

طراحی و ساخت سامانه بومی تابش سنج خورشیدی جهت تصحیح اتمسفری تصاویر ماهواره‌ای

امید چوپانیان^{۱*}، عباس بشیری^۲، حمیدرضا خدادادی^۳، حسن حسنی مقدم^۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۳

صفحات: ۴۴ تا ۵۶

چکیده

اعمال تصحیحات اتمسفری به منظور کاهش اثرات مخرب اتمسفری بر کیفیت و صحت داده‌های ثبت شده، نیازمند دانش جامعی از شرایط، ویژگی‌ها و رفتار اتمسفر به هنگام گذر سنجنده در مختصات هدف است. امروزه تجهیزات، مدل‌ها و الگوریتم‌های بسیاری جهت مطالعه و بررسی مؤلفه‌های اتمسفری استفاده می‌شود. بدین منظور در این تحقیق به طراحی و ساخت سامانه بومی تابش سنج خورشیدی جهت محاسبه عمق اپتیکی هواویزها اقدام گردید. به منظور شبیه‌سازی و بررسی اثرات ناشی از تغییرات هر مؤلفه اتمسفری از مدل MODTRAN در محیط PCModWin استفاده شد. در این سامانه الکترواپتیکی در دو طول موج ۴۵۰ و ۵۵۰ نانومتر، به دلیل محدوده جذبی هواویزها، در دو روز متفاوت از نظر میزان آلاینده موجود در اتمسفر، داده‌های شدتی ثبت گردید. به منظور اطمینان از یکنواختی و خطی بودن پاسخ‌دهی سامانه الکترواپتیکی طراحی شده در اندازه‌گیری تغییرات شدت نور خورشید، به کالیبراسیون رادیومتریک این سامانه اقدام گردید. با استفاده از مدل‌های اتمسفری، از داده‌های شدتی ثبت شده، عمق اپتیکی هواویز و میزان نمایانی افقی اتمسفر محاسبه شد. به منظور صحت سنجی و ارزیابی عملکرد سامانه طراحی شده، از داده‌های عمق اپتیکی به دست آمده از سنجنده MODIS(Aqua) و داده‌های نمایانی افقی ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران استفاده گردید. نتایج ارزیابی صحت، نشان داد که محاسبه عمق اپتیکی توسط سامانه طراحی شده و سنجنده MODIS(Aqua) هر دو در ساعت گذر ماهواره عدد ۰.۵ را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان‌دهنده همبستگی خوب نمایانی افقی محاسبه شده در این تحقیق با داده‌های به دست آمده از ایستگاه هواشناسی مرجع می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای، تصحیح اتمسفری، تابش سنج خورشیدی، کالیبراسیون آزمایشگاهی، عمق اپتیکی هواویز

Omid.choupanian@iran.ir

۱- کارشناس ارشد فیزیک، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

Kpbashiri@ihu.ac.ir

۲- مربی گروه الکترونیک، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

hrkhodadadi@yahoo.com

۳- استادیار گروه الکترونیک، دانشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

h.h.moghaddam@iran.ir

۴- کارشناس ارشد سنجش از دور دانشگاه خوارزمی تهران

۱- مقدمه

داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی و ابرطیفی که در سال‌های اخیر به صورت مستمر در حوزه‌های مختلف راهبردی و استراتژیک مورد استفاده قرار می‌گیرند، به صورت کلی مجموعه‌ای از شدت‌های ثبت شده توسط سنجنده در بازه‌های مختلف امواج الکترومغناطیس هستند که با توجه به امضای طیفی^۱ هر عارضه، امکان شناسایی و پایش عوارض گوناگون را فراهم می‌آورند (www.modis.gsf, ۲۰۱۸). در این میان توجه به حضور اتمسفر که رفتارهای متفاوتی در جذب، عبور و پراکندگی امواج الکترومغناطیسی در طول موج‌های مختلف از خود نشان می‌دهد، بسیار حائز اهمیت است؛ این تفاوت رفتار اتمسفری به صورت خاص در بحث داده‌های ماهواره‌ای سبب از بین رفتن جزئیات و کاهش تباین اشیاء و عوارض در تصاویر می‌شود. بر اساس گزارش‌های موجود، در طول موج ۸۵۰ نانومتر در حدود ۸۰ درصد انرژی الکترومغناطیسی بازتابی از سطح زمین و در طول موج ۴۵۰ نانومتر، ۵۰ درصد این انرژی بازتابی به سنجنده واقع در مدار زمین می‌رسند (Ronald et al, ۲۰۱۸).

به منظور استفاده و بهره‌برداری صحیح از تصاویر ماهواره‌ای بایستی سهم اثرات مخرب اتمسفری را در شدت تابش رسیده به سنجنده از عوارض مختلف در هر طول موج لحاظ نمود. این فرآیند که با نام تصحیح اتمسفری^۲ شناخته می‌شود، امکان استخراج میزان دقیق بازتاب به ازای طول موج‌های مختلف و به دنبال آن شناسایی و تفکیک صحیح عوارض را فراهم می‌آورد (Peng et al, ۲۰۱۶). نکته قابل توجه در این فرآیند، وابستگی میزان جذب، عبور و پراکندگی امواج به ترکیبات اتمسفری در لحظه برداشت تصویر است. اعمال این فرآیند به صورت پیش فرض بر اساس

اندازه‌گیری تابش عوارض مختلف به ازای هر طول موج در سطح زمین و مقایسه و بهنجارسازی آن با داده‌های ماهواره‌ای حاصله است (Baugh et al, ۲۰۰۸)؛ به دلیل پیچیدگی، هزینه بالا و زمان بردن و به نوعی عدم امکان اندازه‌گیری پیش فرض‌های مورد نیاز این فرآیند در هر مختصات جغرافیایی و در هر گذر ماهواره و از همه مهم‌تر احتمال بروز خطاهای ساختاری و محاسباتی، طراحان و بهره‌برداران سامانه‌های تصویربرداری فضایی با بررسی رفتار اتمسفر و چگونگی تأثیر آن در تابندگی^۳ رسیده به سنجنده، به ایجاد و استفاده از مدل‌ها و الگوریتم‌هایی در این موضوع اقدام نموده‌اند. وجود تعداد زیاد مؤلفه‌های تأثیرگذار در عبور امواج الکترومغناطیسی از اتمسفر و پیچیدگی روابط بین آن‌ها باعث شده تا نسخه‌های متعددی از مدل‌ها و الگوریتم‌های تصحیح اتمسفری توسط محققان ارائه گردد؛ که HITRAN، MODTRAN و برخی از مهم‌ترین الگوریتم‌های تصحیح خطای اتمسفری هستند (Gao et al, ۲۰۰۶ & Vibhute et al, ۲۰۱۵). نکته مهم در استفاده از این مدل‌ها و الگوریتم‌ها، استفاده از داده‌های میدانی به منظور تعیین شرایط و وضعیت مؤلفه‌های مؤثر اتمسفری به هنگام گذر از مختصات مشخص (مناطق مورد توجه و استراتژیک که در تعاریف مأموریت‌های سامانه‌های تصویربرداری فضایی آمده است) در راستای دستیابی به اطلاعات معتبر و جامع در زمینه تصحیح اتمسفری است. به طور کلی سهم اثرات اتمسفری در تصاویر ماهواره‌ای غالباً ناشی از وجود بخار آب، هواپیزها^۴ و مولکول‌های گاز (ازن، کربن دی‌اکسید، اکسیژن، نیتروژن و...) در اتمسفر است. به همین دلیل، مهم‌ترین عواملی که به عنوان ورودی این مدل‌ها و الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل منحنی دما، فشار و

