی دقیق موقعیت نقاط متناظر در محل تقاطع قطعات سفید و سیاه صفحه شطرنجی، در محیط نرم‌افزار استرالایس (Australis) نسخه ۶.۰۶ انجام شده است. این اتفاق در مورد دوربین مورد استفاده جهت بازسازی سه‌بعدی سطح محدب در نرم‌افزار متاشیپ نسخه ۱.۸.۴ به اجرا رسیده است. علت انتخاب نرم‌افزار متاشیپ برای کالیبراسیون داخلی دوربین مربوط به بازسازی سه‌بعدی سطح محدب، استفاده از همان نرم‌افزار در روند تولید ابرنقاط سه‌بعدی بوده است. این کار تطابق فرمولی معادلات مرتبط با روند کالیبراسیون داخلی و بازسازی سه‌بعدی را تضمین می‌کند. اما با توجه به معلوم بودن دقیق ساختار معادله شرط هم‌خطی و پارامترهای اضافی در نرم‌افزار

جدول ۲: مشخصات و پارامترهای کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی مورد استفاده در سامانه رصد خورشید

Bodyguard_BG_AH BI33_Wide	برند
۵,۳۷×۴,۰۴	ابعاد سنسور (میلیمتر×میلیمتر)
۹۶۰×۱۰۸۰	ابعاد ماتریس تصویر (پیکسل×پیکسل)
۱,۱۳۵	فاصله کانونی (میلیمتر)
$x_0 = 3 \times 10^{-3}$ $y_0 = -4 \times 10^{-3}$	مختصات مرکز تصویر (میکرومتر)
$K_1 = 3,27 \times 10^{-1}$ $K_2 = 1,11 \times 10^{-1}$ $K_3 = 1,09 \times 10^{-1}$	پارامترهای اعوجاج شعاعی
$P_1 = -6,455 \times 10^{-4}$ $P_2 = 5,007 \times 10^{-3}$	پارامترهای اعوجاج مماسی
$B_1 = -1,535 \times 10^{-3}$ $B_2 = -2,425 \times 10^{-4}$	پارامترهای افابیتی



شکل ۵: الگوی اعوجاج دوربین ویدئویی برآورد شده در روند خودکالیبراسیون

۲-۴- نصب و توجیه دوربین ویدئویی نسبت به سطح محدب

طراحی سامانه رصد خورشید برپایه امکان نصب آسان آن در هر مکان صورت گرفته است. اجزای این سامانه شامل دوربین، پایه و سطح محدب از یکدیگر مجزا بوده و در هر موقعیت به دلخواه و متناسب با شرایط محیطی نسبت به یکدیگر نصب و تنظیم می‌شوند. رؤیت لکه براق خورشید در بیشترین بازه زمانی از روز، مهمترین نکته در تنظیم نسبی اجزای این سامانه است. بدیهی است که محدودیت‌های محیطی، شرایط یکسانی را برای نصب اجزای سامانه فراهم نیاورده که این موضوع بازه زمانی رؤیت خورشید را در طول روز تابعی از شرایط محیطی می‌سازد. تغییرات فصلی زاویه ارتفاعی خورشید نیز در بازه زمانی رؤیت پذیری لکه براق اثر گذار بوده که با اعمال تنظیمات فصلی در موقعیت نسبی دوربین و سطح محدب، امکان بهینه‌سازی آن با هدف تامین بیشترین زمان رؤیت‌پذیری لکه براق وجود خواهد داشت.

پس از استقرار نسبی دوربین و سطح محدب، از نقاط علامت‌گذاری شده در حاشیه سطح محدب جهت برآورد پارامترهای خارجی دوربین استفاده می‌شود. موقعیت سه‌بعدی نقاط علامت‌گذاری شده، از ابرنقاط بدست آمده در روند بازسازی سه‌بعدی سطح محدب

(بخش ۲-۲) استخراج می‌شوند. برآورد پارامترهای خارجی دوربین از طریق ترفیع فضایی به کمک معادله مشهور شرط هم‌خطی به اجرا می‌رسد. مقادیر اولیه این فرایند از طریق معادله معادله خطی مستقیم^۱ تامین می‌گردند [۳۶]. لازم به ذکر است که موقعیت تصویری اندازه‌گیری شده (x, y) برای نقاط علامت‌گذاری شده نیز قبل از بکارگیری در روند ترفیع فضایی به کمک پارامترهای کالیبراسیون داخلی $(\Delta x, \Delta y)$ بدست آمده در بخش (۲-۳) پالایش می‌شوند. ماحصل اجرای این بخش تعیین مختصات مرکز تصویر در سیستم مختصات شی (X_0, Y_0, Z_0) و زوایا چرخش ω ، φ و κ خواهد بود (رابطه (۲)).

باید توجه داشت که موقعیت سه‌بعدی ابرنقاط و همچنین نقاط علامت‌گذاری شده بر روی پایه سطح محدب در یک سیستم مختصات آزاد و غیرهمراستا با یک سیستم مختصات توپوسنتریک برآورد می‌گردند. هر بار نصب و راه‌اندازی این سامانه نیز وضعیت متفاوتی را برای سطح سه‌بعدی نسبت به سیستم مختصات توپوسنتریک ایجاد می‌سازد. در این مرحله، صرفاً تعیین ارتباط نسبی دوربین ویدئویی و سطح محدب در دستورکار قرار داشته و در بخش‌های آتی چگونگی

¹ Direct Linear Transformation (DLT)

وجود تمایز روشنی بالای آن با نواحی هم‌جوار است (شکل (۶)). به نظر می‌رسد که این تمایز منجر به حفظ شکل و وسعت قطعه تصویری شامل لکه برآق به ازای تغییر در محدوده زیادی از حدود آستانه گردد. به عبارت بهتر، به دلیل تمایز روشنی شدید در مرزهای لکه برآق، انتظار می‌رود که در یک روند آستانه‌گذاری کاهشی، لکه برآق به ازای تغییر تدریجی حدود آستانه در یک بازه بزرگ، بصورت یک قطعه تصویری پایدار ظاهر گردد.

در روش طراحی شده برای شناسایی لکه برآق تلاش شده تا در روندی کاهشی برای آستانه‌گذاری درجات روشنی تصویر، این لکه به شکل یک قطعه تصویری پایدار آشکارسازی گردد. در این روند، دامنه تغییرات حدآستانه معادل با نیمی از دامنه تغییرات روشنی تصویر در محدوده ماسک سطح محدب انتخاب شده و مناسب‌ترین آستانه برای جداسازی لکه برآق بر اساس تحلیل پایداری وسعت قطعه تصویری حاوی آن شناسایی می‌گردد. با فرض اختصاص داشتن روشن‌ترین پیکسل‌ها از سطح محدب به لکه برآق، در صورت آشکارسازی بیش از یک قطعه تصویری در روند آستانه‌گذاری کاهشی، قطعه تصویری دارای بیشترین متوسط بعنوان قطعه کاندید مورد رصد قرار خواهد گرفت. انتظار می‌رود که اولین قطعه تصویری ظاهر شده به لکه برآق اختصاص داشته و با کاهش مقدار حدآستانه به تدریج قطعات تصویری دیگری ظاهر گردند. انتخاب بازه محدود در روند آستانه‌گذاری (نیمی از دامنه روشنی تصویر در محدوده سطح محدب) برای جلوگیری از افزایش تعداد و یا ادغام قطعات تصویری لحاظ شده است.

انتخاب حدآستانه مناسب برای جداسازی لکه برآق برپایه رصد وسعت قطعه تصویری شامل لکه برآق به اجرا می‌رسد. برای این اقدام، در یک نمودار دوبعدی وسعت قطعه تصویری حاوی لکه برآق (دارای متوسط روشنی بیشتر نسبت به سایر قطعات احتمالی شناسایی شده) بصورت تابعی از حدآستانه مرتبط ترسیم شده و سپس با برازش خطی به ابتدا و انتهای این نمودار،

توجیه سیستم‌مختصات تبیین کننده ابرنقاط سطح محدب نسبت به یک سیستم‌مختصات توپوسنتریک تشریح شده است.

۲-۵- آشکارسازی لکه برآق خورشید در سطح

محدب و تعیین راستای اولیه خورشید

پس از نصب و تنظیم نسبی دوربین و سطح محدب، گام بعدی توسعه سازوکار خودکار در تعیین موقعیت لکه برآق به منظور رصد خورشید است. در این بخش روند پردازشی مرتبط با شناسایی لکه برآق در تصاویر اخذ شده توسط دوربین ویدئویی تشریح شده و سپس نحوه محاسبه راستای اولیه خورشید ارائه شده است.

با توجه به ثبات نسبی دوربین ویدئویی و سطح محدب، در اولین اقدام از روند بهره‌برداری از تصاویر دوربین ویدئویی، ماسکی در محدوده سطح محدب بصورت دستی ترسیم شده تا از حضور سایر پدیده‌های موجود در تصویر در روند پردازشی جلوگیری گردد. این ماسک یکبار پس از نصب و راه‌اندازی سامانه ترسیم شده و تا زمان حفظ شرایط نسبی بین دوربین و سطح محدب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در روند پردازشی طراحی شده، هر تصویر اخذ شده توسط دوربین ویدئویی در محدوده سطح محدب ابتدا از حیث وجود و یا عدم وجود لکه برآق خورشید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. عدم وجود لکه برآق در محدوده سطح محدب منجر به حذف و عدم بکارگیری آن تصویر از روند شناسایی لکه برآق می‌شود. ویژگی لحاظ شده برای سنجش وجود و یا عدم وجود لکه برآق عدم وجود گام خاکستری در بازه ده درصد بالایی از توان تفکیک رادیومتریکی تصویر می‌باشد. این اقدام با فرض دستیابی روشن‌ترین پیکسل از سطح محدب به بالاترین گام خاکستری تصویر هنگام وجود بازتاب آینه‌ای خورشید صورت گرفته است.

