نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۳

Vol.12, No.3, Autumn 2024

۱۰۵ -۱۳٤

مقاله پژوهشی

توسعه راهکاری مبتنی بر تکنیک‌های فتومتری به‌منظور رصد پیوسته خورشید

محسن بهنودیان[۱]، علیرضا صفدری نژاد[۲*]، سیّد عبدالله کیانژاد 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 نحوهٔ اثرگذاری جو در تمایز راستای مشاهداتی و واقعی خورشید، تعیین لحظات شرعی و زمان قابل استفاده است. اندازه‌گیری آزیموت و زاویهٔ 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 مشاهدهٔ بازتاب آن در سطح محدب، سنگ‌بنای طراحی این سامانه محسوب می‌شود. در روش پیشنهاد شده، موقعیت لکهٔ 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 مشارکت‌های 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، سیستم‌مختصات توپوسنتریک، کالیبراسیون.

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

تلفن: ۰۹۱۲۳۲۵۸۸۵۲

Email: safdarinezhad@tafreshu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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 چرخهٔ 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 فتوولتاییک[1] 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 جنبهٔ طراحی به دو ساختار مشاهده مستقیم و غیرمستقیم خورشید قابل تفکیک بوده و از منظر روش پردازشی در دو شکل الگوریتم‌های ماشین بینایی[2] و پردازش سیگنال[3] به اجرا می‌رسند[۱۴ و ۱۵]. مشاهده مستقیم خورشید مستلزم تجهیز ابزارها به عملگرهای چرخش سنجنده بوده و روش‌های غیرمستقیم تجهیزات رباتیک[4] 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

[1] *Photovoltaic Power Plants*

[2] *Machine vision*

[3] *Signal Processing*

[4] *Robotic*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

این منظور ابتدا موقعیت مرکز دایرهٔ 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 برپایهٔ برازش دایره بر لبه‌های روشنایی خورشید صورت گرفته و از فیلترهای کاهنده نور جهت جلوگیری از اشباع رادیومترکی[1]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 هاف[2]در لبه‌های مستخرج از تصویر خورشید شناسایی می‌شود[۱۸]. شناسایی روشن‌ترین ناحیه تصویر پس از ضرب پیچشی آن با یک هستهٔ 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[3]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[4]الکس‌نت[5] بوده که یادگیری عمیق آن با هدف شناسایی خورشید از سایر پدیده‌ها صورت پذیرفته بود. این روش مانند سایر روش‌های مشاهدهٔ مستقیم خورشید چالش بروز اشباع‌شدگی درجات روشنی تصویر را برخودار 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[6]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 توسعهٔ راهکارهای پیش‌بینی شده است. از این رو، کوئنتین و لاسنبی (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 و 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

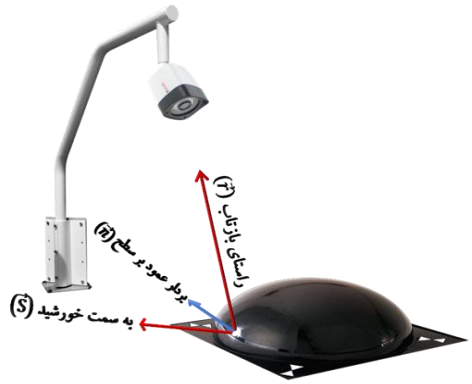
[1] *Radiometer*
[2] *Hough Conversion*
[3] *Fish Eye*
[4] *Neural Networks*
[5] *Alexnet*
[6] *Azimuth*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

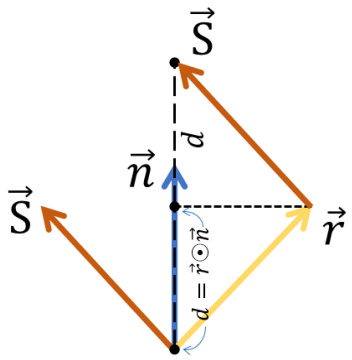
وسیله یک سطح محدب، تیره و برّاق مبتنی بر روش‌های فتومتریک توسعه یافته است. عدم نیاز به نشانه‌روی مستقیم به خورشید و تجهیزات رباتیک، نصب و راه‌اندازی ساده با امکانات محدود، امکان کالیبراسیون صحرایی صرفاً به کمک خطوط شاقولی و رویکرد هندسی بکاررفته در طراحی و آماده‌سازی این سامانه از جنبه‌های نوآورانه آن قلمداد می‌شود. ویژگی‌های ذکر شده باعث شده که سامانه توسعه‌یافته 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 آیینه‌های 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 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 بردارعمود بر سطح در موقعیت لکهٔ براق است (شکل (۱-ب)).



الف) نمایی از سامانه رصد خورشید



ب) سازوکار هندسی برآورد راستای خورشید

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

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

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

در رابطهٔ (۱)، $\odot$ نماد ضرب داخلی دو بردار و × 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 $\vec{n}$

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

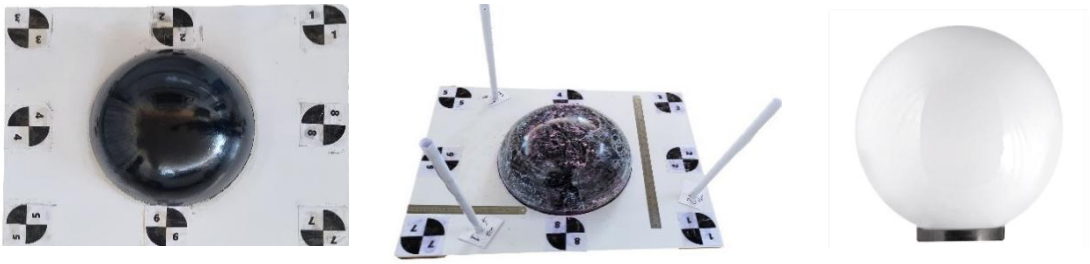
خواهد بود. توصیف هندسی این رابطه را می‌توان به سادگی در شکل (۱-ب) مشاهده نمود. برآورد بردار لحظه‌ای $\vec{S}$ در یک سیستم‌مختصات توپوسنتریک[1] دست‌راستی هدف نهایی این تحقیق است. مبداء یک سیستم‌مختصات توپوسنتریک، نقطه‌ای در سطح زمین، راستای محور سوم (z) هم‌جهت با امتداد زنیط[2] و محور دوم (y) آن در صفحهٔ نصف‌النهار گذرنده از مبداء و هم‌سو با امتداد شمال جغرافیایی است[۲۷]. تعیین راستای بردارهای لحظه‌ای $\vec{S}$ در چنین سیستم‌مختصاتی قابل تبدیل به زوایای آزیموت و زاویهٔ ارتفاعی خورشید در موضع ظاهری آن خواهد بود. روند ساخت، آماده‌سازی و کالیبراسیون[3] این سامانه مشتمل بر هفت گام ۱- ساخت سطح محدب، ۲- مدل‌سازی سه‌بعدی و برآورد بردارهای نرمال سطح[4] محدب، ۳- کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی، ۴- نصب و توجیه دوربین ویدئویی نسبت به سطح محدب، ۵- سازوکار پردازشی به‌منظور رصد لکهٔ براق خورشید و تعیین راستای اولیه خورشید، ۶- تبدیل بردارهای راستای اولیه خورشید به مرجع یک سیستم‌مختصات 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 روشنایی 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 پوستهٔ خارجی آنتن‌های مقعر به دلایل مختلفی همچون باقی‌ماندن 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 زاویهٔ 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 باقیماندهٔ حباب به‌عنوان بخش متصل به پایه دستگاه استفاده شود (شکل(۲-ب)). رنگ اولیه پوستهٔ 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 لکهٔ برّاق 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 لکهٔ برّاق و سایر نواحی ایجاد می‌سازند. این موضوع آشکارسازی خودکار لکه برّاق 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 سه بعدی به‌کمک روش‌های ساختار از حرکت[5] *(SfM)* گردید[۲۸]. مطابق با شکل (۲-پ)، سطح محدب دارای یک پایه مسطح بوده که بر روی آن علائمی[6] ترسیم شده است. این علائم در مرحلهٔ بعد (مدل‌سازی سه‌بعدی و برآورد بردارهای نرمال سطح) مختصات‌دهی شده و از آن برای تعیین پارامترهای خارجی دوربین ویدئویی استفاده می‌شود.