^۳ Radiance^۴ Aerosol^۱ Signature spectrum^۲ Atmospheric correction

در سراسر دنیا راه‌اندازی شده‌اند. به‌عنوان نمونه شکل (۱)، نقشه پراکندگی ایستگاه‌های گسترده‌ترین شبکه بین‌المللی داده‌سنجی به‌وسیله تابش‌سنج خورشیدی با نام AERONET را نمایش می‌دهد:



شکل ۱- نقشه پراکندگی ایستگاه‌های شبکه تابش‌سنجی

AERONET (www.aeronet.gsfc.nasa.gov)

مزایا و معایبی برای هر یک از روش‌های لیدار و تابش‌سنجی بر اساس مقایسه مواردی همچون نوع کاربرد و تحلیل داده، هزینه‌های ساخت و نگهداری و امکان و سهولت جابجایی ذکر شده است؛ در برخی مطالعات نیز به‌منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری‌ها، استفاده از داده‌های هر دو روش به‌صورت هم‌زمان گزارش شده است (Chen et al, ۲۰۱۶). در این تحقیق با توجه به نوع کاربرد و امکانات به طراحی، پیاده‌سازی و داده‌سنجی به‌وسیله تابش‌سنج خورشیدی اقدام گردیده است.

چین و همکاران (۲۰۱۹)، اقدام به استخراج عمق اپتیکی مناطق شهری در شرایط زمستان با استفاده از داده‌های مودیس ۵۰۰ متری نموده‌اند. در این تحقیق، روشی جهت بهبود استخراج عمق اپتیکی با استفاده از ترکیب داده‌های حاصل از مودیس و داده‌های تابش‌سنج خورشیدی زمینی ارائه شده است. روش ارائه شده در این تحقیق قادر به شناسایی عمق اپتیکی حتی در شرایط سنگین و متراکم اتمسفر می‌باشد. نتایج تحقیق نشان‌دهنده همبستگی اطلاعات خروجی روش پیشنهادی با داده‌های مودیس و زمینی به ترتیب ۰.۸۷ و ۰.۸۹ و خطای ۰.۱۱ و ۰.۱۵ RMSE است. سوچیساک و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی بازتاب

چگالی حجمی تعداد مولکول‌های گاز برحسب ارتفاع و میزان هواویز، بخار آب، ازن و نرخ ترکیب کربن‌دی‌اکسید در اتمسفر است. سه مؤلفه دما، فشار و چگالی معمولاً توسط مدل‌های ثابتی برای هر اقلیم تعیین می‌شوند که به‌عنوان نمونه می‌توان مدل استاندارد اتمسفری ۱۹۷۶ را نام برد (Manual, ۲۰۱۴). به‌منظور افزایش دقت در فرآیند تصحیح اتمسفری از داده ایستگاه‌های هواشناسی محلی که عمدتاً توسط رادیوسوند^۵ حاصل می‌شوند، نیز استفاده می‌شود. اما چهار مؤلفه هواویز، بخار آب، ازن و ترکیب کربن‌دی‌اکسید به‌منظور دستیابی به داده‌ها و نتایج معتبری از فرآیند تصحیح اتمسفری می‌بایست به‌صورت دقیق اندازه‌گیری و تعیین شوند.

دو روش متداول زمین پایه فعال و غیرفعال برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های تصحیح اتمسفری به ترتیب سامانه لیداری^۶ و سامانه تابش‌سنج خورشیدی نام دارند. سامانه لیداری، با گسیل پالس‌های لیزری و دریافت نور پس‌پراکنده شده توسط گازها و ذرات موجود اتمسفری در آن طول موج خاص به‌وسیله یک تلسکوپ، قادر است مشخصات فیزیکی مؤلفه‌های مذکور در یک ستون اتمسفری (محدود) را برحسب تابعی از ارتفاع با توان تفکیک بهتر از چند متر اندازه‌گیری نماید (Weitkamp et al, ۲۰۰۶). سامانه تابش‌سنج خورشیدی نیز، با اندازه‌گیری میزان تابش خورشید در طول موج‌های معین، ویژگی‌های فیزیکی مؤلفه‌های اتمسفری را به‌صورت انتگرال ستونی مشخص می‌نماید؛ در مقایسه با لیدار، این سامانه توانایی تعیین و بازیابی مقادیر اندازه‌گیری شده برحسب ارتفاع را ندارد. از آنجایی که داده‌های اتمسفری محدود به ناحیه اندازه‌گیری است، شبکه‌هایی از انواع لیدار و تابش‌سنج خورشیدی با مأموریت‌های مختلف همچون کالیبراسیون و تصحیح تصاویر سنجنده‌های فضایی و مطالعات اقلیمی و زیست‌محیطی

^۵ Radiosonde

^۶ LiDAR

تحقیق، ۲.۴ نانومتر عرض باند طیفی برای فیلتر ماورای بنفش به منظور متعادل‌سازی نویز و اندازه‌گیری ازن پیشنهاد شده است. بروکس و همکاران (۲۰۰۷)، یک طیف‌سنج خورشیدی ناحیه مادون قرمز نزدیک ارزان را به منظور محاسبه بخار آب اتمسفر پیشنهاد داده‌اند. این دستگاه نور خورشید را با استفاده از یک فتودیود در طول موج ۹۴۰ نانومتری و با استفاده از نور LED در ۸۲۵ نانومتری از باند جذبی بخار آب تشخیص داد. به منظور بهبود عملکرد دستگاه، پیشنهاد گردید که نسبتی از بین این دو آشکارساز انتخاب شود. موندل و همکاران (۲۰۱۴)، اقدام به ساخت تابش سنج خورشیدی دوکاناله به منظور اندازه‌گیری عمق اپتیکی هواویزها نموده‌اند. به منظور ارزیابی نتایج این دستگاه، از داده‌های MODIS، و به مدت ۱۵ روز استفاده گردیده است. نتایج نشانگر همبستگی بالای نتایج دستگاه طراحی شده با داده‌های به دست آمده از MODIS، می‌باشد.

