نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۱۱۸ – ۹۵

راه‌اندازی ایستگاه دائم اندازه‌گیری ایرادیانس طیفی فرودی مستقیم خورشید (منطقه مطالعاتی: هانوفر، آلمان)

[۱] سحر دهنوی*، [۲] یاسر مقصودی، [۳] محمدجواد ولدان‌زوج

تاریخ دریافت:
۱۳۹۸ / ۰۴ / ۲۸

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۸ / ۰۸ / ۳۰

کلمات کلیدی:
ایرادیانس طیفی مستقیم
فرودی خورشیدی
اندازه‌گیری میدانی
مشاهدات پیرانومتر مطالعات
آب و هواشناسی و خورشیدی

چکیده

ایرادیانس طیفی مستقیم خورشیدی، یکی از کمیت‌های رادیومتریک بنیادی است، که داشتن اطلاعات دقیق از آن، می‌تواند محققین را در دستیابی به اطلاعات جدید در حوزه بهره‌بری از انرژی پاک خورشیدی و سایر حوزه‌های مربوطه یاری‌رسان باشد. در این کار پژوهشی، گام‌ها و فرآیندهای مورد نیاز برای استقرار، کالیبراسیون و اعتبارسنجی یک ایستگاه دائم اندازه‌گیری ایرادیانس طیفی فرودی مستقیم خورشیدی در شهر هانوفر، آلمان ارائه شده است. این ایستگاه پس از تکمیل این مطالعه در دانشگاه هانوفر توسط محققین این پژوهش راه‌اندازی شد. به این ترتیب ایرادیانس فرودی خورشید با حد تفکیک طیفی یک نانومتر در بازه ۳۰۰–۸۰۰ نانومتر و حد تفکیک زمانی بسیار بالا (هر یک ثانیه ۶ اندازه‌گیری) قابل اندازه‌گیری است. در این مطالعه، بهترین و دقیق‌ترین ابزار ردیاب خورشیدی از بین سه دستگاه متداول انتخاب شد. مقایسهٔ نتایج اندازه‌گیری‌های این ایستگاه تازه تأسیس شده، با اندازه‌گیری‌های ایستگاه پیرانومتری، همبستگی بالای اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد. هدف از ارائه این راهنمای فنی، انتقال دانش فنی بروز به داخل کشور است، تا محققین داخلی کشور بتوانند با مطالعه این مقاله، به تأسیس مدرن‌ترین ایستگاه‌های اندازه‌گیری تابش خورشیدی بومی اقدام به عمل آورند.

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران و مشاور پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب و هواشناسی، دانشگاه لایبنیز هانوفر، هانوفر، آلمان. (نویسنده مسئول)
dehnavi@muk.uni-hannover.de
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
ymaghsoudi@kntu.ac.ir
۳. استاد تمام، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایرانvaladanzouj@kntu.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

۱. مقدمه

تاکنون توجه ویژه‌ای به اندازه‌گیری‌ها و مدل‌سازی ایرادیانس خورشیدی در بازه طیفی فرابنفش-مرئی-مادون قرمز معطوف بوده است [۲]. با وجود اهمیت اندازه‌گیری‌های تابش خورشیدی مستقیم[۱] (DNI)، بیشتر اندازه‌گیری‌های محققین متمرکز بر روی اندازه‌گیری‌های پهن‌باند[۲] DNI بوده‌اند و توجه ویژه‌ای بر اندازه‌گیری‌های ایرادیانس طیفی مستقیم فرودی خورشید[۳] (SDNI) نداشته‌اند. به عنوان مثال در مرجع [۳۸] اندازه‌گیری‌های طیفی در سطح زمین تنها در ۶ باند طیفی متفاوت انجام گرفته‌است که به این منظور از ابزار پرهلیومتر و ۶ فیلتر طیفی بزرگ هموار بهره برده شده است؛ یا در مطالعه‌ای دیگر [۲۳] نویسندگان از یک اسپکترورادیومتر مدور سایه‌بان[۴] برای اندازه‌گیری‌های پهن‌باند تابش خورشیدی مستقیم و پراکنده در شرایط آسمان صاف استفاده کرده‌اند. هدف اصلی در مطالعه [۲۳] مقایسه اندازه‌گیری‌ها با نتایج شبیه‌سازی تابش خورشیدی بوده است.