ویژگی تصویری لحاظ شده در شناسایی لکه برآق،

¹ Mask

² Pixel

مقدار آستانه مناسب شناسایی می‌شود. در این روند، لکه برآق انتخاب می‌گردد. شبه‌کد ارائه شده در الگوریتم (۱) روند شناسایی قطعه تصویری شامل لکه برآق را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمونه‌ای از یک تصویر اخذ شده توسط دوربین ویدئویی از سطح محدب در زمان وجود بازتاب خورشید

الگوریتم (۱): شبه‌کد مربوط به روند شناسایی لکه برآق مربوط به بازتاب آینه‌ای خورشید در سطح محدب

ورودی‌ها

$M(x,y)$: ماسک دودویی از سطح محدب

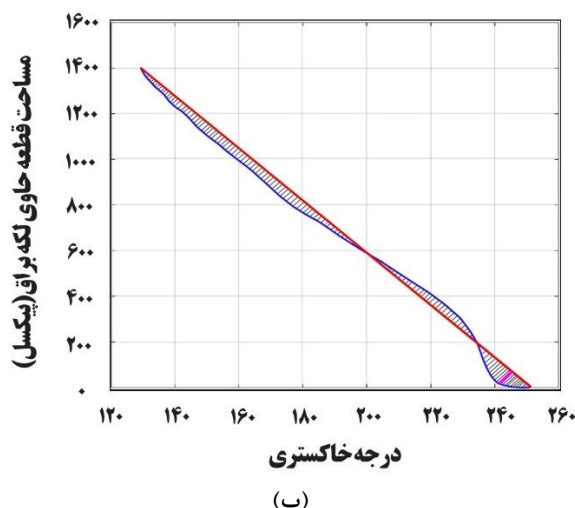
$I(x,y)$: تصویر اخذ شده از سطح محدب در زمان وجود خورشید

خروجی

$H(x,y)$: ماسک حاوی لکه برآق

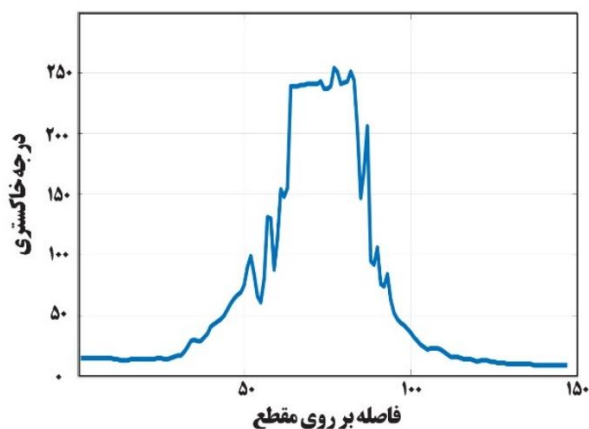
- ۱ شناسایی کمینه (I_{Min}) و بیشینه (I_{Max}) درجات روشنی $I(x,y)$ واقع در $M(x,y)$
- ۲ اگر " I_{Max} " در محدوده ۱۰ درصد بالای درجات روشنی تصویر قرار داشت "آنگاه:
- ۳ به ازای i از I_{Max} تا $(I_{Max}-I_{Min})/2$ با گام‌های ۱- واحدی
- ۴ | شناسایی قطعات تصویری واقع در ماسک دودویی $I(x,y) > i \cap M(x,y)$
- ۵ | انتخاب قطعه تصویری دارای بزرگترین میانگین روشنی بعنوان قطعه کاندید
- ۶ | ثبت مساحت قطعه کاندید (A_i) و حدآستانه i بصورت زوج مرتب (i, A_i)
- ۷ | پایان
- ۸ | تعیین معادله خط گذرنده از اولین ($i = I_{Max}$) و آخرین ($i = (I_{Max}-I_{Min})/2$) زوج مرتب (i, A_i) (رابطه (۲))
- ۹ | محاسبه تمامی زوج مرتب‌های (i, A_i) از معادله خط برآورد شده در ۸ (رابطه (۳))
- ۱۰ | مقدار i مربوط به دورترین زوج مرتب (i, A_i) از معادله خط برآورد شده در ۸
- ۱۱ | تولید ماسک دودویی $H(x,y) = I(x,y) > i_{opt} \cap M(x,y)$
- ۱۲ | اگر "در $H(x,y)$ بیش از یک قطعه تصویری وجود داشت "آنگاه:
- ۱۳ | حفظ قطعه تصویری دارای بزرگترین میانگین روشنی و حذف سایر قطعات
- ۱۴ | پایان
- ۱۵ | اعمال عملگر ریخت‌شناسی بستن با هدف حذف زوائد احتمالی به $H(x,y)$
- ۱۶ | پایان

واصل بین نقطه ابتدا و انتها این نقاط صورت می‌پذیرد. شکل (۷-الف) مقطعی از درجات روشنی واقع بر لکه برآق و نواحی هم‌جوار آنرا نشان می‌دهد. موقعیت مقطع انتخاب شده در شکل (۶) نمایش یافته است.



(ب)

مطابق با شبه‌کد ارائه شده در الگوریتم (۱)، معیار انتخاب حد آستانه مناسب جهت جداسازی پهنه مربوط به لکه برآق بر اساس تعیین فاصله عمودی نقاط مربوط به نمودار حاوی زوج مرتب‌های (i, A_i) نسبت به خط



(الف)

شکل ۷: نمایش یک مقطع از درجات روشنی تصویر در محدوده لکه برآق و نمودار زوج مرتب‌های (i, A_i) ، (الف): مقطعی از درجات روشنی لکه برآق و نواحی مجاور، (ب): نمودار زوج مرتب‌های (i, A_i) در برآورد آستانه مناسب

واصل بین نقطه ابتدا و انتهای زوج مرتب‌های (i, A_i) خواهد داشت. معادله خط گذرنده بین دو نقطه ابتدا و انتهای این نقاط از طریق رابطه (۳) محاسبه شده و فاصله هر نقطه از خط مذکور نیز از رابطه (۴) قابل محاسبه خواهد بود. در رابطه (۳)، $||$ نماد قدرمطلق بوده و سایر پارامترهای موجود در روابط (۲) و (۳) قبل‌تر در الگوریتم (۱) معرفی شده‌اند.

در شکل (۷-ب) نمودار زوج مرتب‌های (i, A_i) ترسیم شده است. مطابق با این نمودار، انتخاب آستانه در بازه ۲۴۰ تا ۲۵۵ منجر به تغییرات محسوس در ابعاد قطعه تصویری نشده اما پس از آستانه ۲۴۰، ابعاد قطعه تصویری با شیب بیشتری افزایش خواهد یافت. در این شکل، آستانه ۲۴۱ بعنوان آستانه مربوط به خاتمه پایداری قطعه حاوی لکه برآق شناسایی شده است. از این رو این نقطه بیشترین فاصله قائم را نسبت به خط

$$L_i = 2A_{(I_{Max}-I_{Min})/2} \times \frac{I_{Max}-i}{I_{Max}+I_{Min}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$d(i, A_i) = \frac{|(I_{Max}+I_{Min}) \times A_i + 2A_{(I_{Max}-I_{Min})/2} \times (i-I_{Max})|}{\sqrt{4A_{(I_{Max}-I_{Min})/2}^2 + (I_{Max}+I_{Min})^2}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

سطح محدب است. این اقدام به سادگی با نگاشت ابرنقاط سه‌بعدی به فضای تصویر از طریق معادله شرط هم‌خطی صورت می‌پذیرد. در این روند از پارامترهای

گام بعدی پس از شناسایی ماسک مربوط به لکه برآق، جداسازی نقاط سه‌بعدی و بردارهای نرمال سطح مربوط به لکه برآق از ابرنقاط سه‌بعدی تولید شده برای

درجات روشنی واقع در لکه برآق در بازه $[0 \sim 1]$ از این مقادیر بعنوان وزن در روند میانگین گیری وزندار استفاده می شود. انتخاب نرمال سازی غیرخطی (درجه دو) با هدف تشدید اثرگذاری بردارهای راستای خورشید متناظر با درجات روشنی بزرگ در روند شناسایی نماینده بردار راستای خورشید بوده است. در رابطه (۶) نحوه نرمال سازی درجات روشنی و در رابطه (۷) روند محاسبه بردار نماینده راستای خورشید از طریق میانگین گیری وزندار ارائه شده است.

رابطه (۶)

$$w_i = \left(\frac{GV_i - \min(GV)}{\max(GV) - \min(GV)} \right)^2, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

رابطه (۷)

$$\vec{S} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m w_i} \sum_{i=1}^m w_i \times \vec{S}_i$$

۲-۶- تبدیل بردار راستای خورشید به مرجع یک

سیستم مختصات توپوسنتریک

راستای خورشید محاسبه شده در بخش (۵-۲) در سیستم مختصات تبیین شده برای ابرنقاط سه بعدی تعیین می گردد. بنا بر سازوکار بکارگرفته شده در مدل سازی سه بعدی سطح محدب، سیستم مختصات تبیین کننده ابرنقاط سه بعدی یک سیستم مختصات دلخواه بوده که صرفاً مقیاس آن از طریق فواصل معلوم در واحد SI تعیین شده است. هر بار نصب و راه اندازی سامانه پیشنهادی رصد خورشید با بروز دوران های ناشناخته بین سیستم مختصات ابرنقاط سه بعدی نسبت به یک سیستم مختصات توپوسنتریک روبرو خواهد بود. از آنجاکه زاویه ارتفاعی و آزیموت خورشید در یک سیستم مختصات توپوسنتریک تعیین می گردند؛ تعیین ارتباط بین سیستم مختصات ابرنقاط سه بعدی و سیستم مختصات توپوسنتریک به منظور تبدیل بردارهای بردار راستای خورشید به مرجع یک سیستم مختصات توپوسنتریک ضروری خواهد بود.

توجیه خارجی و کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی (بدست آمده در روند تشریح شده در بخش های ۲-۳ و ۲-۴) استفاده می شود. لازم به ذکر است که برای اینکار، یکبار محاسبه موقعیت تصویری متناظر با هر نقطه سه بعدی از ابرنقاط مربوط به سطح محدب کافی است. با این اقدام هر بار نقاط سه بعدی و بردارهای نرمال واقع در موقعیت لکه برآق صرفاً از طریق یک تحلیل مکانی ساده مبنی بر قرارگیری نقاط تصویری متناظر با ابرنقاط سه بعدی در ماسک دودویی لکه برآق به اجرا می رسد.

با فرض رخداد m نقطه سه بعدی $[X_i, Y_i, Z_i], i = 1, 2, \dots, m$ بردارهای نرمال سطح محدب $(\vec{n}_i, i = 1, 2, \dots, m)$ و درجه روشنی $(GV_i, i = 1, 2, \dots, m)$ در محدوده لکه برآق، به ازای هر نقطه سه بعدی یک بردار بین نقطه سه بعدی و موقعیت مرکز تصویر در فضای شیء $([X_o, Y_o, Z_o]^T)$ بعنوان بردار راستای بازتاب $(\vec{r}_i, i = 1, 2, \dots, m)$ محاسبه می گردد (رابطه (۵)).

رابطه (۵)

$$\vec{r}_i = [X_i - X_o, Y_i - Y_o, Z_i - Z_o]^T, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

با معلوم بودن بردار نرمال سطح مربوط به هر نقطه سه بعدی $(\vec{n}_i)$ ، بردار راستای خورشید به ازای هر بردار راستای بازتاب $(\vec{r}_i)$ از طریق رابطه (۱) قابل محاسبه خواهد بود.

مطابق با توضیحات ذکر شده، در هر بار شناسایی لکه برآق از سطح محدب دسته ای از بردارهای راستای خورشید (به ازای تمامی نقاط سه بعدی واقع در لکه) محاسبه می شود. آخرین گام از روند بازیابی راستای خورشید به یافتن یک نماینده مناسب از میان بردارهای برآورد شده برای راستای خورشید اختصاص دارد. در این مرحله از طریق یک میانگین گیری وزندار، نماینده ای برای بردار راستای خورشید محاسبه می شود. وزن تخصیص یافته به هر بردار از راستای خورشید از طریق درجه روشنی مربوط به هر بردار از راستای بازتاب (GV_i) تعیین می شود. با نرمال سازی غیرخطی

می‌دهد. بردار مذکور متناسب با جهت‌گیری دوربین در لحظه ثبت تصویر از خطوط شاقولی، راستای نادیر (همانند شکل ۸) و یا زنیط (راستای مثبت محور Z از سیستم مختصات توپوسنتریک) را نشان خواهد داد. بدیهی است که دو راستای مذکور به سادگی از طریق معکوس‌سازی جهت بردارها به یکدیگر قابل تبدیل خواهند بود. با در نظر گرفتن بردار $[[x_p, y_p, -f]^T]$ بعنوان بردار سه‌بعدی موقعیت نقطه پنهان شاقولی در سیستم مختصات تصویر، راستای تبدیل یافته آن در فضای شی (سیستم مختصات ابرنقاط سه‌بعدی) از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌شود. این بردار هم‌جهت با راستای مثبت و یا منفی از محور Z در سیستم مختصات توپوسنتریک در سیستم مختصات ابرنقاط سه‌بعدی خواهد بود.