در این تحقیق، علاوه بر بیان ضرورت انجام فرآیند تصحیح اتمسفری تصاویر ماهواره‌های سنجشی، مؤلفه‌های مؤثر در تصحیح اتمسفری و روش‌های اندازه‌گیری آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه فرآیند طراحی و پیاده‌سازی دستگاه تابش سنج خورشیدی^۷ بر اساس ارزیابی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته و با توجه به امکانات موجود معرفی شده است. در مرحله بعدی، مشخصات سامانه تصویربرداری طراحی شده، مراحل کالیبراسیون و راه‌اندازی سکوی ردیاب خورشیدی شرح داده شده و در پایان نیز اندازه‌گیری و نتایج حاصل از داده سنجی به وسیله این سامانه ارائه شده است.

۲- طراحی و اجرای سامانه تابش سنج خورشیدی

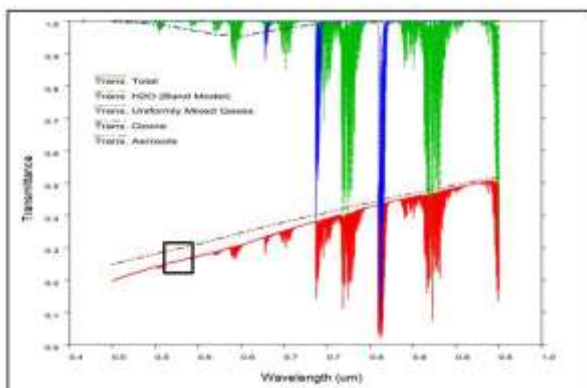
با توجه به مؤلفه‌های مؤثر معرفی شده در بحث تصحیح اتمسفری، طراحی و اجرای تابش سنج خورشیدی بر پایه اندازه‌گیری عمق اپتیکی هواویز، به عنوان مهم‌ترین مؤلفه

سطحی شبیه‌سازی هوایی MASTER، با استفاده از داده‌های AERONET اقدام نموده‌اند. نتایج تحقیق نشانگر عملکرد مطلوب شبیه‌ساز هوایی MASTER، در اندازه‌گیری بازتاب‌های سطحی می‌باشد. کلوریس و همکاران (۲۰۱۵)، اقدام به ارزیابی محصولات تولید شده از تصاویر لندست ۵ و لندست ۷ با استفاده از داده‌های شبکه AERONET و الگوریتم ۶S نموده‌اند. به منظور ارزیابی داده‌های لندست، ۴۰۰۰ صحنه منحصر به فرد از تصاویر جهانی لندست بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ انتخاب گردید. به منظور تصحیح اثر زاویه خورشیدی تصاویر لندست، از روش BRDF مستخرج از داده‌های مودیس استفاده گردید و همچنین به منظور تصحیح پاسخ طیفی، از روش آموزش شبکه عصبی مصنوعی و PROSAL، استفاده گردید. نتایج تحقیق نشانگر کارایی بالای روش‌های پیشنهاد شده به منظور بهبود پاسخ طیفی داده‌های لندست می‌باشد. پاسیفیسی (۲۰۱۶)، محصولات بازتاب سطحی Digital Globe را با داده‌های به دست آمده از MODIS و AERONET ارزیابی نموده است. نتایج تحقیق نشانگر عملکرد بهتر روش‌های AERONET و MODIS در تصحیح اثرات آتروسلفا و بخار آب می‌باشد. لیو و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از داده‌های AERONET و کد MODTRAN روشی برای کالیبراسیون رادیومتریک لندست ۸ ارائه نموده‌اند. نتایج ارزیابی‌ها نشانگر عملکرد مطلوب روش پیشنهادی در بهبود کالیبراسیون داده‌های لندست ۸ می‌باشد.

ولز، (۱۹۴۷)، اقدام به طراحی و ساخت یک نمونه تابش سنج خورشیدی برای اندازه‌گیری ضریب تضعیف هواویزها در طول موج‌های ۴۴۰ و ۱۶۰۰ نانومتر نموده است. نتایج این تحقیق نشانگر عملکرد بالای تابش سنج طراحی شده در اندازه‌گیری ویژگی‌های هواویزها بوده است. موریز و همکاران (۲۰۰۱)، روند نمایی از مراحل طراحی، اجرا و کالیبراسیون نمایشگر ازن و تابش سنج خورشیدی ۵ کاناله قابل حمل را شرح داده است. در این

^۷ Sun-photometer

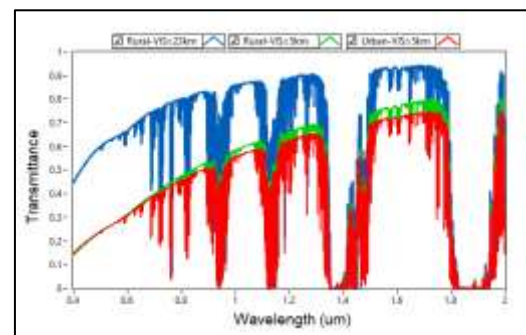
در بالا برحسب طول موج (در بازه ۰.۴ تا ۰.۹ میکرون) به تفکیک هر مؤلفه برای مدل شهری با نمایانی ۵ کیلومتر را نشان می‌دهد. در این نمودار، خط چین قرمز رنگ محدودکننده میزان عبور کل در شرایط تعریف شده منطقه و مربوط به سهم هواویز در کاهش میزان عبوری اتمسفر است. به صورت نوعی در طول موج ۵۵۰ نانومتر، سهم هواویز در کاهش میزان عبور اتمسفر بیش از ۹۰ درصد است که در باکس داخل شکل نشان داده شده است، فاصله بین خط هواویز و مجموع عبور دهی کمتر از ۱۰ درصد اختلاف دارند و این نشان از کاهش میزان عبور اتمسفر به دلیل سهم هواویز است.