[1] *Topocentric Coordinate System*
[2] *Zenith*
[3] *Calibration*
[4] *Surface Normal Vectors*
[5] *Structure from Motion*
[6] *Target*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]



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

۲-۲- مدل‌سازی سه‌بعدی و برآورد بردارهای نرمال سطح محدب

مطابق با رابطهٔ (۱)، دستیابی به بردار عمود بر سطح برای هر نقطه به‌منظور 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 متاشیپ[1] نسخه ۱,۸,۴ استفاده شده است. سازوکار نرم‌افزارهای *SfM* مبتنی بر تناظریابی عارضه‌مبنا[2] 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 به‌منظور 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.

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 متاشیپ 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 فاصلهٔ معلوم[3] 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

[1] *Metashape*
[2] *Based Matching*
[3] *Scale bar*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

سه‌بعدی و در منظر دوم، ضخامت ابرنقاط نسبت به یک رویهٔ کروی 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 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.

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

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

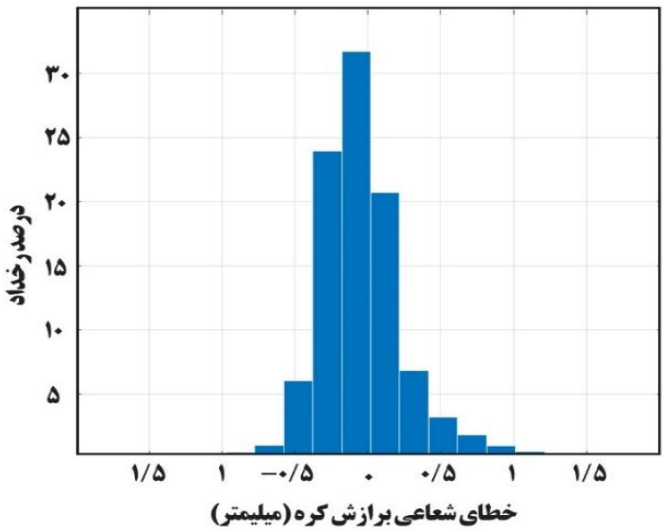
شکل (۴) هیستوگرام اختلاف شعاعی ابرنقاط نسبت به سطح کره را نشان می‌دهد. مطابق با این هیستوگرام، اختلاف سطح بازسازی شده نسبت به یک کره ناچیز و در بدترین شرایط نزدیک به یک میلی‌متر بوده است.

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 کامپر[1] نسخه ۲,۸,۱ به اجرا رسیده است. سازوکار 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.

[1] *Cloud Compare*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]



شکل۴ : هیستوگرام اختلاف شعاعی ابرنقاط نسبت به سطح کره برازش یافته

۲-۳- کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی

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

رابطه(۲)

$$\begin{bmatrix} x - xo + \Delta x \\ y - yo + \Delta y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R_X(\omega) R_Y(\varphi) R_Z(\kappa) \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix}$$

در رابطه(۲)، بردار متصل‌کنندهٔ موقعیت سه‌بعدی یک نقطه در فضای شئ ($[X,\ Y,\ Z]^T$) به موقعیت سه‌بعدی مرکز تصویر در فضای شئ ($[X_o. Y_o. Z_o]^T$) در لحظهٔ ثبت تصویر، هم‌راستا با بردار موقعیت سه‌بعدی و پالایش‌شدهٔ متناظر آن در سیستم‌مختصات تصویر $[x - xo + \Delta x.\ y - yo + \Delta y.\ -f]^T$ پنداشته می‌شود. در این رابطه، $[xo,\ yo]$ مختصات مرکز تصویر نسبت به مرکز ماتریس تصویر، $[\Delta x, \Delta y]$ اصلاحات لازم به‌منظور حذف اعوجاجات هندسی[1]تصویر از مختصات مشاهداتی ($[x, y]$)، f فاصله اصلی دوربین، λ ضریب مقیاس به‌منظور هم‌اندازه‌سازی بردارهای فضای شئی و تصویر و $R_X(\omega)$، $R_Y(\varphi)$ و $R_Z(\kappa)$ نیز به‌ترتیب ماتریس‌های دوران سه‌بعدی حول محورهای اول، دوم و سوم سیستم مختصات سه‌بعدی جهت موازی‌ساختن دو سیستم‌مختصات شئی و تصویر هستند[۳۲].

مطابق با رابطهٔ(۲)، تمامی عوامل برهم زننده هم‌خطی در صورت برخورداری از رفتار سیستماتیک[2]بعنوان اعوجاج‌های یک سامانه تصویربرداری پرسپکتیو[3]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[4]به اجرا رسیده است[۳۵]. بکارگیری یک صفحه شطرنجی و اخذ تصویر از زوایای مختلف نسبت به آن، داده‌های لازم برای اجرای روش خود-

[1] *Geometric Distortions*

[2] *Systematic*

[3] *Perspective*

[4] *Self Calibration*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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 استرالیس (*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. این‌کار 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 استرالیس، 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.

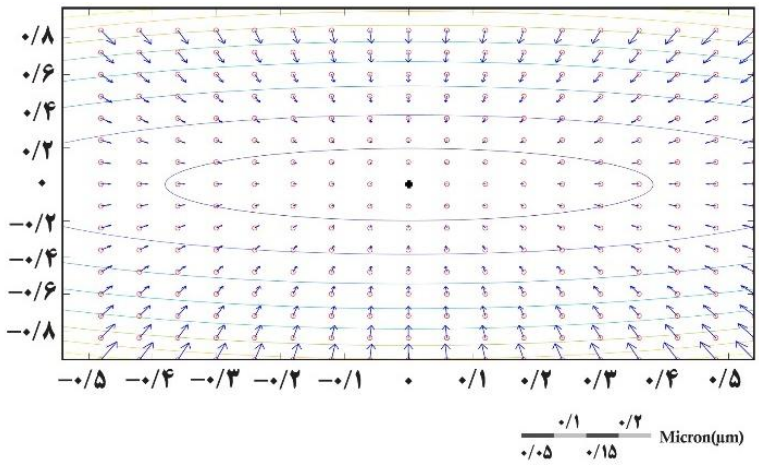
الگوی سیستماتیک ارائه شده در شکل (۵)، برآیند اعوجاجات شعاعی و مماسی برآورد شده را در روند کالیبراسیون داخلی برای دوربین ویدئویی بکارگرفته شده در سامانه رصد خورشید نشان می‌دهد. بدیهی است که لحاظ نشدن این اختلافات سیستماتیک در تعیین موقعیت نقاط در فضای تصویر اعتبار هندسی رابطهٔ مشهور شرط‌هم‌خطی را مخدوش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

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

برند	*Bodyguard_BG_AH BI33_Wide*
ابعاد سنسور (میلیمتر×میلیمتر)	۵٫۳۷×۴٫۰۴
ابعاد ماتریس تصویر (پیکسل×پیکسل)	۹۶۰×۱۰۸۰
فاصله کانونی (میلیمتر)	۱٫۱۳۵
مختصات مرکز تصویر (میکرومتر)	$x_o=۳\times۱۰^{-۳}$ $y_o=-۴\times۱۰^{-۳}$
پارامترهای اعوجاج شعاعی	$K_1=۳٫۲۷\times۱۰^{-۱}$ $K_2=۱٫۱۱\times۱۰^{-۱}$ $K_3=۱٫۰۹\times۱۰^{-۱}$
پارامترهای اعوجاج مماسی	$P_1=-۶٫۴۵۵\times۱۰^{-۴}$ $P_2=۵٫۰۰۷\times۱۰^{-۳}$
پارامترهای افاینتی	$B_1=-۱٫۵۳۵\times۱۰^{-۳}$ $B_2=-۲٫۴۲۵\times۱۰^{-۴}$

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]



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 لکهٔ براق خورشید در بیشترین بازهٔ 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 بازهٔ زمانی رؤیت خورشید را در طول روز تابعی از شرایط محیطی می‌سازد. تغییرات فصلی زاویه ارتفاعی خورشید نیز در بازهٔ زمانی رؤیت پذیری لکه براق اثر گذار بوده که با اعمال تنظیمات فصلی درموقعیت نسبی دوربین و سطح محدب، امکان بهینه‌سازی آن با هدف تامین بیشترین زمان رؤیت‌پذیری لکهٔ برّاق وجود خواهد داشت.