رابطه (۸)

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = R_Z(-\kappa) R_Y(-\varphi) R_X(-\omega) \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix}$$

در رابطه (۸)، ω ، φ و κ زوایای چرخش محاسبه شده برای پارامترهای خارجی دوربین (رابطه ۲) و R_X ، R_Y و R_Z نیز به ترتیب ماتریس‌های دوران سه‌بعدی حول محورهای اول، دوم و سوم سیستم مختصات سه‌بعدی هستند.

با معلوم شدن بردار یکه در امتداد مثبت محور Z از سیستم مختصات توپوسنتریک در سیستم مختصات ابرنقاط سه‌بعدی ($\vec{Z}_t$)، وضعیت نسبی $\vec{Z}_t$ ، بردار برآورد شده برای راستای خورشید ($\vec{S}$) و بردار یکه در راستای محور Z در سیستم مختصات ابرنقاط سه‌بعدی ($\vec{k}$) در $[0.0.1]^T$ در شکل (۹) نمایش یافته است. در این شکل $\vec{a}$ بردار یکه عمود بر دو بردار $\vec{Z}_t$ و $\vec{k}$ است.

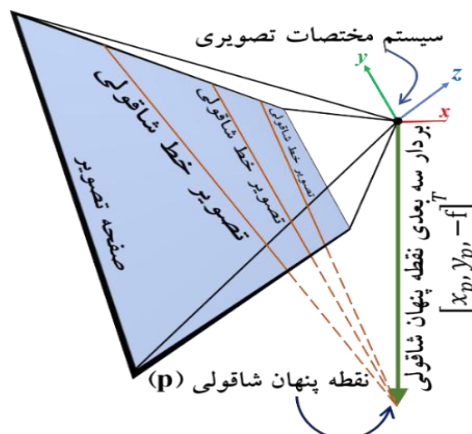
ارتباط بین سیستم مختصات مربوط به ابرنقاط سه‌بعدی با یک سیستم مختصات توپوسنتریک در قالب یک ماتریس دوران سه‌بعدی با حداکثر سه زاویه چرخش برقرار می‌گردد. در این مقاله از یک راهکار میدانی ساده جهت تعیین ارتباط بین این دو سیستم مختصات استفاده شده است. نتایج این اقدام مستقیماً به بردارهای راستای خورشید اعمال می‌گردند. راهکار پیشنهادی از دو مرحله مجزا تشکیل شده است. در مرحله نخست، زاویه چرخش لازم بمنظور موازی‌سازی راستای محور Z از سیستم مختصات ابرنقاط سه‌بعدی با راستای محور Z در یک سیستم مختصات توپوسنتریک (راستای زنیط) برآورد و اثر آن به راستاهای خورشید ($\vec{S}$) اعمال می‌گردد. این مرحله، ترازگذاری بردارهای راستای خورشید نامگذاری شده و اعمال آن منجر به اصلاح زاویه ارتفاعی خورشید به مرجع صفحه افق می‌گردد. در مرحله دوم نیز زاویه چرخش لازم حول محور Z به‌منظور تنظیم آزمون خورشید تعیین شده که در ادامه هر مرحله بصورت مجزا تشریح شده است.

۲-۶-۱- ترازگذاری بردارهای راستای خورشید

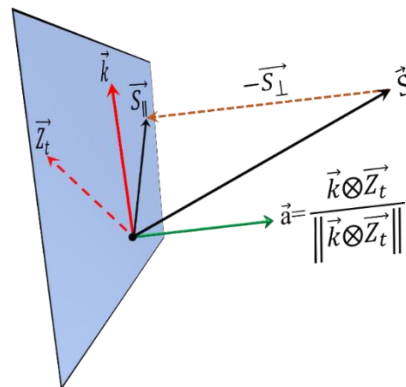
در صورتیکه محور اصلی دوربین کاملاً افقی نباشد؛ تصویر خطوط شاقولی بصورت خطوط متقاطع در فضای تصویر ظاهر می‌شوند. محل تقاطع این خطوط در فضای تصویر یکی از نقاط پنهان تصویر را بازسازی می‌کند [۳۷]. بردار سه‌بعدی موقعیت این نقطه پنهان در فضای تصویر راستای شاقولی را در سیستم مختصات دوربین نشان می‌دهد. شکل (۸) خطوط شاقولی، نقطه پنهان شاقولی و بردار سه‌بعدی این نقطه را در سیستم مختصات تصویر نشان می‌دهد.

تبدیل بردار سه‌بعدی نقطه پنهان شاقولی به مرجع سیستم مختصات شی (ابرنقاط سه‌بعدی)، امتداد شاقولی را در سیستم مختصات ابرنقاط سه‌بعدی نشان

¹ Vanishing Points



شکل ۸: نمایی شماتیک از خطوط شاقولی، نقطه پنهان شاقولی و بردار سه بعدی آن



شکل ۹: ارتباط هندسی میان بردارهای $\vec{S}$ ، $\vec{Z}_t$ و $\vec{k}$

در ادامه، تصویر بردار $\vec{S}_{||}$ بر دو بردار $\vec{Z}_t$ و $\vec{Z}_t \otimes \vec{a}$ به ترتیب بعنوان مولفه‌های مختصاتی بردارهای پایه $\vec{k}$ و $\vec{a} \otimes \vec{k}$ تعیین شده و نسخه تبدیل یافته از $\vec{S}_{||}$ تولید می‌گردد ($\vec{S}_{||}$). مطابق با شکل (۹)، برای توصیف بردار $\vec{S}_{||}$ در سیستم مختصاتی که $\vec{Z}_t$ در آن بعنوان بردار پایه محور سوم ($\vec{k}$) است؛ دو بردار پایه یگه و متعامد در صفحه آبی رنگ نیاز است. اولین بردار یگه $\vec{Z}_t$ و دومین بردار یگه و متعامد $\vec{Z}_t \otimes \vec{a}$ خواهد بود. طول تصویر $\vec{S}_{||}$ بر دو بردار مذکور به ترتیب مولفه‌های مختصاتی برای بردارهای پایه $\vec{k}$ و $\vec{a} \otimes \vec{k}$ خواهند بود. با جایگذاری $\vec{S}_{||}$ در رابطه (۹) نسخه تراز گذاری شده از بردار $\vec{k}$ با نماد $\vec{S}$ مطابق با رابطه (۱۱) تولید می‌گردد. محاسبه زاویه ارتفاعی خورشید از طریق بردار $\vec{S}$ به مرجع صفحه افق

مطابق با شکل (۹)، هدف از تراز گذاری، تعیین مولفه‌های بردار $\vec{S}$ به مرجع سیستم مختصاتی بوده که در آن راستای $\vec{Z}_t$ بردار یگه در راستای محور سوم است. برای اینکار مطابق با رابطه (۹) مولفه‌های بردار $\vec{S}$ به دو جز اثرپذیر $\vec{S}_{||}$ و بی تاثیر $\vec{S}_{\perp}$ از این تبدیل تفکیک می‌گردد.

$$\vec{S} = \vec{S}_{||} + \vec{S}_{\perp} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$\vec{S}_{\perp}$ در رابطه (۹)، از طریق رابطه (۱۰) قابل محاسبه بوده که $\vec{a}$ در آن برداری یگه در راستای عمود بر بردارهای $\vec{Z}_t$ و $\vec{k}$ است (شکل (۹)).

$$\vec{S}_{\perp} = (\vec{S} \otimes \vec{a}) \times \vec{a} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

شاقولی پس از استقرار نسبی دوربین و سطح محدب انجام می‌شود. بدیهی است که تعیین بردار $\vec{Z}_t$ یکبار پس از هر با نصب سامانه به اجرا رسیده و تا زمان عدم تغییر در موقعیت دوربین یا سطح محدب بدون تغییر خواهد بود. شکل (۱۰) تصویر اخذ شده از خطوط شاقولی را پس از استقرار دوربین ویدئویی و سطح محدب نشان می‌دهد. خطوط شاقولی در این تصویر از طریق شاقول‌های بنایی ایجاد شده است.

خواهد بود. در روابط (۱۰) و (۱۱)، $\odot$ و $\otimes$ به ترتیب نمادهای ضرب داخلی، ضرب خارجی و ضرب ساده اسکالر و بردار هستند. در رابطه (۱۱) $\langle \vec{S}_{\parallel} \odot \vec{Z}_t \rangle \times \vec{k}$ و $\langle \vec{k} \otimes \vec{a} \rangle \times \langle \vec{S}_{\parallel} \odot (\vec{Z}_t \otimes \vec{a}) \rangle$ به ترتیب تصویر بردار $\vec{S}_{\parallel}$ بر بردارهای یکه $\vec{k}$ و $\vec{k} \otimes \vec{a}$ در سیستم مختصاتی بوده که $\vec{Z}_t$ در آن معادل با $\vec{k}$ است. به‌منظور دستیابی به بردارهای $\vec{g}$ نیاز به بردار $\vec{Z}_t$ است. تعیین این بردار از طریق اخذ تصویر از چند امتداد

$$\vec{S} = \vec{S}_{\parallel} + \vec{S}_{\perp} = \langle \vec{S}_{\parallel} \odot \vec{Z}_t \rangle \times \vec{k} + \langle \vec{S}_{\parallel} \odot (\vec{Z}_t \otimes \vec{a}) \rangle \times \langle \vec{k} \otimes \vec{a} \rangle + \vec{S}_{\perp} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$



شکل ۱۰: نمونه تصویر اخذ شده از خطوط شاقولی به‌منظور تعیین راستای بردار $\vec{Z}_t$

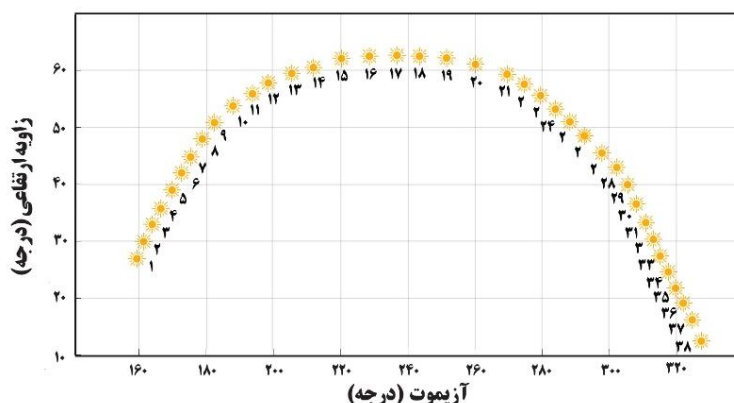
تعیین نشده‌اند. از آنجا که خورشید در لحظه عبور از نصف‌النهار گذرنده از نقطه استقرار دستگاه در بالاترین زاویه ارتفاعی قرار دارد [۳۸]؛ در روند تنظیم آزمون خورشید، اختلاف زاویه آزمون محاسبه شده از طریق بردار $\vec{g}$ نسبت به آزمون صفر یا ۱۸۰ درجه (متناسب با فصل و عرض جغرافیایی) برای لحظه عبور خورشید از نصف‌النهار گذرنده از نقطه استقرار مبنای تنظیم آزمون خورشید قرار خواهد داشت. برای این اقدام، رصد زاویه ارتفاعی خورشید برای حداقل یک روز لازم است. شکل (۱۱) نمودار زاویه ارتفاعی خورشید را نسبت به آزمون محاسباتی (از طریق بردار $\vec{g}$) به ازای ۳۸ مقطع در بازه زمانی ۸:۱۵ صبح تا ۱۷:۳۰ عصر قبل

در این تحقیق، برآورد معادله خطوط شاقولی در فضای تصویر از طریق اندازه‌گیری دستی حداقل دو نقطه از هر خط در فضای تصویر و اعمال پارامترهای مرتبط با کالیبراسیون داخلی دوربین به‌منظور حذف اعوجاجات تصویری به اجرا رسیده است. بدیهی است که امکان توسعه راهکار خودکار در بازیابی خطوط شاقولی از طریق تبدیل هاف نیز وجود خواهد داشت.