شکل ۳ - نمودار میزان عبور اتمسفری برحسب طول موج در مؤلفه‌های مؤثر

در این تحقیق کانال ۵۵۰ نانومتر (به دلیل جذب بالای هواویزها) به عنوان مهم‌ترین مؤلفه اتمسفری در اندازه‌گیری تصحیحات اتمسفری انتخاب شده است. علت انتخاب این کانال برای اندازه‌گیری هواویز، علاوه بر کمینه بودن سهم اثرات مولکولی، بخار آب، ازن و ترکیبات گازی در این طول موج، استفاده مستقیم داده‌های حاصل از کانال ۵۵۰ نانومتری در مدل‌ها و الگوریتم‌های اتمسفری مورد بحث است. در گام بعد با توجه به امکانات موجود، تجهیزات مورد نیاز به منظور راه‌اندازی یک سامانه تصویربرداری خورشیدی در طول موج ۵۵۰ نانومتر جمع‌آوری گردید. این تجهیزات شامل سنجنده تصویربرداری سیلیکونی، فیلترهای شدتی

در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب که ابتدا با شبیه‌سازی میزان عبور اتمسفر برحسب طول موج با استفاده از مدل MODTRAN در محیط PcModWin و تغییر مؤلفه‌های بخار آب، ازن، کربن‌دی‌اکسید و مدل هواویز، تغییرات و اثرات هر یک از مؤلفه‌های مذکور بررسی شده است. شکل (۲)، نتایج تغییرات ضریب عبور اتمسفر برحسب طول موج (در بازه ۰.۴ تا ۲ میکرون) به ازای مدل اتمسفری استاندارد ۱۹۷۶ را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل، مقادیر بخار آب، ازن و کربن‌دی‌اکسید پیش فرض نرم‌افزار و زاویه دید عمودی مشاهده‌گر با ارتفاع ۱۰۰ کیلومتری نسبت به سطح زمین، در مدل‌های هواویز روستایی با نمایانی^۸ ۵ و ۲۳ کیلومتر و مدل هواویز شهری با نمایانی ۵ کیلومتر را نشان می‌دهد.



شکل ۲ - نمودارهای میزان عبور اتمسفری برحسب طول موج در مدل‌های هواویز شهری و روستایی با نمایانی ۵ و ۲۳ کیلومتر در مدل MODTRAN، نمایانی افقی به عنوان تابعی از میزان هواویز در محاسبات اتمسفری اعمال می‌شود. نتایج داده‌های حاصل از تصویربرداری از مناطق شهری حاکی از کاهش چشمگیر ضریب عبور اتمسفر در ناحیه مرئی است. به منظور بررسی بیشتر این موضوع و اثبات فرضیه تعیین هواویز به عنوان مؤثرترین مؤلفه در کاهش میزان عبور در این مناطق و رد احتمال سهم مؤثر ترکیبات گازی در این تضعیف، نمودار دیگری به تفکیک مؤلفه‌های مؤثر برای مدل هواویز شهری ترسیم گشته است. شکل (۳)، نمودار میزان عبور در شرایط ذکر شده

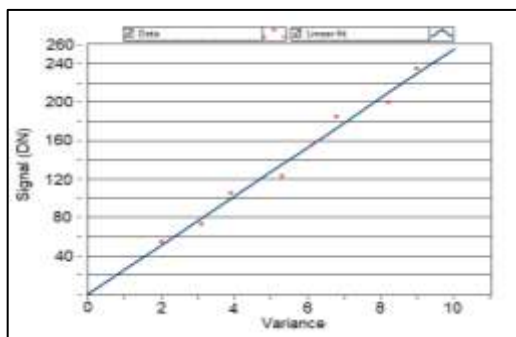
^۸ Visibility

الکترواپتیک در مقابل یک منبع نور یکنواخت و ثبت تصویر در مقادیر تابندگی مختلف، رفتار و پاسخ‌دهی آن مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴)، نمایی از این آزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - نمایی از چیدمان کالیبراسیون رادیومتریک سامانه تصویربرداری

در این فرآیند، بعد از ثبت تصویر در مقادیر تابندگی مختلف، با حذف پیکسل‌های بد، جریان تاریک، فریم بایاس و اثر میدان تخت از تصویر، در نموداری واریانس شدت‌های ثبت‌شده در ناحیه مرکزی تصویر با اندازه ۴۰۰۰ پیکسل برحسب شدت (عدد دیجیتالی) رسم شد. شکل (۵)، نمودار سیگنال-واریانس حاصل از آزمون سامانه الکترواپتیک مذکور را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، نتایج به‌دست‌آمده یکنواختی پاسخ‌دهی سنجنده و صحت عملکرد این سامانه را در اندازه‌گیری شدت نور تأیید می‌کند.



شکل ۵ - نمودار سیگنال برحسب واریانس

در ادامه به منظور طراحی و برنامه‌نویسی سکوی ردیابی خورشید از روش زیر استفاده گردید:

و میان‌گذر، لنز تصویربرداری، ماژول GPS و سکوی ردیاب خورشیدی است.

مشخصات دوربین، لنز و فیلترهای مورد استفاده در فرآیند اندازه‌گیری در جدول (۱)، نشان داده شده است.

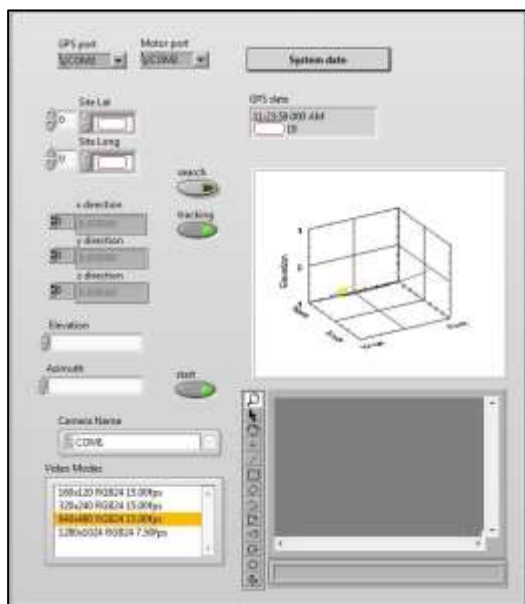
جدول ۱ - مشخصات سامانه تصویربرداری

نوع آشکارساز	CMOS Sensor
اندازه آشکارساز	۱/۳ Inch
تعداد پیکسل	۱۲۸۰ x ۱۰۲۴
ابعاد پیکسل	۳.۶ x ۳.۶ um
نرخ فریم	۱۵ fps (Up to)
کوانتیزاسیون	۸ bit
فیلتر میان‌گذر	۴۴۰ ± ۲, FWHM = ۱۰ ± ۲nm
فیلتر میان‌گذر	۵۵۰ ± ۲, FWHM = ۱۰ ± ۲nm
فیلتر شدتی	Absorptive, OD(+۴)
فاصله کانونی	۷۰ mm
نسبت کانونی	۳.۵

در پیاده‌سازی سامانه الکترواپتیک تابش سنج خورشیدی، علاوه بر فیلتر میان‌گذر ۵۵۰ نانومتر، از فیلتر اپتیکی میان‌گذر در طول موج ۴۴۰ نانومتر و فیلتر شدتی جاذب نیز استفاده شده است.