در مطالعات دیگر [۱۸، ۷] برای تخمین مقدار ایرادیانس مستقیم فرودی خورشیدی تنها از محاسبات و مدل‌های مبتنی بر مدل انتقال تابش[۵] بهره برده‌اند. یک روش جایگزین که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های فتومتر خورشیدی[۶] هست هم در مطالعه مرجع [۱] معرفی شده است که به‌موجب آن ایرادیانس مستقیم فرودی خورشیدی از انتگرالگیری در سطح طیفی اندازه‌گیری‌های طیفی فتومتر محاسبه شده است. در مطالعه پیشین که در هانوفر توسط گروه تحقیقاتی ما انجام گرفت، اندازه‌گیری‌های حقیقی SDNI با شبیه‌سازیهای مدل انتقال تابش (به عنوان مثال مدل انتقال تابش یو-وی-اسپک[۷] [۲۰]) مورد مقایسه قرار گرفتند تا به این طریق مقدار آیروسول موجود در جو تخمین زده شود. نتایج این کار پژوهشی و مطالعات پژوهشی دیگر که با هدف استخراج اطلاعات آیروسول در

1. Direct Normal Irradiance (DNI)
2. Broadband
3. Spectral direct Normal Irradiance (SDNI)
4. Rotating Shadow-band spectroradiometer
5. Radiative transfer Model
6. Sun photometer
7. UVSPEC

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

جو انجام گرفته‌اند اثبات کرد که امکان استخراج اطلاعات آیروسول موجود در جو [۱۳، ۱۷، ۱۲، ۲۲، ۹، ۱۰] و پارامترهای ابر [۱۵] بر اساس اندازه‌گیری‌های SDNI فراهم خواهد بود. علاوه بر موارد کاربردی ذکر شده در بالا، لازم به ذکر است که این کمیت تابش خورشیدی (SDNI)، یکی از کمیت‌های کلیدی در معادلات انتقال تابش است [۳۷] که برمبنای آن امکان استنتاج کمیت‌های رادیومتریک دیگر نیز فراهم می‌آید. به‌علاوه لازم به یادآوری است که اینگونه لندازه‌گیری‌ها می‌تولند در کاربردهای متنوع دیگر، شامل تمامی کاربردهایی که در آن داشتن اطلاعات زمانی و طیفی ایرادیانس مستقیم خورشیدی لازم است، بسیار مفید و ضروری واقع شود. به عنوان مثال می‌توان به کاربردهایی نظیر محاسبه مقدار توان خروجی سلول‌های خورشیدی مستقیم/ مایل[1] [۲۵، ۱۶، ۲۹، ۲۶] مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی، یا تعیین مقدار تابش مستقیم فرودی بر عوارض با اشکال پیچیده مانند بدن انسان [۳۵] اشاره کرد.

محققین و همکاران مستقیم و غیرمستقیم این پروژه، پیشتر مطالعات زیادی در حوزه پژوهش در خصوص تابش خورشیدی در تمامی طول موج‌های متفاوت، شامل فرابنفش- مادون قرمز داشته‌اند. به این ترتیب که یکی از ناظران اصلی این پروژه، پرفسور گانتر سکمیر بیش از ۳۰ سال تجربه در حوزه‌های متفاوت مربوط به طراحی ابزارهای اندازه‌گیری انرژی خورشیدی دارد. این تجربیات شامل توسعه تکنولوژی مربوط به ابزارهای لندازه‌گیری ایرادیانس و رادیانس طیفی و دهلنه اپتیکی مربوطه [۲۱]، ابزار کالیبراسیون میدانی [۲۷، ۳۴]، انواع اسپکترورادیومتر [۸] ، سایر ابزارهای لندازه‌گیری رادیومتری مربوطه [۳۶، ۳۴]، تکنیک‌های اندازه‌گیری [۲۱، ۱۱] و اثرات محیطی [۲۱، ۴۰، ۱۴، ۱۱، ۳۳] داشته‌اند.