۲-۶-۲- تنظیم آزمون خورشید

پس از ترازگذاری بردارهای راستای خورشید، زاویه ارتفاعی محاسبه شده به مرجع صفحه افق خواهد بود. اما جهت‌گیری افقی بردارهای اصلاح شده خورشید کماکان نسبت به یک سیستم مختصات توپوسنتریک

از تنظیم آزمون نشان می‌دهد. موقعیت استقرار اندازه‌گیری‌ها در فصل بهار انجام شده است. دستگاه در عرض جغرافیای ۳۲/۴۸ درجه و



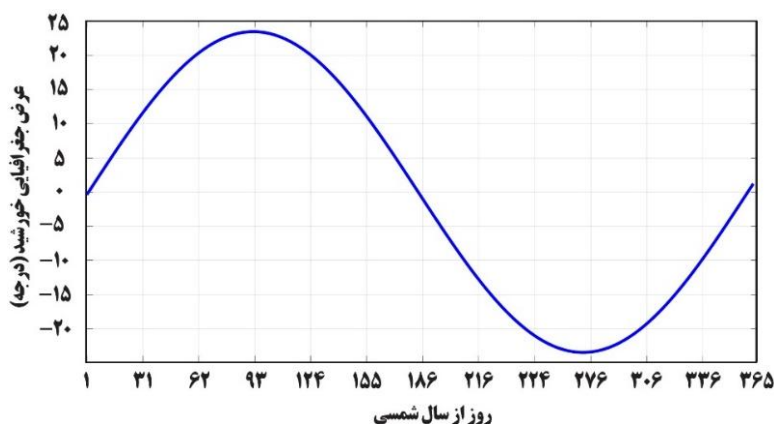
شکل ۱۱: نمودار آزمون و زاویه ارتفاعی خورشید قبل از تنظیم جهت خورشید

عدم تغییر در موقعیت دوربین و سطح محدب بصورت یک پارامتر ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۷- سازوکار پیش‌بینی موقعیت خورشید

خورشید در طول روز هنگام ظهر شرعی در بالاترین زاویه ارتفاعی قرار دارد. نمودار شکل (۱۲) روند تغییرات عرض جغرافیای خورشید (زاویه امتداد خورشید نسبت به صفحه استوا در یک سیستم مختصات زمین مرکز) را در طول یکسال نشان می‌دهد [۱۱].

به نقاط دویعدی این نمودار یک سهمی برازش یافته و آزمون محاسباتی در نقطه اکسترمم سهمی نمایش یافته است. آزمون حقیقی خورشید در نقطه اکسترمم متناسب با عرض جغرافیای و فصل معادل با ۱۸۰ درجه است (متناسب با بازه تغییرات عرض جغرافیای در ایران، آزمون خورشید در هیچ موقعیتی در زمان اکسترمم معادل با صفر درجه نخواهد بود). از این رو اختلاف آزمون محاسباتی و آزمون حقیقی (۲۴۳/۹۲۶ درجه در مثال شکل (۱۱)) بصورت یک مقدار زاویه‌ای ثابت همواره از زوایای آزمون محاسباتی خورشید کسر خواهد شد. این مقدار ثابت نیز تا زمان



شکل ۱۲: تغییرات عرض جغرافیای خورشید در طول سال [۱۱]

قبل تعیین می‌گردد. بکارگیری ضرایب رابطه (۱۲) بصورت وزندار در تعیین ضرایب سهمی روز بعد از انحراف سهمی آن روز ناشی از توزیع نامناسب مشاهدات و خطاهای اندازه‌گیری جلوگیری می‌کند. بدیهی است که این پیش‌بینی با افزایش مشاهدات روزانه دقیق‌تر خواهد شد. عدم بکارگیری این رویکرد احتمال انحراف جدی سهمی برازش‌یافته را به مشاهدات اندک صبحگاهی بدنبال خواهد داشت.

۳- نتایج تحقیق

در این بخش نتایج کسب شده از سامانه رصد خورشید گزارش شده و عملکرد آن از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. این سامانه به مدت ۳۶ روز در بازه پنج ماه (بهمن ۱۴۰۲ تا تیر ۱۴۰۳) جهت جمع‌آوری مورد بهره‌برداری قرار گرفته که داده‌های جمع‌آوری شده از آن در روند ارزیابی نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه در طول و عرض جغرافیایی $\lambda = 48/3364^\circ$ و $\varphi = 32/4835^\circ$ درجه واقع در شهرستان اندیمشک در استان خوزستان مستقر بوده و نرخ زمانی اخذ تصاویر از سطح محدب در آن معادل ۱۵ دقیقه تنظیم شده است. با این نرخ نمونه‌برداری بطور متوسط ۳۵ تصویر در طول روز اخذ شده است. چهار سناریوی ۱- تعیین و پیش‌بینی زمان ظهر شرعی، ۲- مقایسه نتایج محاسباتی و مشاهداتی روند تغییرات عرض جغرافیایی خورشید، ۳- تعیین موقعیت جغرافیایی محل استقرار دستگاه و ۴- مقایسه روند مشاهداتی تغییرات روزانه موقعیت خورشید (زاویه ارتفاعی و آزیموت) نسبت به روش محاسباتی، به‌منظور ارزیابی عملکرد این سامانه طراحی شده که در ادامه هر سناریو در بخشی مجزا تشریح و نتایج آن گزارش شده است. در انتهای این بخش نیز محدودیت‌های روش پیشنهادی و منابع عدم قطعیت در نتایج کسب شده مورد بحث قرار گرفته است.

مطابق با شکل (۱۲)، اکسترمم زاویه ارتفاعی خورشید در طول سال دامنه تغییراتی معادل با ۴۷ درجه (بطور متوسط ۰/۱۳ درجه در روز) را خواهد داشت. از این رو، در دو روز متوالی تغییرات جزئی در مسیر خورشید اتفاق می‌افتد [۱۱]. از این رو، به نظر می‌رسد در صورت ثبت نتایج رصد خورشید در روز قبل، امکان استفاده از آن در پیش‌بینی مسیر حرکت خورشید در روز بعد وجود خواهد داشت. اندازه‌گیری زاویه ارتفاعی خورشید در چند مقطع زمانی امکان برازش یک تابع پیوسته به‌منظور توصیف مسیر خورشید را فراهم می‌آورد. سهمی ارائه شده در رابطه (۱۲) بعنوان تابعی با تغییرات شیب ثابت یکی از گزینه‌های مناسب برای توصیف زاویه ارتفاعی لحظه‌ای خورشید در طول روز است [۳۹].

$$Elv = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

حداقل سه اندازه‌گیری زاویه ارتفاعی و زمان معادل آنها جهت برآورد ضرایب c_0 ، c_1 و c_2 در رابطه (۱۲) لازم است. افزایش تعداد اندازه‌گیری‌ها و همچنین توزیع مناسب آنها در صبح و عصر در کاهش اثر خطاهای اندازه‌گیری هنگام برآورد ضرایب سهمی موثر خواهد بود.

در سازوکار پیش‌بینی مسیر خورشید، ثبت اندازه‌گیری‌های روز قبل از پیش‌بینی لازم است. با تعیین ضرایب رابطه (۱۲) در روز قبل، از آن بعنوان مشاهدات وزن‌دار جهت پیش‌بینی مسیر خورشید در روز بعد استفاده می‌شود. در این روند، از معکوس ماتریس کواریانس برآورد شده برای ضرایب c_0 ، c_1 و c_2 در روز قبل بعنوان ماتریس وزن آنها هنگام بکارگیری بعنوان مشاهدات وزن‌دار در تخمین ضرایب روز بعد استفاده می‌شود. در این شرایط حتی با یک اندازه‌گیری زاویه ارتفاعی و زمان متناظر در صبح روز بعد، امکان بازیابی معادله سهمی آن روز بوجود می‌آید. وزن مشاهدات زاویه ارتفاعی روز بعد نیز از طریق معکوس فاکتور واریانس ثانویه بدست آمده برای مشاهدات روز

۳-۱- تعیین و پیش‌بینی ظهر شرعی

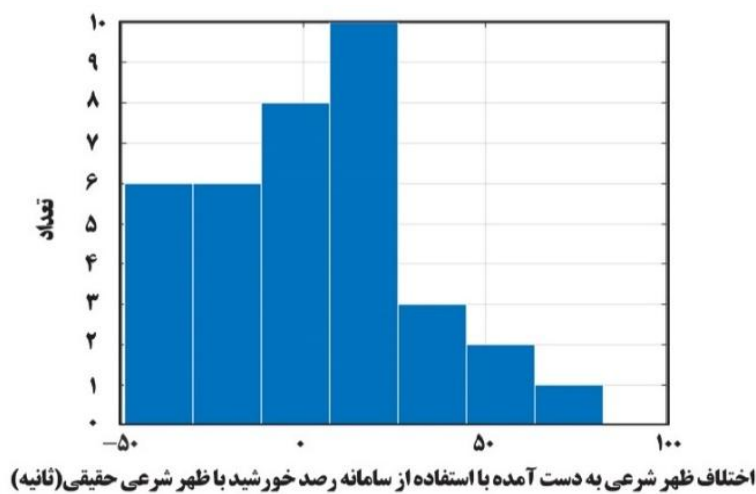
لحظه عبور خورشید از نصف‌النهار هر نقطه از زمین، ظهر شرعی برای آن نقطه تلقی شده که خورشید در آن لحظه بالاترین زاویه ارتفاعی روز را برخوردار است [۱۱]. در صورت اندازه‌گیری و برازش یک سهمی به زاویه ارتفاعی خورشید بصورت تابعی از زمان در بازه قبل تا بعد از ظهر شرعی، زمان معادل با رخداد اکسترمم، لحظه ظهر شرعی مشاهداتی (T_n^{Obs}) را نشان خواهد داد. جدول (۳) جزئیات مربوط به زمان ظهر شده‌اند.