از آنجاکه در فرآیند کالیبراسیون سامانه عملیاتی نهایی، ملزم به استفاده از داده‌های طول‌موج ۴۴۰ نانومتر خواهیم بود، این فیلتر نیز مورد استفاده قرار گرفت. فیلتر شدتی نیز به منظور کاهش شدت خورشید در صفحه کانونی و جلوگیری از اشباع شدن سنجنده استفاده گردید.

به منظور اطمینان از یکنواختی و خطی بودن پاسخ‌دهی سامانه الکترواپتیک طراحی شده در اندازه‌گیری تغییرات شدت نور خورشید، با برپایی چیدمان اندازه‌گیری در آزمایشگاه، به کالیبراسیون رادیومتریک این سامانه پرداخته شد. بدین ترتیب که پس از قرارگیری سامانه



شکل ۶- نمایشی از برنامه سکوی ردیاب خورشیدی در نرم افزار LabVIEW

پس از تکمیل و استقرار تجهیزات مذکور، به داده برداری و کالیبراسیون سامانه عملیاتی تابش سنج خورشیدی پرداخته شد. شکل (۷)، نمایشی از فرآیند داده برداری در شرایط میدانی را نمایش می دهد؛ در ادامه نیز مراحل این اندازه گیری و محاسبات گزارش شده است.



شکل ۷- نمایشی از استقرار تجهیزات و ثبت داده

۲-۱- فرآیند داده برداری و محاسبات

پراکندگی و جذب نور خورشید توسط مولکول ها و هواویزها به هنگام عبور از اتمسفر، منجر به تضعیف

به منظور ردیابی دقیق خورشید برای ناظری در سطح زمین، مختصات محلی خورشید با دو مؤلفه زاویه ای θ_s و ϕ_s تعیین گردید. θ_s که بانام سمت الرأس یا سرسو^۹ معرفی می شود، زاویه بین پرتو خورشید با سطح افق است. ϕ_s نیز که بانام زاویه سمت یا گرای خورشیدی^{۱۰} شناخته می شود، زاویه بین تصویر پرتو خورشیدی روی سطح زمین نسبت به شمال جغرافیایی است. به منظور سهولت در انجام محاسبات و ردیابی خورشید، این دو مؤلفه بر اساس روابط نجومی برحسب دستگاه مختصات زمین مرکزی از روابط زیر حاصل می شوند:

$$\cos \theta_s = \sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \Phi \cos h \quad (۱)$$

$$\cos \phi_s = \frac{\cos \Phi \sin \delta - \cos h \cos \delta \sin \Phi}{\sin \theta_s} \quad (۲)$$

در این معادلات، h زاویه ساعتی^{۱۱}، δ زاویه میل^{۱۲} و Φ عرض جغرافیایی^{۱۳} است. بر اساس این معادلات و استفاده از داده های تاریخ، زمان و مختصات جغرافیایی، یک ماژول GPS دقیق، زوایای سرسو و سمت خورشیدی محاسبه و با استفاده از کنترل یک جابه جاگر دوبعدی مجهز به موتور پله ای و مکانیسم حرکت حلزونی توسط برنامه طراحی شده در نرم افزار LabVIEW، تثبیت موقعیت در هر لحظه با دقت ۰.۰۵ درجه فراهم گردید. شکل (۶)، نمایشی از نرم افزار طراحی شده برای این منظور را نشان می دهد.

^۹ Zenith angle

^{۱۰} Azimuth angle

^{۱۱} Hour angle

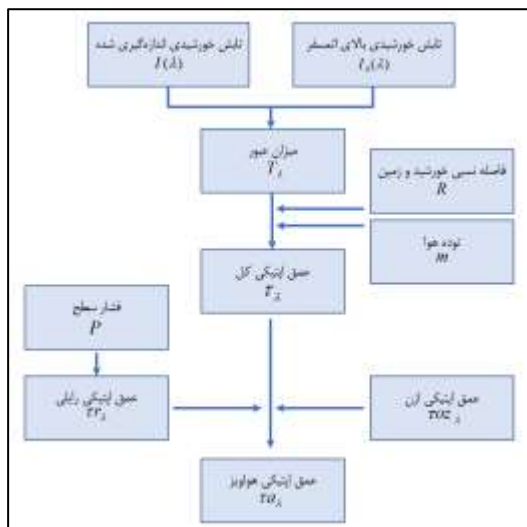
^{۱۲} Declination angle

^{۱۳} Latitude angle

در این رابطه τ_λ عمق اپتیکی کل نام دارد. روش متداول برای تعیین شدت نور خورشید به ازای طول موج مرجع در بالای اتمسفر به وسیله تابش سنج خورشیدی، استفاده از روش لانگلی است؛ بدین ترتیب که با لگاریتم گیری از رابطه (۴)، رسم $\ln I_\lambda$ بر حسب m و نهایتاً برون‌یابی نمودار به ازای $m = 0$ ، شدت نور خورشید در بالای اتمسفر به دست می‌آید (Rollin, ۲۰۰۰). در استفاده از این روش درجه‌بندی توجه به دو نکته بسیار مهم است، ابتدا اینکه درجه‌بندی در یک روز صاف انجام شود که در این معیار بایستی عمق اپتیکی هواویز در طول موج ۴۴۰ نانومتر کمتر از ۰.۱۵ شود و نکته دوم اینکه درجه‌بندی برای m بین ۲ تا ۷ صورت پذیرد تا شرط لایه‌های تخت اتمسفر به صورت کامل برآورده شود (Bodhain et al, ۱۹۸۹).