از آنچه بیان شد پرواضح است که تاکنون تحقیقات زیادی در بحث برآورد ایستگاه اندازه‌گیری تابش خوشیدی، نظیر ایستگاه‌هایBSRN[2] ، یا شبکهAERONET[3] انجام گرفته است. اما همگی این ایستگاه‌های اندازه‌گیری یا داده‌های موجود اندازه‌گیری‌های خود را به صورت چندطیفی انجام داده‌اند؛ و تنها تعداد معدودی مطالعه یافت می‌شود که در زمینه استقرار یک ایستگاه اندازه‌گیری تابش خورشیدی به صورت طیفی فعالیت کرده‌اند. یا اینکه این اندازه‌گیری‌های طیفی را تنها به صورت موقت انجام

1. Tilted or normal solar cells
2. Baseline Surface Radiation Network (BSRN)
3. AErosol Robotic NETwork (AERONET)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

داده‌اند. بنابراین آماده‌سازی یک روند عملیاتی از دو دیدگاه ابزار و تکنیک در این نوع اندازه‌گیری‌ها نه تنها مهم، بلکه بسیار ضروری است. این مطالعه با همکاری محققین دانشگاه هانوفر و در این دانشگاه در کشور آلمان اجرا شده است. نتایج این تحقیق و ارائه این تکنیک در ایران می‌تواند راهگشای بسیاری از تحقیقات پیشرو در حوزه انرژی‌های خورشیدی برای کشور ایران باشد. به عنوان مثال تحقیقاتی که در زمینه بهینه‌سازی انرژی مصرفی در ساختمان‌ها انجام گرفته است [۳] و یا امکان‌سنجی پروژه‌های نیروگاهی [۲۴] را می‌توان با بهره‌مندی از نتایج این مطالعه بهبود بخشید.

در این کار پژوهشی، ارائه مشخصات[1] و توسعه فنی ابزارهای مورد نیاز برای استقرار ایستگاه اندازه‌گیری عملیاتی و دائم SDNI در دستور کار قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در تهیه و توسعه این ایستگاه عملیاتی دائم اندازه‌گیری تابش خورشیدی به صورت طیفی، تمامی اصول ذکر شده در سندهای راهبردی اندازه‌گیری تابش خورشیدی بین‌المللی سازمان هواشناسی جهانی [2] (WMO) مد نظر قرار گرفته است. این اسناد راهبردی در سازمان جهانی هواشناسی چاپ و منتشر شده [۲۸، ۳۹، ۳۱، ۳۲] و حاصل تجربیات ۳۰ ساله برخی از همکاران این کار پژوهشی است.

در سندهای راهبردی WMO، راهنمایی‌های لازم برای تعیین مشخصات و خصوصیات فنی ابزارهای مورد استفاده در اندازه‌گیری‌های قابل اعتماد تابش خورشیدی ارائه شده است. این اسناد راهبردی تمامی دانشمندان، محققان، شرکتهای تولید ابزارهای لندازه‌گیری تابش، سازمان‌ها و آژانس‌های تحقیقاتی مرتبط با اندازه‌گیرهای ایرادیانس خورشیدی را مد نظر قرار داده است. بنابراین در این مطالعه از راهنمایی‌های موجود در اسناد ذکر شده برای ارائه یک ایستگاه لندازه‌گیری تابش خورشیدی استاندارد در پلتفرم اندازه‌گیری مؤسسه تحقیقات آب و هواشناسی[3] (IMuK) دانشگاه هانوفر استفاده شده است. در این ایستگاه از به‌روزترین تکنولوژی اندازه‌گیری‌های تابش خورشیدی استفاده شده است. بنابراین زمینه انجام تحقیقاتی که پیش از این ممکن نبود، با توسعه این ایستگاه در IMuK فراهم آمده است. در ادامه کلیاتی از مهمترین ابزارهای مورد نیاز برای استقرار این ایستگاه دائم اندازه‌گیری‌های تابش فرودی مستقیم خورشیدی طیفی معرفی شده‌اند.

1. characterization
2. World Meteorological Organization (WMO)
3. Institut für Meteorologie und Klimathologie

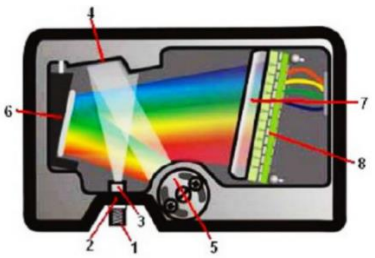
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