شرعی مطابق با تقویم و همچنین زمان محاسبه شده توسط سامانه را برای تمامی ۳۵ روز اندازه‌گیری نشان می‌دهد.

مطابق با نتایج مندرج در جدول (۳) اختلاف زمانی بین ظهر شرعی تعیین شده توسط سامانه و ظهر شرعی بطور متوسط ۰/۴۳۹۸ ثانیه با انحراف معیار ۲۹/۷۲۲۹ ثانیه بوده که این اختلافات در قالب هیستوگرام شکل (۱۳) ارائه شده‌اند.

جدول ۳: مقایسه زمان ظهر شرعی محاسبه شده توسط سامانه رصد خورشید و تقویم شرعی محلی شهر اندیشک

تاریخ	ظهر شرعی تقویم	ظهر شرعی سامانه	تاریخ	ظهر شرعی تقویم	ظهر شرعی سامانه
۲۱ بهمن ۱۴۰۲	۱۲:۳۰:۵۲	۱۲:۲۹:۳۰	۱۴ خرداد ۱۴۰۳	۱۲:۱۴:۵۶	۱۲:۱۵:۱۹
۲۳ بهمن ۱۴۰۲	۱۲:۳۰:۵۰	۱۲:۳۱:۲۰	۱۵ خرداد ۱۴۰۳	۱۲:۱۵:۰۷	۱۲:۱۵:۲۸
۲۴ بهمن ۱۴۰۲	۱۲:۳۰:۵۲	۱۲:۲۹:۴۸	۳۰ خرداد ۱۴۰۳	۱۲:۱۸:۰۷	۱۲:۱۷:۲۹
۲ اسفند ۱۴۰۲	۱۲:۳۰:۱۹	۱۲:۳۱:۰۸	۳۱ خرداد ۱۴۰۳	۱۲:۱۸:۲۰	۱۲:۱۷:۵۱
۳ اسفند ۱۴۰۲	۱۲:۳۰:۱۲	۱۲:۳۰:۱۶	۱ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۱۸:۳۳	۱۲:۱۸:۰۸
۸ فروردین ۱۴۰۳	۱۲:۲۱:۵۳	۱۲:۲۱:۴۰	۵ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۱۹:۲۵	۱۲:۱۹:۰۴
۹ فروردین ۱۴۰۳	۱۲:۲۱:۳۵	۱۲:۲۱:۴۱	۶ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۱۹:۳۷	۱۲:۱۹:۲۹
۱۰ فروردین ۱۴۰۳	۱۲:۲۱:۱۷	۱۲:۲۰:۵۷	۷ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۱۹:۴۹	۱۲:۱۹:۵۰
۱۱ فروردین ۱۴۰۳	۱۲:۲۰:۵۹	۱۲:۲۰:۵۷	۹ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۰:۱۶	۱۲:۱۹:۴۹
۱۲ فروردین ۱۴۰۳	۱۲:۲۰:۴۱	۱۲:۲۰:۳۱	۱۰ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۰:۲۸	۱۲:۲۰:۱۵
۱۶ فروردین ۱۴۰۳	۱۲:۱۹:۳۱	۱۲:۱۹:۲۶	۱۱ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۰:۴۰	۱۲:۲۰:۲۷
۲۵ فروردین ۱۴۰۳	۱۲:۱۷:۰۵	۱۲:۱۷:۴۹	۱۳ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۱:۰۲	۱۲:۲۰:۳۹
۲۶ فروردین ۱۴۰۳	۱۲:۱۶:۵۰	۱۲:۱۶:۵۲	۱۴ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۱:۱۲	۱۲:۲۱:۲۶
۲ اردیبهشت ۱۴۰۳	۱۲:۱۵:۱۷	۱۲:۱۵:۵۹	۱۵ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۱:۲۳	۱۲:۲۲:۰۱
۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۳	۱۲:۱۳:۰۱	۱۲:۱۳:۲۰	۱۹ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۲:۰۰	۱۲:۲۱:۵۱
۹ خرداد ۱۴۰۳	۱۲:۱۴:۱۰	۱۲:۱۴:۱۱	۲۰ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۲:۰۹	۱۲:۲۲:۲۲
۱۰ خرداد ۱۴۰۳	۱۲:۱۴:۱۸	۱۲:۱۴:۵۲	۲۱ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۲:۱۷	۱۲:۲۲:۱۲
۱۱ خرداد ۱۴۰۳	۱۲:۱۴:۲۷	۱۲:۱۵:۱۳	۵ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۳:۱۴	۱۲:۲۲:۲۷



شکل ۱۳: هیستوگرام توزیع خطای تعیین ظهر شرعی

روش تشریح شده در بخش (۷-۲) ضرایب سهمی و ماتریس کواریانس محاسبه شده آنها در روز قبل مورد استفاده خواهد بود. جدول (۴) نتایج پیش‌بینی زمان رخداد اکسترمم زاویه ارتفاعی خورشید بر اساس مشاهدات روز قبل را نشان می‌دهد. در این ارزیابی صرفاً از اندازه‌گیری‌های انجام شده در روزهای متوالی (روز مبنا و روز پیش‌بینی) استفاده شده است. برای هر روز پیش‌بینی از تعداد متفاوتی مشاهدات صبحگاهی برای تخمین زمان رخداد اکسترمم خورشید استفاده شده تا اثر تطویل مشاهدات صبحگاهی در پیش‌بینی زمان اکسترمم خورشید مشخص گردد. در این جدول نمادهای At ، n_0 و Er به ترتیب تعداد مشاهدات بکارگرفته شده در برآورد ضرایب سهمی، اختلاف زمانی آخرین مشاهده تا زمان وقوع اکسترمم (ظهر شرعی) و خطای تعیین زمان اکسترمم زاویه ارتفاعی خورشید بر حسب ثانیه هستند. مطابق با مندرجات جدول (۴)، دقت پیش‌بینی زمان رخداد اکسترمم در زاویه ارتفاعی خورشید با کاهش اختلاف زمانی مشاهدات صبحگاهی نسبت به لحظه ظهر شرعی بهبود پیدا می‌کند. نمودار شکل (۱۴) نیز روند خطای تخمین زمان اکسترمم زاویه ارتفاعی خورشید را نسبت به فاصله زمانی آخرین مشاهده از ظهر شرعی برای نتایج گزارش شده در جدول (۴) نشان می‌دهد.

بررسی روزهای توأم با خطای زیاد حاکی از ابرناک بودن آسمان در یک بازه زمانی گسترده بوده است. لازم به ذکر است که زمان ظهر شرعی متناسب با طول جغرافیایی (λ) محل استقرار سامانه و معادله زمان (eT) گزارش شده در تارنمای www.intmath.com از طریق رابطه (۱۳) بر حسب ساعت و بصورت اعشاری محاسبه شده است [۴۰].

$$T_n^{Cpt} = 12 - eT - \frac{\lambda^0 - 52.5}{15} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

به دلیل حرکت انتقالی زمین در یک مدار غیردایره‌ای و همچنین میل صفحه اکتپتیک نسبت به استوا، اختلاف زمانی بین دو ظهر شرعی ۲۴ ساعت نیست [۴۱]. به عبارت بهتر، فاصله زمانی بین دو ظهر شرعی گاهی بیشتر و گاهی کمتر از ۲۴ ساعت بوده و این اختلاف با دقت در قالب معادله زمان برای هر روز از سال قابل محاسبه است [۴۲].

در گام دوم از این بخش، دقت پیش‌بینی زمان ظهر شرعی بر اساس اندازه‌گیری‌های سامانه در بازه زمانی قبل از ظهر تعیین شده است. در این روند مطابق با