بر این اساس عمق اپتیکی حاصل شده کل نیز پس از کاستن عمق اپتیکی ازن و عمق اپتیکی ریلی از آن می‌توان عمق اپتیکی هواویز را تعیین نمود. شکل (۸)، روند نمای فرآیند محاسبه عمق اپتیکی هواویز را بر اساس رابطه (۵)، نشان می‌دهد.

$$\tau_{a\lambda} = \tau_\lambda - \tau_{O_3\lambda} - \tau_{r\lambda} \quad (5)$$



شکل ۸- طرح‌واره فرآیند محاسبه عمق اپتیکی هواویز

شدت تابش نور رسیده به سطح زمین می‌شود. طبق قانون بیر-لامبرت^{۱۴} میزان تضعیف در طول موج‌هایی که جذب شدیدی ندارند از رابطه زیر به دست می‌آید (Rollin, ۲۰۰۰):

$$I_\lambda = I_{\lambda,0} \exp(-m \int_z \kappa_{\lambda,z} \rho_z dz) \quad (3)$$

$$\text{where } I_{\lambda,0} = \frac{I'_{\lambda,0}}{R^2}$$

$$m = (\cos \theta + (0.050572)(96.07995 - \theta)^{-1.6364})^{-1}$$

در این رابطه $I_{\lambda,0}$ شدت نور خورشید در بالای اتمسفر در طول موج λ ، $I'_{\lambda,0}$ اصطلاحاً ثابت درجه‌بندی، R فاصله زمین تا خورشید و I_λ شدت نور خورشید در همان طول موج در سطح زمین است؛ مؤلفه m نیز که بانام توده‌هوا^{۱۵} شناخته می‌شود، بیانگر نسبت طول مسیر نوری در عبور از اتمسفر در زاویه ارتفاعی θ (زاویه دستگاه نسبت به سرسو) به طول مسیر همان شدت نور در عبور از اتمسفر با زاویه ارتفاعی صفر درجه در عبور قائم است. همچنین $\kappa_{\lambda,z}$ سطح مقطع خاموشی جرمی^{۱۶} و ρ چگالی جرمی است. با چشم‌پوشی از اثر کروی بودن زمین و تغییرات ضریب شکست در لایه‌های مختلف اتمسفر برای زوایای کمتر از ۸۰ درجه، می‌توان اتمسفر زمین را لایه‌های تخت موازی و همگن در نظر گرفت (Holben et al, ۱۹۹۸). بدین ترتیب با استفاده از جمله اول مؤلفه m و جایگذاری $\tau_\lambda = \int_z^\infty \kappa_{\lambda,z} \rho_z dz$ در رابطه (۳)، رابطه (۴)، حاصل می‌شود:

$$I_\lambda = I_{\lambda,0} \exp(-m\tau_\lambda) \quad (4)$$

^{۱۴} Beer-Lambert

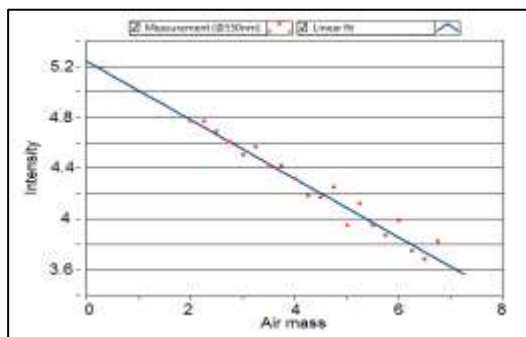
^{۱۵} Airmass

^{۱۶} Mass extinction cross section

بر بدین ترتیب بر اساس داده‌های روز نخست، تعیین ثابت درجه‌بندی برای طول موج ۵۵۰ نانومتر انجام گردید. در ادامه نتایج به دست آمده ارائه شده است.

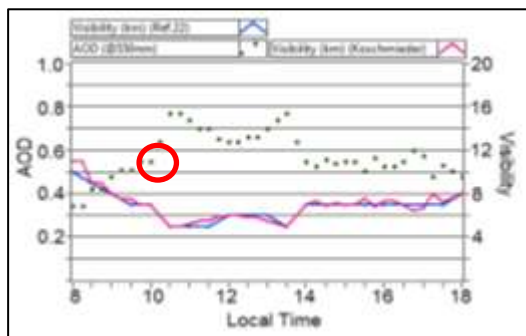
۳- نتایج اندازه‌گیری

بر اساس معادلات مذکور، نتایج و نمودار تعیین ثابت درجه‌بندی در طول موج ۵۵۰ نانومتر محاسبه شد؛ شکل (۱۰)، نمودار شدت (لگاریتم نمایی میانگین عدد دیجیتالی تصحیح شده سنجنده در ۴۰۰۰ پیکسل مرکزی) بر حسب توده‌هو را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - نمودار شدت (لگاریتم نمایی عدد دیجیتالی سنجنده) بر حسب توده‌هو

پس از تعیین ثابت درجه‌بندی، اندازه‌گیری عمق اپتیکی هواویز در یک روز کاری (۲۵ MAY ۲۰۱۹) با آلاینده‌های شهری (با استفاده از مقادیر فشار هوا و عمق اپتیکی ازن حاصل از داده‌های ایستگاه هواشناسی)، انجام شد. نقاط سبزرنگ در نمودار شکل (۱۱)، نتایج میزان عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۵۵۰ نانومتر، بر حسب زمان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ - نمودار عمق اپتیکی هواویز در طول موج ۵۵۰ نانومتر برابر با ۰.۵۵ بر حسب زمان و نمودار نمایانی بر حسب زمان

بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل (۳)، عمق اپتیکی ازن را به دلیل جذب بالا در این ناحیه، می‌توان از کانال ۶۷۵ نانومتر تابش سنج و یا داده‌های ایستگاه هواشناسی محل اندازه‌گیری، استخراج نمود. عمق اپتیکی ریلی در هر طول موج نیز از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$tr_{\lambda} = \sigma_{sca} \frac{PA}{m_a g} \quad (6)$$

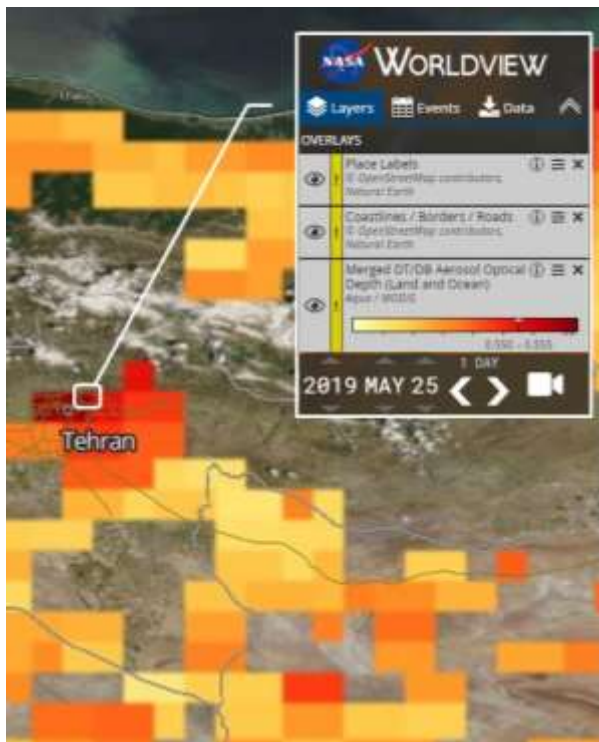
در این رابطه σ سطح مقطع پراکندگی^{۱۷} میانگین برای هر مولکول، P فشار هوا در محل اندازه‌گیری، A عدد آووگادرو، m_a جرم مولکولی میانگین هوا و g شتاب گرانش زمین در محل اندازه‌گیری است [۲۳]. در این رابطه به شرط تعیین و پایداری ترکیبات اتمسفری محل اندازه‌گیری، با اندازه‌گیری فشار هوا در هنگام ثبت داده توسط تابش سنج خورشیدی، می‌توان عمق اپتیکی ریلی را محاسبه نمود. داده برداری و اندازه‌گیری در یک روز تعطیل و نسبتاً پاک و یک روز کاری دارای آلاینده‌های شهری در فصل تابستان در تهران، از ساعت ۸ صبح تا ۱۸ عصر و در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه صورت گرفت. شکل (۹)، یکی از تصاویر ثبت شده از خورشید توسط سامانه تابش سنج خورشیدی با فیلتر ۴۴۰ نانومتر را نشان می‌دهد.