پس از استقرار نسبی دوربین و سطح محدب، از نقاط علامت‌گذاری شده در حاشیهٔ 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 معادلهٔ مشهور شرط هم‌خطی به اجرا می‌رسد. مقادیر اولیه این فرایند از طریق معادله معادله خطی مستقیم[1] 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 (۳-۲) پالایش می‌شوند. ماحصل اجرای این بخش تعیین مختصات مرکز تصویر در سیستم‌مختصات شئ ($[X_o. Y_o. Z_o]$) 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 سیستم‌مختصات آزاد و غیرهمراستا با یک سیستم‌مختصات توپوسنتریک برآورد می‌گردند. هر بار نصب و راه‌اندازی این سامانه نیز وضعیت متفاوتی را برای سطح سه‌بعدی نسبت به سیستم‌مختصات 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)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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

۲-۵- آشکارسازی لکهٔ براق خورشید در سطح محدب و تعیین راستای اولیه خورشید

پس از نصب و تنظیم نسبی دوربین و سطح محدب، گام بعدی توسعهٔ سازوکار خودکار در تعیین موقعیت لکهٔ برّاق به‌منظور رصد خورشید است. در این بخش روند پردازشی مرتبط با شناسایی لکهٔ برّاق در تصاویر اخذ شده توسط دوربین ویدئویی تشریح شده و سپس نحوهٔ 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 محدودهٔ سطح محدب بصورت دستی ترسیم شده تا از حضور سایر پدیده‌های موجود در تصویر در روند پردازشی جلوگیری گردد. این ماسک[1] 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 لکهٔ برّاق خورشید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. عدم وجود لکهٔ برّاق در محدودهٔ سطح محدب منجر به حذف و عدم بکارگیری آن تصویر از روند شناسایی لکهٔ برّاق می‌شود. ویژگی لحاظ شده برای سنجش وجود و یا عدم وجود لکهٔ برّاق عدم وجود گام خاکستری در بازهٔ ده درصد بالایی از توان تفکیک رادیومتریکی تصویر می‌باشد. این اقدام با فرض دستیابی روشن‌ترین پیکسل[2] از سطح محدب به بالاترین گام خاکستری تصویر هنگام وجود بازتاب آیینه‌ای خورشید صورت گرفته است.

ویژگی تصویری لحاظ شده در شناسایی لکهٔ برّاق، وجود تمایز روشنی بالای آن با نواحی هم‌جوار است (شکل(۶)). به نظر می‌رسد که این تمایز منجر به حفظ شکل و وسعت قطعهٔ تصویری شامل لکهٔ برّاق به ازای تغییر در محدودهٔ زیادی از حدود آستانه گردد. به‌عبارت بهتر، به‌دلیل تمایز روشنی شدید در مرزهای لکهٔ برّاق، انتظار می‌رود که در یک روند آستانه‌گذاری کاهشی، لکهٔ برّاق به ازای تغییر تدریجی حدود آستانه در یک بازهٔ بزرگ، بصورت یک قطعه تصویری پایدار ظاهر گردد.

در روش طراحی شده برای شناسایی لکهٔ برّاق تلاش شده تا در روندی کاهشی برای آستانه‌گذاری درجات روشنی تصویر، این لکه به شکل یک قطعهٔ تصویری پایدار آشکارسازی گردد. در این روند، دامنهٔ تغییرات حدآستانه معادل با نیمی از دامنهٔ تغییرات روشنی تصویر در محدودهٔ ماسک سطح محدب انتخاب شده و مناسب‌ترین آستانه برای جداسازی لکهٔ برّاق بر اساس تحلیل پایداری وسعت قطعه تصویری حاوی آن شناسایی می‌گردد. با فرض اختصاص داشتن روشن‌ترین پیکسل‌ها از سطح محدب به لکهٔ برّاق، 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 لکهٔ برّاق اختصاص داشته و با کاهش مقدار حدآستانه به تدریج قطعات تصویری دیگری ظاهر گردند. انتخاب بازهٔ 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 لکهٔ برّاق برپایهٔ رصد وسعت قطعهٔ تصویری شامل لکهٔ برّاق به اجرا می‌رسد. برای این اقدام، در یک نمودار دوبعدی وسعت قطعه تصویری حاوی لکهٔ برّاق (دارای متوسط روشنی بیشتر نسبت به سایر قطعات احتمالی شناسایی شده) بصورت تابعی از حدآستانهٔ مرتبط ترسیم شده و سپس با برازش خطی به ابتدا و انتهای این نمودار،

[1] *Mask*
[2] *Pixel*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

مقدار آستانهٔ مناسب شناسایی می‌شود. در این روند، آستانهٔ متناظر با موقعیت دارای بیشترین فاصله نسبت به خط برازش‌یافته بعنوان آستانهٔ مناسب در جداسازی لکهٔ برّاق انتخاب می‌گردد. شبه‌کد ارائه شده در الگوریتم (۱) روند شناسایی قطعه تصویری شامل لکهٔ برّاق را نشان می‌دهد.

شکل۶: نمونه‌ای از یک تصویر اخذ شده توسط دوربین ویدئویی از سطح محدب در زمان وجود بازتاب خورشید

الگوریتم (۱): شبه‌کد مربوط به روند شناسایی لکهٔ برّاق مربوط به بازتاب آیینه‌ای 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

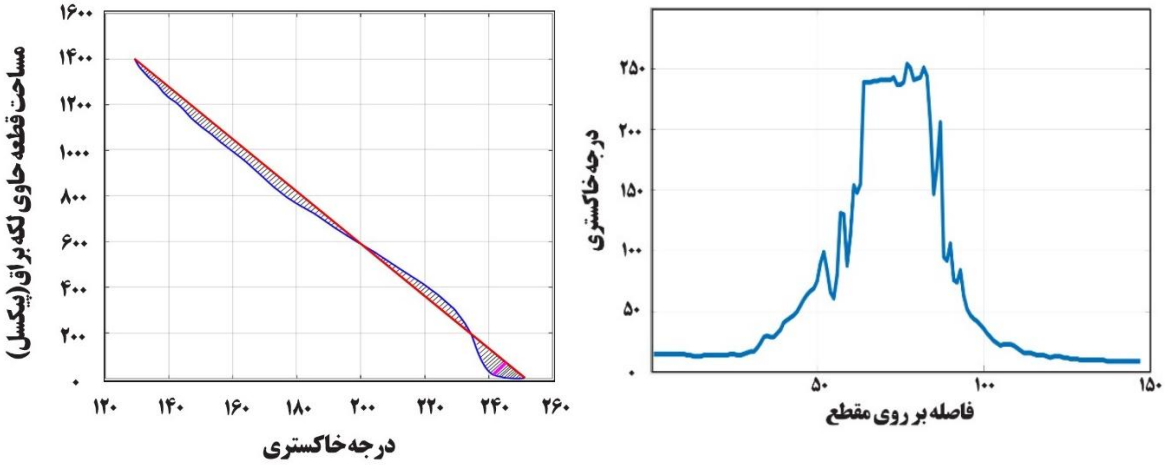
خروجی

$H(x,y)$: ماسک حاوی لکهٔ برّاق

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 وتمامی زوج مرتب‌های (i, A_i) از معادله خط برآورد شده در ۸ (رابطه(۳))
۱۰ | i_{opt} = مقدار i مربوط به دورترین زوج مرتب (i, A_i) از معادله خط برآورد شده در ۸
۱۱ | $H(x,y)$ = تولید ماسک دودویی $I(x,y) > i_{opt} \cap M(x,y)$
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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

مطابق با شبه‌کد ارائه شده در الگوریتم (۱)، معیار انتخاب حد آستانهٔ مناسب جهت جداسازی پهنهٔ مربوط به لکهٔ برّاق بر اساس تعیین فاصله عمودی نقاط مربوط به نمودار حاوی زوج مرتب‌های $(i.A_i)$ نسبت به خط واصل بین نقطهٔ ابتدا و انتها این نقاط صورت می‌پذیرد. شکل (۷-الف) مقطعی از درجات روشنی واقع بر لکهٔ برّاق و نواحی هم‌جوار آنرا نشان می‌دهد. موقعیت مقطع انتخاب شده در شکل (۶) نمایش یافته است.