¹ Ecliptic plane

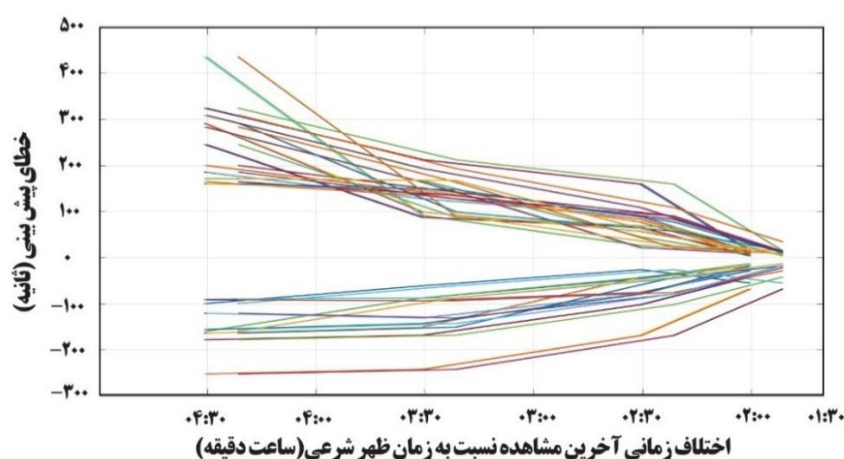
² Equation of Time

جدول ۴: نتایج پیش‌بینی ظهر شرعی بر اساس بکارگیری رفتار زمانی خورشید در روز قبل

ردیف	تاریخ	n_o	Δt	Er	ردیف	تاریخ	n_o	Δt	Er
۱	روز مینا	۳۵	—	۳۷"	۱۱	روز مینا	۳۶	—	۳۷"
	پیش‌بینی	۱	۴:۱۸:۲۰	۲۹۱"		روز	۱	۴:۱۸:۲۰	۲۹۱"
		۵	۳:۱۸:۲۰	۹۹"			۵	۳:۱۸:۲۰	۹۹"
		۷	۲:۱۸:۲۰	۵۷"			۹	۲:۱۸:۲۰	۵۷"
		۱۱	۱:۴۸:۲۰	۱۴"			۱۱	۱:۴۸:۲۰	۱۴"
۲	روز مینا	۳۵	—	۲۸"	۱۲	روز مینا	۳۶	—	۲۸"
	پیش‌بینی	۱	۴:۱۸:۳۳	-۹۱"		روز	۱	۴:۱۸:۳۳	-۹۱"
		۵	۳:۱۸:۳۳	-۹۳"			۵	۳:۱۸:۳۳	-۹۳"
		۹	۲:۱۸:۳۳	-۷۵"			۹	۲:۱۸:۳۳	-۷۵"
		۱۱	۱:۴۸:۳۳	-۲۸"			۱۱	۱:۴۸:۳۳	-۲۸"
۳	روز مینا	۳۶	—	۲۰"	۱۳	روز مینا	۳۶	—	۲۰"
	پیش‌بینی	۱	۴:۱۹:۳۷	-۱۵۹"		روز	۱	۴:۱۹:۳۷	-۱۵۹"
		۵	۳:۱۹:۳۷	-۸۷"			۵	۳:۱۹:۳۷	-۸۷"
		۹	۲:۱۹:۳۷	-۴۳"			۹	۲:۱۹:۳۷	-۴۳"
		۱۱	۱:۴۹:۳۷	-۱۳"			۱۱	۱:۴۹:۳۷	-۱۳"
۴	روز مینا	۳۶	—	۸"	۱۴	روز مینا	۳۶	—	۸"
	پیش‌بینی	۱	۴:۱۹:۴۹	-۱۲۰"		روز	۱	۴:۱۹:۴۹	-۱۲۰"
		۵	۳:۱۹:۴۹	-۱۳۰"			۵	۳:۱۹:۴۹	-۱۳۰"
		۹	۲:۱۹:۴۹	-۷۸"			۹	۲:۱۹:۴۹	-۷۸"
		۱۱	۱:۴۹:۴۹	-۲۱"			۱۱	۱:۴۹:۴۹	-۲۱"
۵	روز مینا	۳۶	—	۲۷"	۱۵	روز مینا	۳۶	—	۲۷"
	پیش‌بینی	۱	۴:۲۰:۲۸	-۱۷۷"		روز	۱	۴:۲۰:۲۸	-۱۷۷"
		۵	۳:۲۰:۲۸	-۱۶۷"			۵	۳:۲۰:۲۸	-۱۶۷"
		۹	۲:۲۰:۲۸	-۱۰۱"			۹	۲:۲۰:۲۸	-۱۰۱"
		۱۱	۱:۵۰:۲۸	-۴۱"			۱۱	۱:۵۰:۲۸	-۴۱"
۶	روز مینا	۳۶	—	۱۳"	۱۶	روز مینا	۳۶	—	۱۳"
	پیش‌بینی	۱	۴:۲۰:۴۰	-۱۵۵"		روز	۱	۴:۲۰:۴۰	-۱۵۵"
		۵	۳:۲۰:۴۰	-۱۴۳"			۵	۳:۲۰:۴۰	-۱۴۳"
		۹	۲:۲۰:۴۰	-۷۸"			۹	۲:۲۰:۴۰	-۷۸"
		۱۱	۱:۵۰:۴۰	-۱۶"			۱۱	۱:۵۰:۴۰	-۱۶"
۷	روز مینا	۳۶	—	۲۳"	۱۷	روز مینا	۳۶	—	۲۳"
	پیش‌بینی	۱	۴:۲۱:۱۲	۱۶۴"		روز	۱	۴:۲۱:۱۲	۱۶۴"
		۵	۳:۲۱:۱۲	۱۳۴"			۵	۳:۲۱:۱۲	۱۳۴"
		۹	۲:۲۱:۱۲	۸۳"			۹	۲:۲۱:۱۲	۸۳"
		۱۱	۱:۵۱:۱۲	۱۲"			۱۱	۱:۵۱:۱۲	۱۲"
۸	روز مینا	۳۶	—	-۱۴"	۱۸	روز مینا	۳۶	—	-۱۴"
	پیش‌بینی	۱	۴:۲۱:۲۳	۱۶۰"		روز	۱	۴:۲۱:۲۳	۱۶۰"
		۵	۳:۲۱:۲۳	۱۴۷"			۵	۳:۲۱:۲۳	۱۴۷"
		۹	۲:۲۱:۲۳	۷۷"			۹	۲:۲۱:۲۳	۷۷"
		۱۱	۱:۲۱:۲۳	۱۰"			۱۱	۱:۲۱:۲۳	۱۰"
۹	روز مینا	۳۶	—	۱۰"	۱۹	روز مینا	۳۶	—	۱۰"
	پیش‌بینی	۱	۴:۲۲:۰۹	۲۸۳"		روز	۱	۴:۲۲:۰۹	۲۸۳"
		۵	۳:۲۲:۰۹	۱۶۳"			۵	۳:۲۲:۰۹	۱۶۳"
		۹	۲:۲۲:۰۹	۲۱"			۹	۲:۲۲:۰۹	۲۱"
		۱۱	۱:۵۲:۰۹	۹"			۱۱	۱:۵۲:۰۹	۹"
۱۰	روز مینا	۳۶	—	-۱۳"	۲۰	روز مینا	۳۶	—	-۱۳"
	پیش‌بینی	۱	۴:۲۲:۱۷	۱۷۱"		روز	۱	۴:۲۲:۱۷	۱۷۱"
		۵	۳:۲۲:۱۷	۱۶۷"			۵	۳:۲۲:۱۷	۱۶۷"
		۹	۲:۲۲:۱۷	۴۴"			۹	۲:۲۲:۱۷	۴۴"
		۱۱	۱:۵۲:۱۷	۷"			۱۱	۱:۵۲:۱۷	۷"

توزیع یکسان خطای پیش‌بینی در علامت‌های مثبت و منفی بوده که نشانه‌ای از ماهیت اتفاقی این فرایند بوده و بروز خطاهای سیستماتیک را در روند پیش‌بینی منتفی می‌سازد.

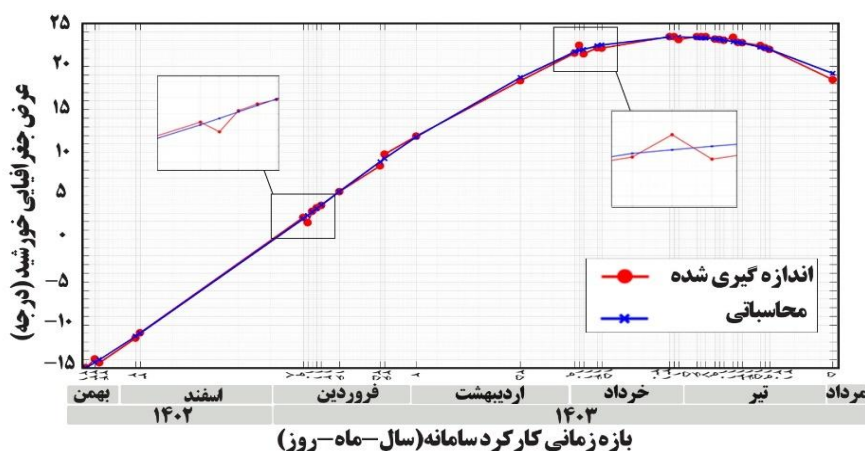
همانطور که در شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود با کاهش اختلاف زمانی آخرین مشاهده صبحگاهی نسبت به لحظه ظهر شرعی خطای پیش‌بینی این لحظه کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج قابل استنباط از این نمودار،



شکل ۱۴: خطای پیش‌بینی زمان رخداد اکسترمم زاویه ارتفاعی خورشید نسبت به فاصله زمانی آخرین مشاهدات صبحگاهی تا ظهر

رابطه (۱۴) $\delta_s^\circ = Elv_n^\circ + \varphi^\circ - 90^\circ$ نمودار شکل (۱۵) روند محاسباتی عرض جغرافیایی خورشید (رنگ آبی) و مقادیر اندازه‌گیری شده آن (رنگ قرمز) را در بازه زمانی کارکرد سامانه رصد خورشید نشان می‌دهد.

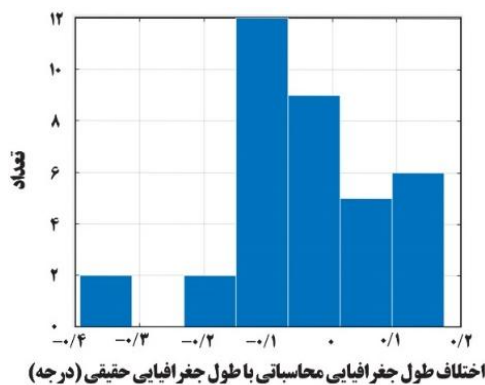
۳-۲- بررسی روند تغییرات عرض جغرافیایی خورشید عرض جغرافیایی خورشید نسبت به استوا (δ_s) در طول سال تا ۴۷ درجه تغییر می‌کند (شکل (۱۲)). با معلوم بودن عرض جغرافیایی (φ) و اندازه‌گیری زاویه ارتفاعی خورشید در لحظه عبور از نصف‌النهار محل استقرار سامانه (Elv_n)، عرض جغرافیای خورشید برحسب درجه از طریق رابطه (۱۴) قابل محاسبه است [۱۱].



شکل ۱۵: مقایسه روند تغییرات عرض جغرافیایی خورشید در دو حالت محاسباتی و مشاهداتی

عرض جغرافیایی دستگاه در هر روز مشاهداتی محاسبه و اختلاف آن نسبت موقعیت اندازه‌گیری شده توسط سامانه تعیین موقعیت جهانی بعنوان بردار خطا محاسبه شده است. لازم به ذکر است که این اقدام برای دو موقعیت جغرافیایی متفاوت انجام شده و هیستوگرام شکل (۱۶) توزیع بردار خطای تعیین موقعیت را بر حسب درجه نشان می‌دهد.

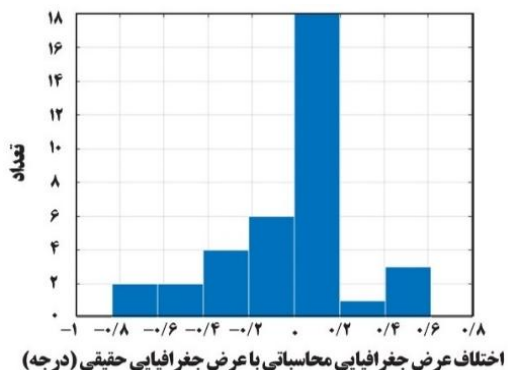
مطابق با شکل (۱۶)، امکان دستیابی به دقت‌های بهتر از نیم درجه در تعیین موقعیت جغرافیای محل استقرار دستگاه وجود دارد. باید توجه داشت که تعیین موقعیت جغرافیایی هدف سامانه رصد خورشید نیست. ارزیابی دقت تعیین موقعیت جغرافیایی به نحوی گویای کفایت اندازه‌گیری‌های سامانه رصد خورشید بوده و از آن بعنوان نشانه‌ای از صحت عملکرد دستگاه استفاده شده است.



مطابق با نمودار شکل (۱۵)، انطباق مطلوبی بین نتایج محاسباتی و مشاهداتی وجود داشته و $RMSE$ (Root Mean Square Error) این مقایسه ۰.۳۱۱۴۵ درجه برآورد شده است.