شکل ۹ - تصویر ثبت شده از خورشید توسط سامانه تابش سنج خورشیدی

علت انتخاب دو روز متفاوت، همان گونه که اشاره شد، برقراری شرط تعیین ثابت درجه‌بندی (عمق اپتیکی هواویز کمتر از ۰.۱۵ در طول موج ۴۴۰ نانومتر)، است.

^{۱۷} Scattering cross section



شکل ۱۲- داده عمق اپتیکی حاصل از سنجنده MODIS(Aqua)

همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های به‌دست‌آمده بسیار متفاوت از مقادیر پیش‌فرض مدل‌های هواویز MODTRAN است (شکل ۳)، و علاوه بر این تغییرات فراوانی در طول روز برای نمایانی بروز می‌یابد، که با توجه به زمان دقیق گذر ماهواره، می‌توان از داده‌های حاصل برای انجام تصحیح اتمسفری استفاده نمود. همچنین برای افزایش دقت می‌توان با استفاده از کانال‌های ۹۳۶ نانومتر و ۶۷۵ مقادیر بخار آب و ازن را نیز به‌صورت دقیق اندازه‌گیری و در محاسبات وارد نمود. در تائید نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری نمایانی توسط دستگاه تابش‌سنج خورشیدی معرفی شده در این گزارش، به‌صورت روزانه مورد مقایسه و ارزیابی با داده‌های نمایانی سایت مرجع در موقعیت فرودگاه مهرآباد تهران قرار گرفت؛ که نتایج بررسی‌های صورت گرفته، صحت عملکرد قابل‌قبول این دستگاه را نشان می‌دهد.

داده‌های حاصل از مقدار عمق اپتیکی در طول موج ۵۵۰ نانومتر، به‌صورت مستقیم در برخی مدل‌ها و الگوریتم‌های تصحیح اتمسفری تصاویر ماهواره‌ای، همچون ۶S قابل‌استفاده است؛ اما در برخی مدل‌ها همچون MODTRAN، بایستی به نمایانی تعدیل یابد. بدین ترتیب در عرض جغرافیایی میانی در فصل تابستان در طول موج ۵۵۰ نانومتر، در این مدل، نمایانی با استفاده از رابطه کوشمیدر^{۱۸} (رابطه ۷) به عمق اپتیکی اپتیکی هواویز مرتبط می‌شود (BHATIA ET AL, ۲۰۱۸). در این رابطه، عدد ثابت مخرج کسر، ضریب پراکندگی سطحی ریلی در طول موج ۵۵۰ نانومتر است.

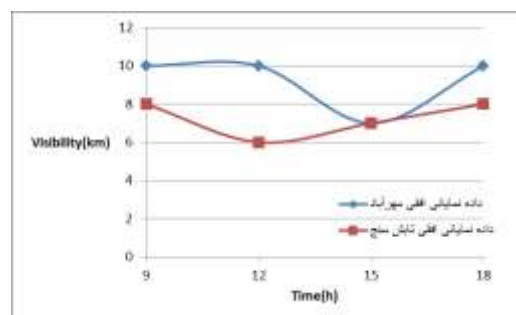
$$X_v = \frac{3.912}{b_{ext}}$$

(۷)

نمودار قرمز رنگ نیز نتایج تعدیل عمق اپتیکی اندازه‌گیری شده هواویزها توسط تابش‌سنج خورشیدی به نمایانی برحسب زمان را نشان می‌دهد.

در ادامه پارامتر عمق اپتیکی هواویز سنجنده MODIS(Aqua) اخذ شد و برای زمان داده‌گیری عدد ۰.۵۵ را نشان می‌دهد که با داده ثبت‌شده توسط تابش‌سنج در زمان گذر ماهواره از روی ایران (۱۰:۳۰ بوقت محلی)، همخوانی دارد (شکل ۱۲).

^{۱۸} Koschmieder equation



شکل ۱۳- مقایسه داده‌های نمایانی افقی سایت مرجع و تابش سنج طراحی شده

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به معرفی ضرورت انجام تصحیح اتمسفری و مدل‌ها و الگوریتم‌های مورد استفاده پرداخته شد و سپس گزارشی از طراحی، اجرا و کالیبراسیون تابش سنج خورشیدی با توجه به امکانات موجود، به‌عنوان راهکاری برای اندازه‌گیری عمق اپتیکی هواویز در طول موج ۵۵۰ نانومتر به‌عنوان مؤثرترین مؤلفه در فرآیند مذکور ارائه شد. نهایتاً با استفاده از این دستگاه، عمق اپتیکی هواویز در یک روز تابستانی در تهران اندازه‌گیری شد که نتایج در مقایسه با گزارش‌های موجود، بیانگر صحت عملکرد این دستگاه و داده‌های حاصل است.