(الف) (ب)

شکل۷: نمایش یک مقطع از درجات روشنی تصویر در محدوده لکهٔ برّاق و نمودار زوج مرتب‌های $(i.A_i)$، (الف): مقطعی از درجات روشنی لکهٔ برّاق و نواحی مجاور، (ب): نمودار زوج مرتب‌های $(i.A_i)$ در برآورد آستانه مناسب

در شکل (۷-ب) نمودار زوج مرتب‌های $(i.A_i)$ ترسیم شده است. مطابق با این نمودار، انتخاب آستانه در بازهٔ ۲۵۵ تا ۲۴۰ منجر به تغییرات محسوس در ابعاد قطعهٔ تصویری نشده اما پس از آستانهٔ ۲۴۰، ابعاد قطعه تصویری با شیب بیشتری افزایش خواهد یافت. در این شکل، آستانهٔ ۲۴۱ بعنوان آستانهٔ مربوط به خاتمه پایداری قطعه حاوی لکهٔ برّاق شناسایی شده است. از این رو این نقطه بیشترین فاصله قائم را نسبت به خط واصل بین نقطه ابتدا و انتهای زوج‌مرتب‌های $(i.A_i)$ خواهد داشت. معادله خط گذرنده بین دو نقطه ابتدا و انتهای این نقاط از طریق رابطهٔ (۳) محاسبه شده و فاصله هر نقطه از خط مذکور نیز از رابطهٔ (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.

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

رابطه(۴)
$$d(i.A_{\boldsymbol{i}}) = \frac{\left|(I_{Max}+I_{Min})\times A_{\boldsymbol{i}}+2A_{(I_{Max}-I_{Min})/2}\times(\boldsymbol{i}-I_{Max})\right|}{\sqrt{4A^2_{(I_{Max}-I_{Min})/2}+(I_{Max}+I_{Min})^2}}$$

گام بعدی پس از شناسایی ماسک مربوط به لکهٔ برّاق، جداسازی نقاط سه‌بعدی و بردارهای نرمال سطح مربوط به لکهٔ برّاق از ابرنقاط سه‌بعدی تولید شده برای سطح محدب است. این اقدام به سادگی با نگاشت ابرنقاط سه‌بعدی به فضای تصویر از طریق معادلهٔ شرط هم‌خطی صورت می‌پذیرد. در این روند از پارامترهای

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

توجیه خارجی و کالیبراسیون داخلی دوربین ویدئویی (بدست آمده در روند تشریح شده در بخش‌های ۲-۳ و ۲-۴) استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که برای اینکار، یکبار محاسبهٔ موقعیت تصویری متناظر با هر نقطهٔ سه‌بعدی از ابرنقاط مربوط به سطح محدب کافی است. با این اقدام هر بار نقاط سه‌بعدی و بردارهای نرمال واقع در موقعیت لکهٔ برّاق صرفاً از طریق یک تحلیل مکانی ساده مبنی بر قرارگیری نقاط تصویری متناظر با ابرنقاط سه‌بعدی در ماسک دودویی لکهٔ برّاق به اجرا می‌رسد.

با فرض رخداد m نقطهٔ سه‌بعدی $[X_i.Y_i.Z_i].\ i=1.2.\dots.m$)، بردارهای نرمال سطح محدب $\vec{n_i}.i=1.2.\dots.m$) و درجه روشنی $(Gv_i\ .i=1.2.\dots.m)$ در محدودهٔ لکهٔ برّاق، به ازای هر نقطه سه‌بعدی یک بردار بین نقطهٔ سه‌بعدی و موقعیت مرکز تصویر در فضای شئ $([X_o.Y_o.Z_o]^T)$ بعنوان بردار راستای بازتاب $(\vec{r_i}\ .i=1.2.\dots.m)$ محاسبه می‌گردد (رابطه(۵)).

رابطه(۵)

$$\vec{r_i}=[X_i-X_o.Y_i-Y_o.Z_i-Z_o]^T.\ \ i=1.2.\dots.m$$

با معلوم بودن بردار نرمال سطح مربوط به هر نقطهٔ سه‌بعدی $(\vec{n_i})$، بردار راستای خورشید به ازای هر بردار راستای بازتاب $(\vec{r_i})$ از طریق رابطهٔ (۱) قابل محاسبه خواهد بود.

مطابق با توضیحات ذکر شده، در هر بار شناسایی لکهٔ برّاق از سطح محدب دسته‌ای از بردارهای راستای خورشید (به ازای تمامی نقاط سه‌بعدی واقع در لکه) محاسبه می‌شود. 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 میانگین‌گیری وزن‌دار، نماینده‌ای برای بردار راستای خورشید محاسبه می‌شود. وزن تخصیص یافته به هر بردار از راستای خورشید از طریق درجهٔ روشنی مربوط به هر بردار از راستای بازتاب (Gv_i) تعیین می‌شود. با نرمال‌سازی غیرخطی درجات روشنی واقع در لکهٔ برّاق در بازه *[0~1]* از این مقادیر بعنوان وزن در روند میانگین‌گیری وزنددار استفاده می‌شود. انتخاب نرمال‌سازی 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 رابطهٔ (۶) نحوهٔ نرمال‌سازی درجات روشنی و در رابطهٔ(۷) روند محاسبه بردار نمایندهٔ راستای خورشید از طریق میانگین‌گیری وزن‌دار ارائه شده است.

رابطه(۶)

$$w_i=\left(\frac{GV_i-min(GV)}{max(GV)-min(GV)}\right)^2.\ i=1.2.\dots.m$$

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 سیستم‌مختصات توپوسنتریک

راستای خورشید محاسبه شده در بخش (۵-۲) در سیستم‌مختصات تبیین شده برای ابرنقاط سه‌بعدی تعیین می‌گردد. بنا بر سازوکار بکارگرفته شده در مدل‌سازی سه‌بعدی سطح محدب، سیستم‌مختصات تبیین‌کنندهٔ ابرنقاط سه‌بعدی یک سیستم‌مختصات دلخواه بوده که صرفاً مقیاس آن از طریق فواصل معلوم در واحد *SI* تعیین شده است. هر بار نصب و راه‌اندازی سامانهٔ پیشنهادی رصد خورشید با بروز دوران‌های ناشناخته بین سیستم مختصات ابرنقاط سه‌بعدی نسبت به یک سیستم‌مختصات توپوسنتریک روبرو خواهد بود. ازآنجاکه زاویه ارتفاعی و آزیموت خورشید در یک سیستم مختصات توپوسنتریک تعیین می‌گردند؛ تعیین ارتباط بین سیستم مختصات ابرنقاط سه‌بعدی و سیستم مختصات توپوسنتریک به‌منظور تبدیل بردارهای بردار راستای خورشید به مرجع یک سیستم مختصات توپوسنتریک ضروری خواهد بود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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 سیستم‌مختصات 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 سیستم‌مختصات ابرنقاط سه‌بعدی با راستای محور Z در یک سیستم‌مختصات 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 صفحهٔ افق می‌گردد. در مرحله دوم نیز زاویه چرخش لازم حول محور Z به‌منظور تنظیم آزیموت 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[1]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 سیستم‌مختصات تصویر نشان می‌دهد.

تبدیل بردار سه‌بعدی نقطه پنهان شاقولی به مرجع سیستم‌مختصات شئ (ابرنقاط سه‌بعدی)، امتداد شاقولی را در سیستم‌مختصات ابرنقاط سه‌بعدی نشان 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 سیستم‌مختصات 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 نقطهٔ پنهان شاقولی در سیستم‌مختصات تصویر، راستای تبدیل یافته آن در فضای شئ (سیستم‌مختصات ابرنقاط سه‌بعدی) از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌شود. این بردار هم‌جهت با راستای مثبت و یا منفی از محور Z در سیستم‌مختصات توپوسنتریک در سیستم‌مختصات ابرنقاط سه‌بعدی خواهد بود.