۳-۳- نتایج تعیین موقعیت جغرافیایی توسط سامانه رصد خورشید

با معلوم بودن تاریخ و زمان رسمی کشور می‌توان موقعیت جغرافیایی محل استقرار سامانه رصد خورشید را محاسبه نمود. مطابق با رابطه (۱۴)، در صورت معلوم بودن عرض جغرافیایی خورشید در تاریخ مشاهده، امکان محاسبه عرض جغرافیایی محل استقرار دستگاه وجود دارد. از سوی دیگر، در رابطه (۱۳) با قرار دادن زمان اندازه‌گیری شده ظهر شرعی T_n^{Obs} بجای T_n^{Cpt} و معلوم بودن eT در زمان مشاهده، امکان محاسبه طول جغرافیایی وجود خواهد داشت. به منظور تعیین دقت تعیین موقعیت جغرافیایی توسط این سامانه، طول و

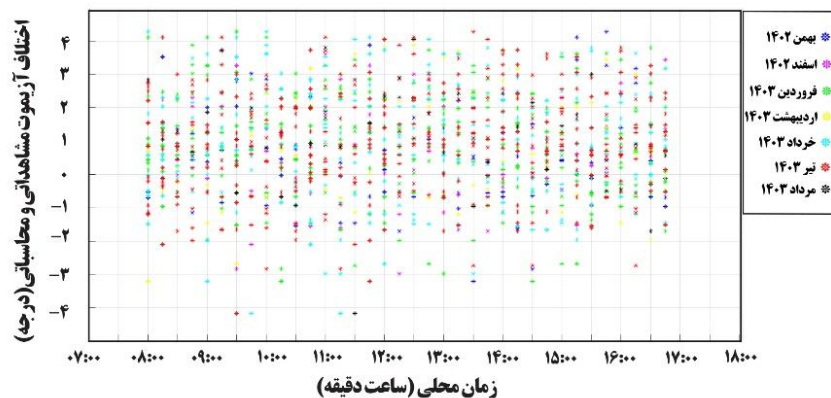


شکل ۱۶: هیستوگرام بردار خطا در تعیین موقعیت جغرافیایی به کمک سامانه رصد خورشید

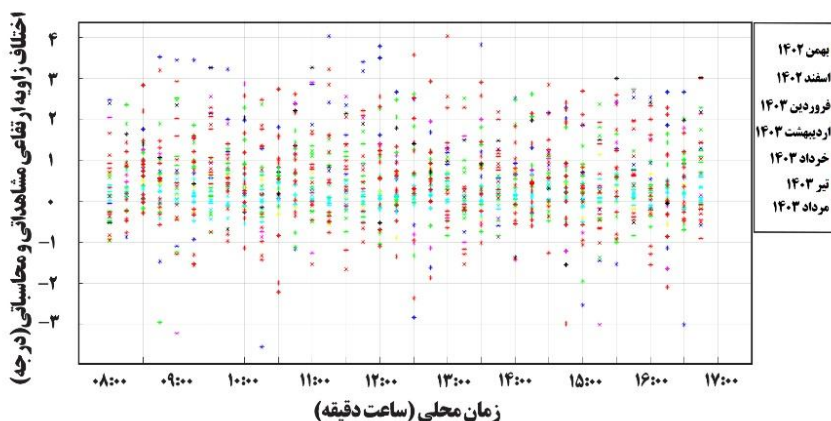
آن مقایسه و اختلافات آماری آنها در قالب نمودارهای شکل (۱۷) ترسیم شده است. آزمون و زاویه ارتفاعی محاسباتی خورشید برای هر موقعیت جغرافیایی و در هر ساعت محلی را می‌توان از منابع مختلفی همچون www.omnicalculator.com/physics/sun-angle یافت.

۴-۳- مقایسه خط سیر محاسباتی و مشاهداتی خورشید در طول روز

خط سیر خورشید از طریق توابع زمانی آزمون و زاویه ارتفاعی آن قابل نمایش است. در آخرین ارزیابی از عملکرد سامانه توسعه یافته به منظور رصد خورشید، مسیر مشاهداتی خورشید در هر روز با مسیر محاسباتی



(الف)



(ب)

شکل ۱۷: اختلاف خط سیر محاسباتی و مشاهداتی خورشید، (الف): اختلاف آزیموت مشاهداتی و محاسباتی برحسب درجه، (ب): اختلاف زاویه ارتفاعی مشاهداتی و محاسباتی برحسب درجه

خورشید با سامانه رصد خورشید توسعه یافته در توسط گارسیا گیل و رامی‌رز (۲۰۱۹) دقت‌های قابل رقابت و نزدیکی را نشان داد [۲۰]. در سامانه توسعه یافته توسط ایشان از دوربین‌های مجهز به عدسی‌های چشم‌ماهی برای رصد افق تا افق خورشید استفاده شده که متناسب با نتایج گزارش شده در آن دقت بازیابی زوایای مذکور در محدوده ۱/۸۶ درجه برای آزیموت و ۲/۴ درجه برای زوایای ارتفاعی خورشید بوده است.

۳-۵- بحث در مورد محدودیت‌ها و منابع عدم قطعیت

هدف اصلی از طراحی سامانه رصد خورشید در این تحقیق، یافتن راستای خورشید جهت تنظیم صفحات

در شکل (۱۷-الف) اختلاف آزیموت محاسباتی و مشاهداتی و در شکل (۱۷-ب) اختلاف زوایای ارتفاعی ترسیم شده است. رنگ نقاط ترسیم شده در این نمودارها ماه اندازه‌گیری آنها را نشان می‌دهد. بدیهی است اختلافات گزارش شده در این نمودار به تنهایی نشانه رخداد خطا در اندازه‌گیری‌های سامانه نبوده و بروز انکسار و شرایط جوی نیز در وقوع این اختلافات موثر بوده‌اند. توزیع ماهانه اختلافات، روند معناداری را نشان نداده و بروز دامنه تغییرات تا ۳ درجه‌ای در آزیموت و ۲ درجه‌ای در زاویه ارتفاعی برای مشاهدات هر مقطع از روز محتمل خواهد بود. مقایسه نتایج کسب شده در مورد بازیابی زوایای ارتفاعی و آزیموت

خورشیدی در نیروگاه‌های فتوولتائیک بود. نتایج کسب شده از این سامانه توان دستیابی به این هدف را نشان داد. با اینحال در این بخش محدودیت‌های موجود در سامانه توسعه یافته و همچنین منابع عدم قطعیت موجود مورد بحث قرار گرفته است. در سامانه توسعه یافته از حباب‌های روشنایی از جنس پلاستیک خشک بعنوان سطح محدب استفاده شده است. هر چند که این انتخاب در مقایسه با تلاش‌های قبلی محققین در زمینه ساخت سطح محدب نتیجه بهتری را کسب نموده است؛ اما نرم شدگی سطوح پلاستیکی در مواجهه طولانی با نور مستقیم خورشید خصوصاً هنگام رنگ آمیزی آن با رنگ‌های تیره موجب برهم خوردن شکل هندسی آن می‌گردد. بکارگیری سطوح تیره با جنس فلز و یا پر کردن سطوح پلاستیکی با ملات ساختمانی می‌تواند در کاهش این اتفاق موثر باشد.

از منظر عوامل بروز عدم قطعیت در عملکرد سامانه توسعه یافته می‌توان به وسعت ظاهر شدن لکه برآق خورشید در سطح محدب، ثبات و ضخامت خطوط شاقولی مورد استفاده در مرحله ترازگذاری و دقت مدل‌سازی سه‌بعدی سطح محدب اشاره داشت.

ابعاد لکه برآق خورشید منجر به شناسایی نقاط سه‌بعدی و بردارهای نرمال متعددی در سطح محدب جهت برآورد راستای بازتاب خورشید می‌گردد. از این رو، میانگین‌گیری از پیکسل‌های واقع شده در لکه‌های برآق وسیع می‌تواند بازیابی راستای بازتاب و به تبع آن راستای خورشید را با عدم قطعیت بیشتری روبرو سازد. شعاع انحناء و میزان برآق بودن رنگ سطح محدب نیز از عوامل اثرگذار در وسعت لکه برآق خورشید بوده که بکارگیری سطوح کروی با شعاع کمتر می‌تواند در تدقیق روند بازیابی راستای خورشید موثر باشد. باید توجه داشت که خورشید یک جرم سماوی بزرگ تلقی شده که از نگاه ناظر زمینی قطر آن زاویه‌ای نزدیک به 0.53° درجه را برخوردار است. از این رو عدم قطعیت بکارگیری مشاهدات مربوط به زاویه ارتفاعی خورشید در روابطی مانند (۱۴) موجب انتشار خطاهای

مشاهداتی به کمیت دیگری همچون عرض جغرافیایی می‌گردد. مرحله ترازگذاری نیز یکی از گام‌های اجرایی در کالیبراسیون میدانی سامانه رصد خورشید است. اینکار پس از نصب دوربین ویدئویی از طریق تصویربرداری از خطوط شاقولی به اجرا رسیده است (شکل ۱۰). ضخامت خط شاقولی و همچنین ناشاقول بودن این خطوط ناشی از نوسانات احتمالی در زمان تصویربرداری از عوامل بروز خطا در شناسایی نقطه پنهان شاقولی (شکل ۸) هستند. افزایش تعداد خطوط شاقولی به منظور ایجاد افزونگی در شناسایی نقطه پنهان، بکارگیری سیم‌های نازک یا ریسمان ماهیگیری رنگ شده و همچنین بکارگیری وزنه‌های سنگین در تثبیت خطوط شاقولی می‌توانند در کاهش عدم قطعیت‌های مرتبط با مرحله ترازگذاری موثر باشند. باید توجه داشت که انحراف در شناسایی راستای شاقولی به طور مستقیم در کمیت‌هایی همچون تعیین زاویه ارتفاعی خورشید موثر خواهد بود.

کیفیت و دقت مدل‌سازی سه‌بعدی سطح محدب نیز از دیگر شاخص‌های اثرگذار در دقت نتایج محسوب می‌شود. برخی از تلاش‌های اولیه در بازسازی سه‌بعدی سطح محدب هنگام نبود بافت کافی باعث بروز گپ در ابرنقاط حاصله می‌شد که این موضوع در تست‌های اولیه از طریق نقاط سه‌بعدی حاصله از برازش کره جبران می‌شد. با اینحال نتایج گزارش شده در این مقاله بعنوان بهترین نتایج کسب شده در زمان بازسازی کامل سطح از طریق روش‌های *SfM* هنگام تامین بافت کافی در سطح محدب ایجاد شده است. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی سه‌بعدی سطح به دو محصول ابرنقاط سه‌بعدی و همچنین بردارهای نرمال سطح نیاز است. پیشنهاد تعیین بردارهای نرمال سطح از طریق روش‌های فتومتری و سنجش اثرات این راهکار در نتایج حاصله می‌تواند بعنوان پیشنهادات آتی این تحقیق محسوب شود. در روش‌های فتومتری، تصویربرداری از سطح سه‌بعدی هنگام تغییر در موضع نورپردازی شرایط بازیابی بردارهای نرمال سطح را فراهم می‌آورد.