مراجع

- Volz, F. E. (۱۹۷۴). Economical multispectral sun photometer for measurements of aerosol extinction from $0.44 \mu\text{m}$ to $1.6 \mu\text{m}$ and precipitable water. *Applied Optics*, ۱۳(۸), ۱۷۳۲-۱۷۳۳.
- Morys, M., Mims III, F. M., Hagerup, S., Anderson, S. E., Baker, A., Kia, J., & Walkup, T. (۲۰۰۱). Design, calibration, and performance of MICROTOSPS II handheld ozone monitor and Sun photometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, ۱۰۶(D۱۳), ۱۴۵۷۳-۱۴۵۸۲.
- Brooks, D. R., Mims III, F. M., & Roettger, R. (۲۰۰۷). Inexpensive near-IR sun photometer for measuring total column water vapor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, ۲۴(۷), ۱۲۶۸-۱۲۷۶.
- Mondol, P. K., Mamun, M. M., & Islam, M. M. (۲۰۱۴). Construction of an inexpensive sun photometer to measure aerosol optical depth and comparisons between the measured data and satellite observations. *American Journal of Remote Sensing*, ۲(۵), ۳۷-۴۳.
- Rollin, E. M. (۲۰۰۰). An introduction to the use of Sun-photometry for the atmospheric correction of airborne sensor data. *Proc. Annu. Meet. NERC EPFS NERC ARSF*, ۲۲.
- Holben, B.N., et.al, Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T. and Lavenu, F., (۱۹۹۸). AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment*, ۶۶(۱), pp.۱-۱۶.
- Bodhaine, B. A., Wood, N. B., Dutton, E. G., & Slusser, J. R. (۱۹۹۹). On Rayleigh optical depth calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, ۱۶(۱۱), ۱۸۵۴-۱۸۶۱.
- Bhatia, N., Iordache, M. D., Stein, A., Reusen, I., & Tolpekin, V. A. (۲۰۱۸). Propagation of uncertainty in atmospheric parameters to hyperspectral unmixing. *Remote sensing of environment*, ۲۰۴, ۴۷۲-۴۸۴.
- <https://modis.gsfc.nasa.gov>
- Ronald, S., Adam, D., & Martin, R. (۲۰۱۸). A general Approach to enhance short wave satellite imagery by removing background atmospheric effects. *Remote sensing*, (Vol. ۴, p. ۱-۱۵).
- Peng, Y., He, G., Zhang, Z., Long, T., Wang, M., & Ling, S. (۲۰۱۶). Study on atmospheric correction approach of Landsat-۸ imageries based on ۳S model and look-up table. *Journal of Applied Remote Sensing*, ۱۰(۴), ۰۴۵۰۰۶.
- Baugh, W. M., & Groeneveld, D. P. (۲۰۰۸). Empirical proof of the empirical line. *International Journal of Remote Sensing*, ۲۹(۳), ۶۶۵-۶۷۲.
- Gao, B. C., Davis, C., & Goetz, A. (۲۰۰۶, July). A review of atmospheric correction techniques for hyperspectral remote sensing of land surfaces and ocean color. In ۲۰۰۶ IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (pp. ۱۹۷۹-۱۹۸۱). IEEE.
- Vibhute, A. D., Kale, K. V., Dhumal, R. K., & Mehrotra, S. C. (۲۰۱۵, December). Hyperspectral imaging data atmospheric correction challenges and solutions using QUAC and FLAASH algorithms. In ۲۰۱۵ International Conference on Man and Machine Interfacing (MAMI) (pp. ۱-۶). IEEE.
- Manual, P. (۲۰۱۴). Ontar Corporation. North Andover, Mao.
- Weitkamp, C. (Ed.). (۲۰۰۶). Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere (Vol. ۱۰۲). Springer Science & Business.
- <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Chen, L., Jing, Y., Zhang, P., & Hu, X. (۲۰۱۶, May). Analysis of aerosol properties derived from sun photometer and lidar over Dunhuang radiometric calibration site. In *Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation VI* (Vol. ۹۸۷۶, p. ۹۸۷۶۳G). International Society for Optics and Photonics.
- Shikuan, J., Yingying, M., Ming, Zh., Wei, G., Oleg, D., Boming, L., Yifan, Sh., & Changlan, Y. (۲۰۱۹). Retrieval of ۵۰۰ m aerosol optical depth from MODIS measurement over urban surfaces under heavy aerosol loading condition in winter. *Remote sensing* (Vol. ۱۱, p. ۱-۱۳).
- Sugisaki, T., & Tonooka, H. (۲۰۰۸, October). Evaluation of land surface reflectance and emissivity spectra retrieved from MASTER data. In *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XII* (Vol. ۶۱۰۶, p. ۶۱۰۶۱Y). International Society for Optics and Photonics.
- Claverie, M., Vermote, E. F., Franch, B., & Masek, J. G. (۲۰۱۵). Evaluation of the Landsat-۸ TM and Landsat-۷ ETM+ surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment*, ۱۶۹, ۳۹۰-۴۰۲.
- Pacifici, F. (۲۰۱۶, July). Validation of the DigitalGlobe surface reflectance product. In ۲۰۱۶ IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. ۱۹۷۳-۱۹۷۵). IEEE.
- Liu, Y., Li, C., Ma, L., Wang, N., Qian, Y., & Tang, L. (۲۰۱۷, July). An automatic reflectance-based approach to vicarious radiometric calibrate the Landsat-۸ operational land imager. In ۲۰۱۷ IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. ۴۶۹۹-۴۷۰۲). IEEE.

Designing and development of a solar radiation system for atmospheric correction of satellite images

Omid Choupanian^۱, Abbas Bashiri^۲, Hamid Reza Khodadadi^۳, Hasan Hasani Moghaddam^۴

Abstract

Applying atmospheric corrections in order to reduce the attenuation effects of the atmosphere on the quality and accuracy of the recorded data, requires a comprehensive knowledge of the conditions, characteristics, and behavior of the atmosphere as the sensor passes through the target coordinates. Nowadays, many equipment's, models and algorithms are used to study the components of the atmosphere. For this reason, in this research, a native solar radiation system was designed and built to calculate the optical depth of air aerosol. In order to simulate and investigate the effects of changes in each atmospheric component, the MODTRAN model was used in PCModWin environment. In this electro-optical system, at two wavelengths of ۴۵۰ and ۵۵۰ nm, due to the absorption range of the air aerosol, in two different days in terms of the amount of pollutants in the atmosphere, intense data were recorded. In order to ensure the uniformity and linearity of the response of the designed electro-optical system to measure changes in the intensity of sunlight, radiometric calibration of this system was performed. Using atmospheric models, from the recorded intensity data, the optical depth of the weather and the horizontal atmospheric metrics were calculated. In order to verify and evaluate the performance of the designed system, optical depth data obtained from MODIS (Aqua) sensor and horizontal exponential data of Mehrabad Airport meteorological station were used. The results of the accuracy evaluation showed that the calculation of the optical depth by the system designed and the MODIS sensor (Aqua) both shows a number of ۰.۵ in the passing hour of the satellite. The results also show a good correlation between the horizontal visibility calculated in this study and the data obtained from the reference meteorological station.

Key words: Satellite images, Atmospheric correction, Solar radiation, Laboratory calibration, Aerosol optical depth