رابطه(۸)

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

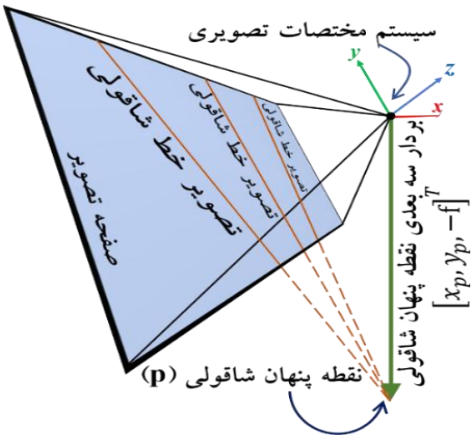
در رابطهٔ (۸)، ω، φ و κ زوایای چرخش محاسبه شده برای پارامترهای خارجی دوربین (رابطهٔ ۲) و R_X، R_Y و R_Z نیز به‌ترتیب ماتریس‌های دوران سه‌بعدی حول محورهای اول، دوم و سوم سیستم‌مختصات سه‌بعدی هستند.

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

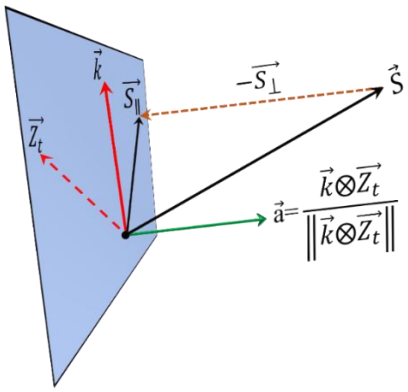
[1] *Vanishing Points*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]



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



شکل۹: ارتباط هندسی میان بردارهای $\vec{S}$، $\vec{Z_t}$ و $\vec{k}$

مطابق با شکل (۹)، هدف از ترازگذاری، تعیین مولفه‌های بردار $\vec{S}$ به مرجع سیستم مختصاتی بوده که در آن راستای $\vec{Z_t}$ بردار یکه در راستای محور سوم است. برای اینکار مطابق با رابطهٔ (۹) مولفه‌های بردار $\vec{S}$ به دو جز اثرپذیر $\vec{S_\parallel}$ و بی‌تاثیر $\vec{S_\perp}$ از این تبدیل تفکیک می‌گردد.

$$\vec{s} = \vec{S_\parallel} + \vec{S_\perp} \qquad \text{رابطه(۹)}$$

$\vec{S_\perp}$ در رابطه(۹)، از طریق رابطهٔ (۱۰) قابل محاسبه بوده که $\vec{a}$ در آن برداری یکه در راستای عمود بر بردارهای $\vec{Z_t}$ و $\vec{k}$ است (شکل(۹)).

$$\vec{S_\perp} = (\vec{S}\odot\vec{a})\times\vec{a} \qquad \text{رابطه(۱۰)}$$

در ادامه، تصویر بردار $\vec{S_\parallel}$ بر دو بردار $\vec{Z_t}$ و $\vec{Z_t}\otimes\vec{a}$ به‌ترتیب بعنوان مولفه‌های مختصاتی بردارهای پایه $\vec{k}$ و $\vec{k}\otimes\vec{a}$ تعیین شده و نسخه تبدیل یافته از $\vec{S_\parallel}$ تولید می‌گردد($\vec{\hat{S}_\parallel}$). مطابق با شکل (۹)، برای توصیف بردار $\vec{S_\parallel}$ در سیستم‌مختصاتی که $\vec{Z_t}$ در آن بعنوان بردار پایه محور سوم ($\vec{k}$) است؛ دو بردار پایه یکّه و متعامد در صفحهٔ آبی‌رنگ نیاز است. اولین بردار یکّه $\vec{Z_t}$ و دومین بردار یکّه و متعامد $\vec{Z_t}\otimes\vec{a}$ خواهد بود. طول تصویر $\vec{S_\parallel}$ بر دو بردار مذکور به ترتیب مولفه‌های مختصاتی برای بردارهای پایه $\vec{k}$ و $\vec{k}\otimes\vec{a}$ خواهند بود. با جایگذاری $\vec{\hat{S}_\parallel}$ در رابطهٔ (۹) نسخه ترازگذاری شده از بردار $\vec{S}$ با نماد $\vec{\hat{S}}$ مطابق با رابطهٔ (۱۱) تولید می‌گردد. محاسبهٔ زاویه ارتفاعی خورشید از طریق بردار $\vec{\hat{S}}$ به مرجع صفحه افق

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

خواهد بود.

در روابط (۱۰) و (۱۱)، $\odot$، $\otimes$ و × به‌ترتیب نمادهای ضرب داخلی، ضرب خارجی و ضرب سادهٔ اسکالر و بردار هستند. در رابطهٔ (۱۱) $\langle\overrightarrow{S_{\parallel}}\odot\overrightarrow{Z_t}\rangle \times \vec{k}$ و $\langle\overrightarrow{S_{\parallel}}\odot\langle\overrightarrow{Z_t}\otimes\vec{a}\rangle\rangle \times \langle\vec{k}\otimes\vec{a}\rangle$ به‌ترتیب تصویر بردار $\overrightarrow{\hat{S}_{\parallel}}$ بر بردارهای یکّه $\vec{k}$ و $\vec{k}\otimes\vec{a}$ در سیستم‌مختصاتی بوده که $\overrightarrow{Z_t}$ در آن معادل با $\vec{k}$ است.

به‌منظور دستیابی به بردارهای $\vec{\hat{S}}$ نیاز به بردار $\overrightarrow{Z_t}$ است. تعیین این بردار از طریق اخذ تصویر از چند امتداد شاقولی پس از استقرار نسبی دوربین و سطح محدب انجام می‌شود. بدیهی است که تعیین بردار $\overrightarrow{Z_t}$ 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.

$$\vec{\hat{S}} = \overrightarrow{\hat{S}_{\parallel}} + \overrightarrow{S_{\perp}} = \langle\overrightarrow{S_{\parallel}}\odot\overrightarrow{Z_t}\rangle \times \vec{k} + \langle\overrightarrow{S_{\parallel}}\odot\langle\overrightarrow{Z_t}\otimes\vec{a}\rangle\rangle \times \langle\vec{k}\otimes\vec{a}\rangle + \overrightarrow{S_{\perp}}$$ رابطه(۱۱)

شکل۱۰: نمونه تصویر اخذ شده از خطوط شاقولی به‌منظور تعیین راستای بردار $\overrightarrow{Z_t}$

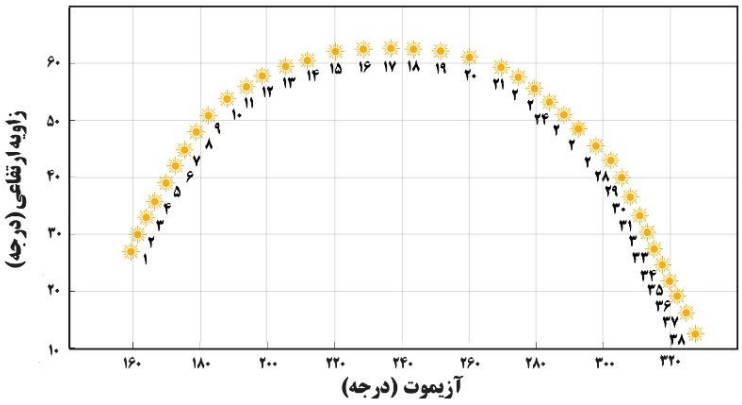
در این تحقیق، برآورد معادله خطوط شاقولی در فضای تصویر از طریق اندازه‌گیری دستی حداقل دو نقطه از هر خط در فضای تصویر و اعمال پارامترهای مرتبط با کالیبراسیون داخلی دوربین به‌منظور حذف اعوجاجات تصویری به اجرا رسیده است. بدیهی است که امکان توسعه راهکار خودکار در بازیابی خطوط شاقولی از طریق تبدیل هاف نیز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