نمود. از دیگر نتایج کسب شده در این تحقیق می‌توان به اختلافات زاویه‌ای در محدوده ۳ درجه‌ای برای موضع ظاهری خورشید نسبت به موقعیت حقیقی خورشید اشاره داشت. این اختلافات را به تنهای نمی‌توان ناشی از خطای سامانه تصور نمود و به نظر می‌رسد که انکسار و شرایط جوی نیز از عوامل بروز این اختلافات در موضع ظاهری خورشید باشد. با اینحال برآزش و بکارگیری توابع زمانی به مشاهدات روزانه از موضع ظاهری خورشید توانسته تا اثرات اختلافات مذکور را در فرایندهایی همچون تعیین موقعیت مکانی کاهش دهد. بکارگیری فیلتر کالمن در روند پیش‌بینی خط سیر خورشید در زمان بروز عدم قطعیت‌های مشاهداتی می‌تواند در قابلیت‌اعتماد این سامانه موثر باشد که بررسی این موضوع در دستورکار تحقیقات آتی نویسندگان قرار دارد.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله راهکاری ساده از طریق طراحی و ساخت یک سامانه فتومتری بمنظور پایش مستمر موقعیت خورشید در آسمان پیشنهاد شد. این سامانه بدون نیاز به عملگرهای رباتیک صرفاً با اخذ تصویر از یک سطح محدب واقع شده در مقابل خورشید، زوایای ارتفاعی و آزیموت آنرا تعیین می‌کند. سازوکار کالیبراسیون هندسی این سامانه جنبه نوآورانه داشته که در آن امکان تبدیل اندازه‌گیری در سیستم‌مختصات‌های محلی را به مرجع یک سیستم‌مختصات توپوسنتریک فراهم آورده است. نتایج کمی در ارزیابی عملکرد این سامانه نشان داد که این سامانه برای انجام مشاهدات نجومی غیردقیق مناسب بوده و از آن می‌توان در کاربردهای دیگری همچون تنظیم لحظه‌ای راستای صفحات خورشیدی در نیروگاه‌های فتوولتائیک استفاده

مراجع

- [1] A. Kalair, N. Abas, M. S. Saleem, A. R. Kalair, and N. Khan, "Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables," *Energy Storage*, vol. 3, no. 1, p. e135, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/est2.135>
- [2] V. M. Fthenakis, H. C. Kim, and E. Alsema, "Emissions from photovoltaic life cycles," *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 6, pp. 2168-2174, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1021/es071763q>
- [3] P. Takács, J. Slíz-Balogh, Á. Horváth, D. Horváth, I. M. Jánosi, and G. Horváth, "How the morning-afternoon cloudiness asymmetry affects the energy-maximizing azimuth direction of fixed-tilt monofacial solar panels," *Royal Society Open Science*, vol. 9, no. 4, p. 211948, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.211948>
- [4] A. A. Hanieh, "Solar photovoltaic panels tracking system," in *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Dynamical Systems and Control*, Sousse, Tunisia, 2010, vol. 36, p. 3037. DOI: <https://doi.org/10.1109/DSC.2010.36>
- [5] A. Farkas, D. Szaz, A. Egri, M. Blaho, A. Barta, D. Nehez, B. Bernath, G. Horvath, "Accuracy of sun localization in the second step of sky-polarimetric Viking navigation for north determination: a planetarium experiment," *JOSA A*, vol. 31, no. 7, pp. 1645-1656, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.31.001645>
- [6] R. Walraven, "Calculating the position of the sun," *Solar Energy*, vol. 20, no. 5, pp. 393-397, 1978. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90155-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90155-2)
- [7] D. V. Khankal, D. Das, V. K. Singh, D. Sivashankar, D. Sunil, and N. A. Vishwath, "Combination Double Coordinate Solar Monitoring Sensor Device with Low Energy Consumption," in *2023 International Conference on Communication, Security and Artificial Intelligence (ICCSAI)*, 2023: IEEE, pp. 816-822. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCSAI.2023.816822>
- [8] E. M. Standish and J. G. Williams, "Orbital ephemerides of the Sun, Moon, and

- planets," *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, pp. 279-323, 1992. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2822-1_10
- [9] I. Reda and A. Andreas, "Solar position algorithm for solar radiation applications," *Solar Energy*, vol. 76, no. 5, pp. 577-589, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>
- [10] H. E. Ross, "The Sun/Moon Illusion in a Medieval Irish Astronomical Tract," *Vision*, vol. 3, no. 3, p. 39, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/vision3030039>
- [11] A. J. Mallmann and S. P. Mayer, "Some elementary but surprising facts about the Sun's path at sunset," *Applied Optics*, vol. 54, no. 4, pp. B204-B206, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.54.00B204>
- [12] G. Mwithiga and S. N. Kigo, "Performance of a solar dryer with limited sun tracking capability," *Journal of Food Engineering*, vol. 74, no. 2, pp. 247-252, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.015>
- [13] S. Abdallah and S. Nijmeh, "Two axes sun tracking system with PLC control," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 11-12, pp. 1931-1939, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.019>
- [14] M. Davis, J. Lawler, J. Coyle, A. Reich, and T. Williams, "Machine vision as a method for characterizing solar tracker performance," in *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008: IEEE, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922784>
- [15] R. Ranganathan, W. Mikhael, N. Kutkut, and I. Batarseh, "Adaptive sun tracking algorithm for incident energy maximization and efficiency improvement of PV panels," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2623-2626, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.014>
- [16] J. Pombas and J. Murta-Pina, "A low-cost sun tracking system based on image processing and a robot arm," in *2019 International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*, 2019: IEEE, pp. 99-105. DOI: <https://doi.org/10.1109/YEF-ECE.2019.8740575>
- [17] C.-D. Lee, H.-C. Huang, and H.-Y. Yeh, "The development of sun-tracking system using image processing," *Sensors*, vol. 13, no. 5, pp. 5448-5459, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/s130505448>
- [18] R. Abd Rahim, M. Zainudin, M. Ismail, and M. Othman, "Image-based solar tracker using Raspberry Pi," *J Multidiscip Eng Sci Technol (JMEST)*, vol. 1, no. 5, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEST.2014.1234567>
- [19] C.-C. Wei, Y.-C. Song, C.-C. Chang, and C.-B. Lin, "Design of a solar tracking system using the brightest region in the sky image sensor," *Sensors*, vol. 16, no. 12, p. 1995, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16121995>
- [20] G. Garcia-Gil and J. M. Ramirez, "Fish-eye camera and image processing for commanding a solar tracker," *Heliyon*, vol. 5, no. 3, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01456>
- [21] J. A. Carballo, J. Bonilla, M. Berenguel, J. Fernández-Reche, and G. García, "New approach for solar tracking systems based on computer vision, low cost hardware and deep learning," *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 1158-1166, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.091>
- [22] Q. Paletta and J. Lasenby, "A temporally consistent image-based sun tracking algorithm for solar energy forecasting applications," *arXiv preprint arXiv:2012.01059*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.01059>
- [23] M. Saeedi and R. Effatnejad, "A new design of dual-axis solar tracking system with LDR sensors by using the Wheatstone

- bridge circuit," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 13, pp. 14915-14922, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3061234>
- [24] K. Kumar et al., "Soft computing and IoT based solar tracker," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 12, no. 3, p. 1880, 2021. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i3.pp1880-1887>
- [25] J. Zhang, Z. Yin, and P. Jin, "Error analysis and auto correction of hybrid solar tracking system using photo sensors and orientation algorithm," *Energy*, vol. 182, pp. 585-593, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.097>
- [26] A. Niccolai and A. Nespoli, "Sun position identification in sky images for nowcasting application," *Forecasting*, vol. 2, no. 4, pp. 488-504, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/forecast2040029>
- [27] G. Blewitt, "An improved equation of latitude and a global system of graticule distance coordinates," *Journal of Geodesy*, vol. 98, no. 1, p. 6, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01600-1>
- [28] D. Zhang, K. Wei, Y. Yao, J. Yang, G. Zheng, and Q. Li, "Capture and prediction of rainfall-induced landslide warning signals using an attention-based temporal convolutional neural network and entropy weight methods," *Sensors*, vol. 22, no. 16, p. 6240, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22166240>
- [29] Y. Xue, S. Zhang, M. Zhou, and H. Zhu, "Novel SfM-DLT method for metro tunnel 3D reconstruction and visualization," *Underground Space*, vol. 6, no. 2, pp. 134-141, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.10.003>
- [30] G. Lenda, J. Siwiec, and J. Kudryś, "Multi-variant TLS and SfM photogrammetric measurements affected by different factors for determining the surface shape of a thin-walled dome," *Sensors*, vol. 20, no. 24, p. 7095, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247095>
- [31] O. Özyeşil, V. Voroninski, R. Basri, and A. Singer, "A survey of structure from motion," *Acta Numerica*, vol. 26, pp. 305-364, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1017/S096249291700006X>
- [32] D. Gonzalez-Aguilera, J. Gomez-Lahoz, and P. Rodríguez-González, "An automatic approach for radial lens distortion correction from a single image," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 4, pp. 956-965, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2043429>
- [33] S. K. Ghosh, "Photogrammetric calibration of a scanning electron microscope," *Photogrammetria*, vol. 31, no. 3, pp. 91-114, 1975. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-8663\(75\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0031-8663(75)90003-8)
- [34] T. M. Strat, "Recovering the camera parameters from a transformation matrix," in *Readings in Computer Vision*: Elsevier, 1987, pp. 93-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051581-6.50016-2>
- [35] C. S. Fraser, "Digital camera self-calibration," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 52, no. 4, pp. 149-159, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(97\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(97)00005-1)
- [36] C. Stamatopoulos and C. S. Fraser, "Calibration of long focal length cameras in close range photogrammetry," *The Photogrammetric Record*, vol. 26, no. 135, pp. 339-360, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00651.x>
- [37] A. Safdarinezhad, M. J. Abdollahifard, and A. Ganjali, "A photogrammetric solution for measurement of power lines sag via integration of image and accelerometer data of a smartphone," *Measurement*, vol.

- 199, p. 111493, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111493>
- [38] J. Zheng, J. Yan, J. Pei, and G. Liu, "Solar tracking error analysis of fresnel reflector," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/123456>
- [39] R. Kittler and S. Darula, "Determination of time and sun position system," *Solar Energy*, vol. 93, pp. 72-79, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.015>
- [40] <https://www.intmath.com/blog/mathematics/the-equation-of-time-5039>. "The Equation of Time." <https://www.intmath.com/blog/mathematics/the-equation-of-time-5039>
- [41] X. Xie, H. Bae, and J. F. Lindner, "Alien suns reversing in exoplanet skies," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 8426, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11527-8>
- [42] D. W. Hughes, B. D. Yallop, and C. Y. Hohenkerk, "The Equation of Time," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 238, no. 4, pp. 1529-1535, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/238.4.1529>



Development of a Sun Tracking System based on the Photometric Techniques

Mohsen Behnoodyan ¹, Alireza Safdarinezhad ^{2*}, Seyed Abdollah Kianejad Tejenaki ²

1- Msc student of Photogrammetry, Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University

2- Assistant Professor, Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University

Abstract

Observational sun tracking can be used in various applications, such as adjusting the orientation of solar panels in photovoltaic plants, analysing the effect of the atmosphere in differentiating between the observed and actual direction of the sun, determining time, date and religious moments. The sun azimuth and the elevation angle measured in a topocentric coordinate system are the parameters needed for sun tracking. In this paper, a simple sun-tracking system is designed without the need for any robotic actuators. Imaging from a dark convex surface exposed by the sun and determining the sun's position by finding its hotspot is the backbone of this system's design. Here, the hotspot position is automatically detected and the sun direction is retrieved by knowing the normal reflection direction of the convex surface. The 3D modeling of the convex surface and the geometric calibration of the proposed sun tracking system will need to be performed to reach this aim. So, the design of a field calibration solution to find the conversion of the measurements in the local coordinate system to a topocentric coordinate system is one of the other innovative contributions of this research. The results demonstrated that the accuracy of this system in determining noon is 29.7 seconds, in retrieving the latitude of the sun 0.31 degrees, and in determining the geographic position, it is approximately half a degree. These amounts will be proper in non-precise astronomical applications and in adjusting the orientation of the solar panels.

Key words : Sun Tracking, Photometry, 3D Modelling, Topocentric Coordinate System, Calibration.