۲-۶-۲- تنظیم آزیموت خورشید

پس از ترازگذاری بردارهای راستای خورشید، زاویه ارتفاعی محاسبه شده به مرجع صفحه افق خواهد بود. اما جهت‌گیری افقی بردارهای اصلاح شدهٔ خورشید کماکان نسبت به یک سیستم مختصات توپوسنتریک تعیین نشده‌اند. از آنجا که خورشید در لحظهٔ عبور از نصف‌النهار گذرنده از نقطهٔ استقرار دستگاه در بالاترین زاویهٔ ارتفاعی قرار دارد[۳۸]؛ در روند تنظیم آزیموت خورشید، اختلاف زاویه آزیموت محاسبه شده از طریق بردار $\vec{\hat{S}}$ نسبت به آزیموت صفر یا ۱۸۰ درجه (متناسب با فصل و عرض جغرافیایی) برای لحظهٔ عبور خورشید از نصف‌النهار گذرندهٔ از نقطه استقرار مبنای تنظیم آزیموت خورشید قرار خواهد داشت. برای این اقدام، رصد زاویهٔ ارتفاعی خورشید برای حداقل یک روز لازم است. شکل (۱۱) نمودار زاویهٔ ارتفاعی خورشید را نسبت به آزیموت محاسباتی (از طریق بردار $\vec{\hat{S}}$) به ازای ۳۸ مقطع در بازهٔ زمانی ۸:۱۵ صبح تا ۱۷:۳۰ عصر قبل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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

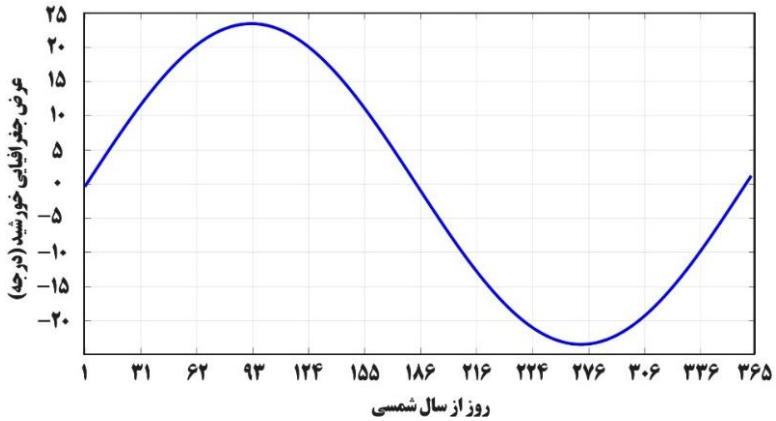


شکل ۱۱: نمودار آزیموت و زاویه ارتفاعی خورشید قبل از تنظیم جهت خورشید

به نقاط دوبعدی این نمودار یک سهمی برازش یافته و آزیموت محاسباتی در نقطه اکسترمم سهمی نمایش یافته است. آزیموت حقیقی خورشید در نقطه اکسترمم متناسب با عرض جغرافیایی و و فصل معادل با ۱۸۰ درجه است (متناسب با بازه تغییرات عرض جغرافیایی در ایران، آزیموت خورشید در هیچ موقعیتی در زمان اکسترمم معادل با صفر درجه نخواهد بود). از این رو اختلاف آزیموت محاسباتی و آزیموت حقیقی (۲۴۳٫۹۲۶ درجه در مثال شکل(۱۱)) بصورت یک مقدار زاویه‌ای ثابت همواره از زوایای آزیموت محاسباتی خورشید کسر خواهد شد. این مقدار ثابت نیز تا زمان 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 سیستم‌مختصات زمین‌مرکز) را در طول یکسال نشان می‌دهد[۱۱].



شکل۱۲:: تغییرات عرض جغرافیایی خورشید در طول سال[۱۱]

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

مطابق با شکل (۱۲)، اکسترمم زاویهٔ 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 زاویهٔ ارتفاعی لحظه‌ای خورشید در طول روز است[۳۹].

$$Elv = c_0 + c_1T + c_2T^2$$ رابطه(۱۲)

حداقل سه اندازه‌گیری زاویه ارتفاعی و زمان معادل آنها جهت برآورد ضرایب c_0، c_1 و c_2 در رابطهٔ (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 رابطهٔ (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 براورد 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 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 λ =۴۸/۳۳۶۴° و φ =۳۲/۴۸۳۵° 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

۳-۱- تعیین و پیش‌بینی ظهر شرعی

لحظهٔ 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 زاویهٔ ارتفاعی خورشید بصورت تابعی از زمان در بازهٔ 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.

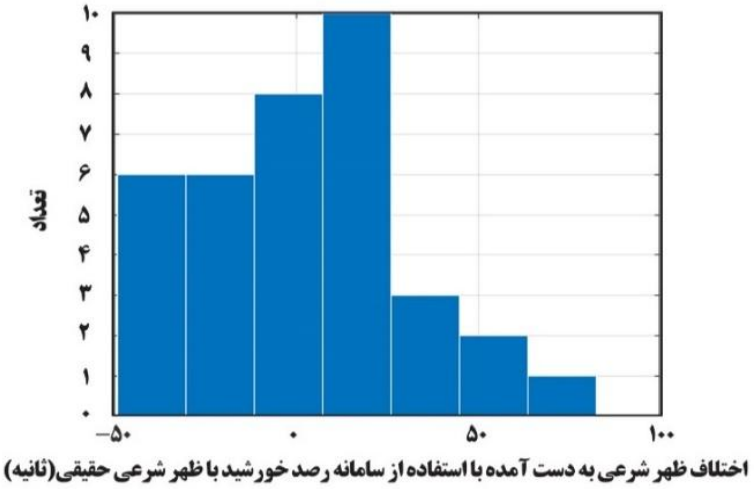
مطابق با نتایج مندرج در جدول (۳) اختلاف زمانی بین ظهر شرعی تعیین شده توسط سامانه و ظهر شرعی بطور متوسط ۰/۴۳۹۸ ثانیه با انحراف معیار ۲۹/۷۲۲۹ ثانیه بوده که این اختلافات در قالب هیستوگرام شکل(۱۳) ارائه شده‌اند.

جدول۳: مقایسه زمان ظهر شرعی محاسبه شده توسط سامانه رصد خورشید و تقویم شرعی محلی شهر اندیمشک

تاریخ	ظهرشرعی تقویم	ظهر شرعی سامانه	تاریخ	ظهرشرعی تقویم	ظهر شرعی سامانه
۲۱ بهمن ۱۴۰۲	۱۲:۳۰:۵۲	۱۲:۲۹:۳۰	۱۴ خرداد۱۴۰۳	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	۱۲:۱۸:۸
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 فروردین۱۴۰۳	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 تیر۱۴۰۳	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
۲۵اردیبهشت ۱۴۰۳	۱۲:۱۳:۰۱	۱۲:۱۳:۲۰	۱۹تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۲:۰۰	۱۲:۲۱:۵۱
۹ خرداد۱۴۰۳	۱۲:۱۴:۱۰	۱۲:۱۴:۱۱	۲۰تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۲:۰۹	۱۲:۲۲:۲۲
۱۰ خرداد۱۴۰۳	۱۲:۱۴:۱۸	۱۲:۱۴:۵۲	۲۱تیر۱۴۰۳	۱۲:۲۲:۱۷	۱۲:۲۲:۱۲
۱۱ خرداد ۱۴۰۳	۱۲:۱۴:۲۷	۱۲:۱۵:۱۳	۵ تیر ۱۴۰۳	۱۲:۲۳:۱۴	۱۲:۲۲:۲۷

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]



شکل ۱۳: هیستوگرام توزیع خطای تعیین ظهر شرعی

بررسی روزهای توام با خطای زیاد حاکی از ابرناک بودن آسمان در یک بازهٔ 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 رابطهٔ (۱۳) برحسب ساعت و بصورت اعشاری محاسبه شده است[۴۰].

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

به دلیل حرکت انتقالی زمین در یک مدار غیردایره‌ای و همچنین میل صفحه اکلپتیک[1]نسبت به استوا، اختلاف زمانی بین دو ظهر شرعی ۲۴ ساعت نیست[۴۱]. به‌عبارت بهتر، فاصله زمانی بین دو ظهر شرعی گاهی بیشتر و گاهی کمتر از ۲۴ ساعت بوده و این اختلاف با دقت در قالب معادلهٔ زمان[2]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 بازهٔ زمانی قبل از ظهر تعیین شده است. در این روند مطابق با روش تشریح شده در بخش (۷-۲) ضرایب سهمی و ماتریس کواریانس محاسبه شدهٔ 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 n_o، Δt 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 لحظهٔ 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.

[1] *Ecliptic plane*
[2] *Equation of Time*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

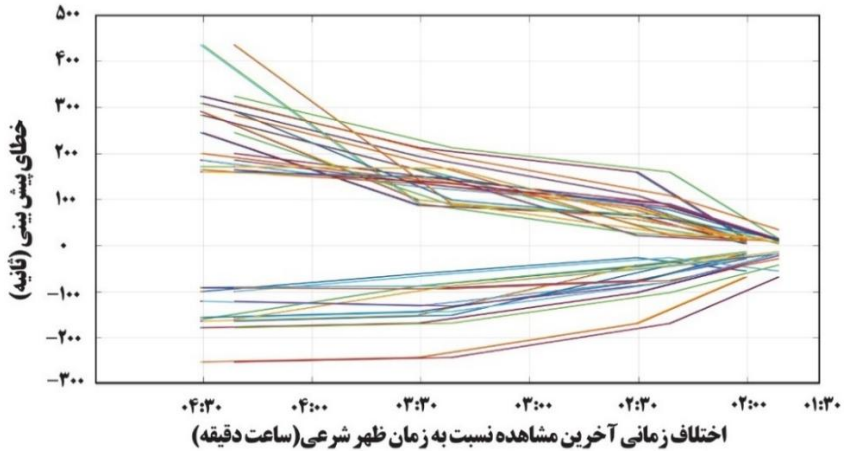
جدول۴: نتایج پیش‌بینی ظهر شرعی بر اساس بکارگیری رفتار زمانی خورشید در روز قبل

ردیف		تاریخ	n_o	Δt	Er	ردیف		تاریخ	n_o	Δt	Er
۱	روز مبنا	۱۴۰۲/۱۱/۲۳	۳۵	--	-۳۰"	۱۱	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۳/۳۰	۳۶	--	۳۷"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۲/۱۱/۲۴	۱	۴:۳۰:۵۲	۳۲۴"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۳/۳۱	۱	۴:۱۸:۲۰	۲۹۱"
			۵	۳:۳۰:۵۲	۲۱۲"				۵	۳:۱۸:۲۰	۹۹"
			۷	۲:۳۰:۵۲	۱۵۹"				۹	۲:۱۸:۲۰	۵۷"
			۱۱	۲:۰۰:۵۲	۱۵"				۱۱	۱:۴۸:۲۰	۱۴"
۲	روز مبنا	۱۴۰۲/۱۲/۰۲	۳۵	--	-۴۹"	۱۲	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۳/۳۱	۳۶	--	۲۸"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۲/۱۲/۰۳	۱	۴:۳۰:۱۲	-۹۰"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۰۱	۱	۴:۱۸:۳۳	-۹۱"
			۵	۳:۳۰:۱۲	-۸۷"				۵	۳:۱۸:۳۳	-۹۳"
			۹	۲:۳۰:۱۲	-۴۵"				۹	۲:۱۸:۳۳	-۷۵"
			۱۱	۲:۰۰:۱۲	-۱۷"				۱۱	۱:۴۸:۳۳	-۲۸"
۳	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۱/۰۸	۳۶	--	۱۳"	۱۳	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۴/۰۵	۳۶	--	۲۰"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۱/۰۹	۱	۴:۲۱:۳۵	۲۰۰"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۰۶	۱	۴:۱۹:۳۷	-۱۵۹"
			۵	۳:۲۱:۳۵	۱۴۲"				۵	۳:۱۹:۳۷	-۸۷"
			۹	۲:۲۱:۳۵	۹۰"				۹	۲:۱۹:۳۷	-۴۳"
			۱۱	۱:۵۱:۳۵	۱۳"				۱۱	۱:۴۹:۳۷	-۱۳"
۴	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۱/۰۹	۳۶	--	-۶"	۱۴	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۴/۰۶	۳۶	--	۸"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۱/۱۰	۱	۴:۲۱:۱۷	-۱۶۳"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۰۷	۱	۴:۱۹:۴۹	-۱۲۰"
			۵	۳:۲۱:۱۷	-۱۵۰"				۵	۳:۱۹:۴۹	-۱۳۰"
			۹	۲:۲۱:۱۷	-۴۲"				۹	۲:۱۹:۴۹	-۷۸"
			۱۱	۱:۵۱:۱۷	-۱۸"				۱۱	۱:۴۹:۴۹	-۲۱"
۵	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۱/۱۰	۳۶	--	۱۹"	۱۵	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۴/۰۹	۳۶	--	۲۷"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۱/۱۱	۱	۴:۲۰:۵۹	۳۰۹"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۱۰	۱	۴:۲۰:۲۸	-۱۷۷"
			۵	۳:۲۰:۵۹	۱۹۳"				۵	۳:۲۰:۲۸	-۱۶۷"
			۹	۲:۲۰:۵۹	۱۰۸"				۹	۲:۲۰:۲۸	-۱۰۱"
			۱۱	۱:۵۰:۵۹	۳۴"				۱۱	۱:۵۰:۲۸	-۴۱"
۶	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۱/۱۱	۳۶	--	۶"	۱۶	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۴/۱۰	۳۶	--	۱۳"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۱/۱۲	۱	۲:۲۰:۴۱	۴۳۶"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۱۱	۱	۴:۲۰:۴۰	-۱۵۵"
			۵	۳:۲۰:۴۱	۹۱"				۵	۳:۲۰:۴۰	-۱۴۲"
			۹	۲:۲۰:۴۱	۸۹"				۹	۲:۲۰:۴۰	-۷۸"
			۱۱	۱:۵۰:۴۱	۱۴"				۱۱	۱:۵۰:۴۰	-۱۶"
۷	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۱/۲۵	۳۶	--	-۴۱"	۱۷	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۴/۱۳	۳۶	--	۲۳"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۱/۲۶	۱	۴:۱۶:۵۰	۱۸۵"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۱۴	۱	۴:۲۱:۱۲	۱۶۴"
			۵	۳:۱۶:۵۰	۱۲۷"				۵	۳:۲۱:۱۲	۱۳۴"
			۹	۲:۱۶:۵۰	۸۹"				۹	۲:۲۱:۱۲	۸۳"
			۱۱	۱:۴۶:۵۰	۱۴"				۱۱	۱:۵۱:۱۲	۱۲"
۸	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۳/۰۹	۳۶	--	۱"	۱۸	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۴/۱۴	۳۶	--	-۱۴"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۳/۱۰	۱	۴:۱۴:۱۸	۲۴۵"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۱۵	۱	۴:۲۱:۲۳	۱۶۰"
			۵	۳:۱۴:۱۸	۸۷"				۵	۳:۲۱:۲۳	۱۴۷"
			۹	۲:۱۴:۱۸	۶۵"				۹	۲:۲۱:۲۳	۷۷"
			۱۱	۱:۴۴:۱۸	۴"				۱۱	۱:۲۱:۲۳	۱۰"
۹	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۳/۱۰	۳۶	--	-۳۴"	۱۹	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۴/۱۹	۳۶	--	۱۰"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۳/۱۱	۱	۴:۱۴:۲۷	-۹۹"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۲۰	۱	۴:۲۲:۰۹	۲۸۳"
			۵	۳:۱۴:۲۷	-۶۰"				۵	۳:۲۲:۰۹	۱۶۳"
			۹	۲:۱۴:۲۷	-۲۵"				۹	۲:۲۲:۰۹	۲۱"
			۱۱	۱:۴۴:۲۷	-۵۴"				۱۱	۱:۵۲:۰۹	۹"
۱۰	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۳/۱۴	۳۶	--	-۲۳"	۲۰	روز مبنا	۱۴۰۳/۰۴/۲۰	۳۶	--	-۱۳"
	روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۳/۱۵	۱	۴:۱۵:۰۷	-۲۵۲"		روز پیش‌بینی	۱۴۰۳/۰۴/۲۱	۱	۴:۲۲:۱۷	۱۷۱"
			۵	۳:۱۵:۰۷	-۲۴۲"				۵	۳:۲۲:۱۷	۱۶۷"
			۹	۲:۱۵:۰۷	-۱۶۸"				۹	۲:۲۲:۱۷	۴۴"
			۱۱	۱:۴۵:۰۷	-۶۷"				۱۱	۱:۵۲:۱۷	۷"

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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



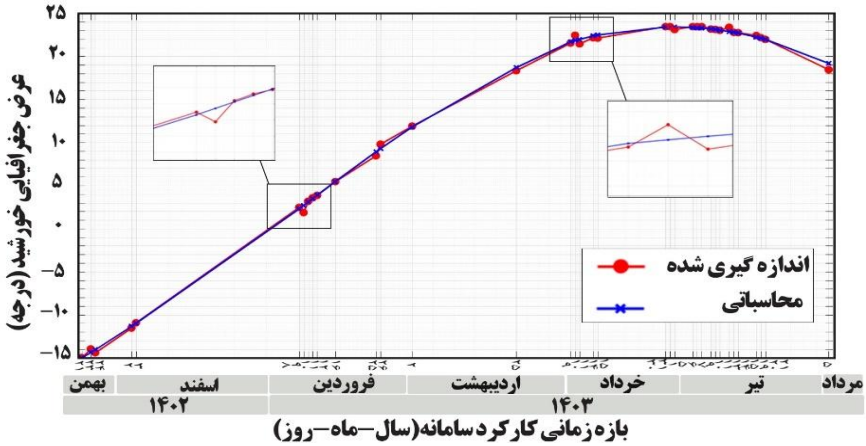
شکل۱۴: خطای پیش‌بینی زمان رخداد اکسترمم زاویه ارتفاعی خورشید نسبت به فاصله زمانی آخرین مشاهدات صبحگاهی تا ظهر

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 لحظهٔ عبور از نصف‌النهار محل استقرار سامانه (Elv_n)، عرض جغرافیای خورشید برحسب درجه از طریق رابطه(۱۴) قابل محاسبه است[۱۱].

$$\delta_s^\circ = Elv_n^\circ + \varphi^\circ - 90^\circ \qquad \text{رابطه(۱۴)}$$

نمودار شکل (۱۵) روند محاسباتی عرض جغرافیایی خورشید (رنگ آبی) و مقادیر اندازه‌گیری شده آن (رنگ قرمز) را در بازهٔ زمانی کارکرد سامانه رصد خورشید نشان می‌دهد.



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

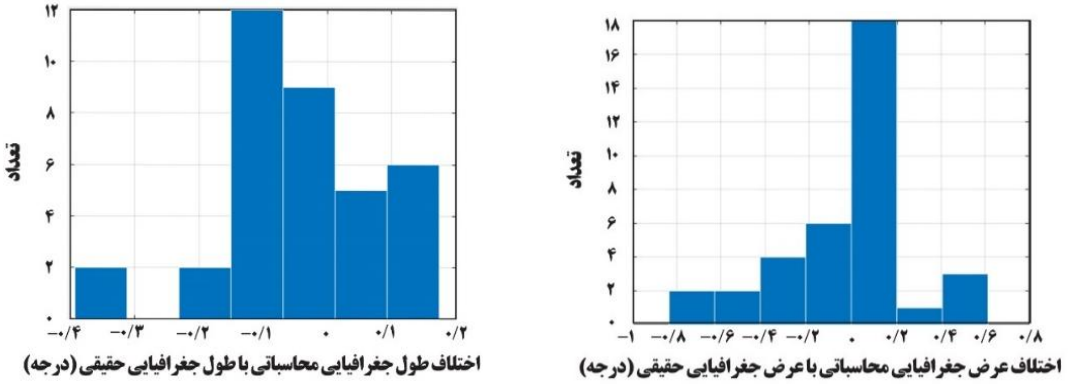
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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 رابطهٔ (۱۴)، در صورت معلوم بودن عرض جغرافیایی خورشید در تاریخ مشاهده، امکان محاسبه عرض جغرافیایی محل استقرار دستگاه وجود دارد. از سوی دیگر، در رابطهٔ (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 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.

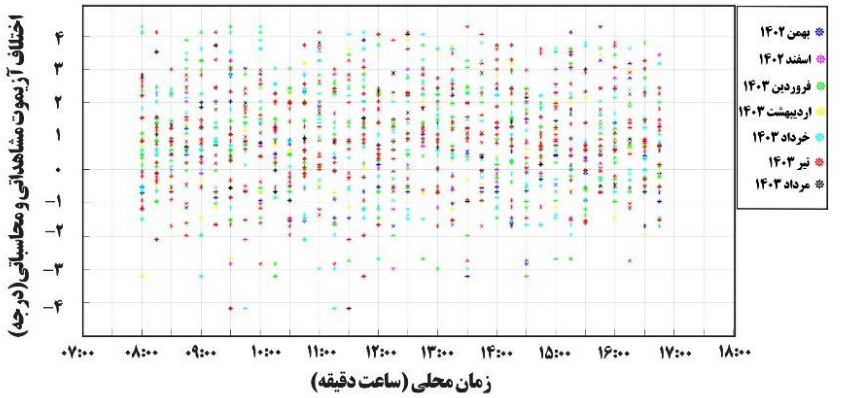


شکل۱۶: هیستوگرام بردار خطا در تعیین موقعیت جغرافیایی به کمک سامانه رصد خورشید

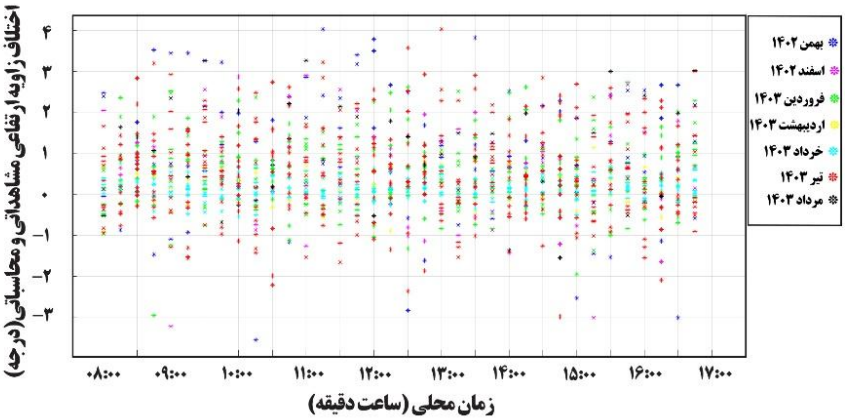
۳-۴- مقایسه خط سیر محاسباتی و مشاهداتی خورشید در طول روز

خط سیر خورشید از طریق توابع زمانی آزیموت و زاویه ارتفاعی آن قابل نمایش است. در آخرین ارزیابی از عملکرد سامانه توسعه یافته به‌منظور رصد خورشید، مسیر مشاهداتی خورشید در هر روز با مسیر محاسباتی آن مقایسه و اختلافات آماری آنها در قالب نمودارهای شکل (۱۷) ترسیم شده است. آزیموت 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]



(الف)



(ب)

شکل۱۷: اختلاف خط سیر محاسباتی و مشاهداتی خورشید، (الف): اختلاف آزیموت مشاهداتی و محاسباتی برحسب درجه، (ب): اختلاف زاویه ارتفاعی مشاهداتی و محاسباتی برحسب درجه

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 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 محدودهٔ 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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 توسعه‌یافته 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 رنگ‌آمیزی آن با رنگ‌های تیره موجب برهم‌خوردن 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 برّاق خورشید در سطح محدب، ثبات و ضخامت خطوط شاقولی مورد استفاده در مرحله ترازگذاری و دقت مدل‌سازی سه‌بعدی سطح محدب اشاره داشت.

ابعاد لکه برّاق 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 برّاق وسیع می‌تواند بازیابی راستای بازتاب و به تبع آن راستای خورشید را با عدم قطعیت بیشتری روبرو سازد. شعاع انحناء و میزان برّاق بودن رنگ سطح محدب نیز از عوامل اثرگذار در وسعت لکه برّاق 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 ۰/۵۳ 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 کمّیات 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 نقطهٔ پنهان شاقولی (شکل ۸) هستند. افزایش تعداد خطوط شاقولی به‌منظور ایجاد افزونگی در شناسایی نقطهٔ 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]
[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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 نمود. از دیگر نتایج کسب شده در این تحقیق می‌توان به اختلافات زاویه‌ای در محدودهٔ 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 برازش 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.

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)90155-290155-2*

[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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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. Kudrys, "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-Gonzálvez, "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)90003-890003-8

[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)00005-100005-1

[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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.12, No.3, Autumn 2024

Research Paper

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 photovoltaeic 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 desgin of a field calibration solution to find the conversion of the measurments 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.*

Correspondence Address*: Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.*
Tel*: : +989123258852*
Email : *safdarinezhad@tafreshu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-07]

[DOI: 10.61186/jgit.12.3.105]