۲. ابزارهای مورد استفاده

مطابق با استانداردهای تعریف شده در WMO، برای اندازه‌گیری ایرادیانس مستقیم خورشیدی طیفی لازم است که از آرایه اسپکتروراديومتر طیفی CCD مبنا (SCCD)[1] بهره برده شود. این سیستم یک ابزار اسکن نیمکره‌ای است که شامل آرایه‌ای از CCDها، اسپکتروراديومتر، سامانه ردیابی[2]، فیبر نوری و دهانه اپتیکی[3] است. با استفاده از این سیستم‌ها می‌توان تمام محدوده طول موج مورد نظر را در یک لحظه مشخص اندازه‌گیری کرد (کورمتی، بایاس و همکاران، ۲۰۰۸). تمامی اجزای این سیستم، تحت کنترل نرم‌افزاری است که توسط گروه تحقیقاتی حاضر توسعه پیدا کرده و همچنان در حال بهبود و توسعه می‌باشد. این نرم‌افزار با عنوان اسپکترومات[4] نامگذاری شده است و در دانشگاه هانوفر در حال توسعه و بروزرسانی همیشگی است. در ادامه کلیاتی از اجزای تشکیل‌دهنده این سیستم معرفی شده است.

۲-۱. اسپکتروراديومتر

اسپکتروراديومتر یک ابزار راديومتریک است که امکان اندازه‌گیری ایرادیانس طیفی کلی[5] و مستقیم[6] خورشیدی را فراهم می‌کند. مهمترین مزیت این ابزار فراهم آوردن شرایط اندازه‌گیری بسیار سریع است. ساختار درونی اسپکتروراديومتر مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. ساختار درونی اسپکتروراديومتر. ۱) ارتباط با فیبر نوری، ۲) شکاف، ۳) فیلتر، ۴) آینه کولیماتور، ۵) شبکه انکساری، ۶) آینه متمرکز، ۷) لنز جمع‌کننده آشکارساز، ۸) آشکارساز CCD.

1. Array Spectroradiometer Charged coupled Device (SCCD)
2. Tracking and positioning unit
3. Entrance optic
4. Spectromat
5. Global Spectral Irradiance
6. Direct Spectral Irradiance

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

اسپکترورادیومتر SD2000، که در شرکت اوشن-اپتیکز[1] تهیه شده است، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳). این اسپکترورادیومتر دارای ابعاد ۱۴۲×۱۰۴×۸۹ میلیمتر و وزن ۵۰۰ گرم است. مشخصات فنی این سنسور در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۳. اسپکترورادیومتر SD2000

جدول ۱. مشخصات فنی سنسور SD2000

آشکارساز	۲۰۴۸ پیکسل
حد تفکیک رادیومتریک	۱۶ بیت (۶۵۰۰۰ واحد)
بازه طیفی	۲۶۵ - ۹۰۰ نانومتر
پهنای باند	۰/۷ - ۱/۸ نانومتر
بازه نمونه‌برداری طیفی	۰/۲۲ - ۰/۳۹ نانومتر

مأخذ: نتایج تحقیق

۲-۲. سامانه‌های ردیاب

سه دستگاه متفاوت ردیاب متفاوت برای ردیابی خورشید مورد استفاده قرار گرفت. با مقایسه دقت ردیابی سیستم‌ها در روزهای متفاوت؛ بهترین سیستم ردیاب به منظور تکمیل سیستم عملیاتی SCCD و برای اندازه‌گیری تابش SDNI انتخاب شد. در شکل ۴ نمایی از هر سه سیستم ردیاب مورد بررسی ارائه شده است.

1. Ocean-optics

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۴. سیستم‌های ردیاب. الف) دستگاه PTU، ب) سیستم مکانیابی ENEO، پ) سامانه اسکای-اسکنر[۱]

سیستم شکل ۴-الف، سامانه ردیاب آزیموت-زنیت[۲] (PTU)، خانواده‌ای از سامانه‌های ردیاب است که امکان ردیابی[۳] اطلاعات موقعیتی دقیق و آنی[۴] را برای انواع اهداف فراهم می‌آورد.

مدل PTU-D100 که در این مطالعه مورد استفاده و بررسی قرار گرفت، کاملاً مقاوم در شرایط متفاوت آب و هوایی است، امکان دوران دائم در راستای آزیموتی را داشته و در مجموع برای محیط‌های با شرایط بسیار سخت طراحی شده است. سیستم شکل ۴-ب، سامانه ردیاب ENEO است که برای ردیابی با اهداف مختلف طراحی شده است و در این مطالعه برای ردیابی خورشید بر روی یک سه پایه مستقر و تراز شده است. ارتباط این سیستم با نرم‌افزار اسپکترومات به خوبی برقرار شده است. سیستم شکل ۴-پ، سامانه اسکن آسمان از شرکت زیبولا و گراندمن[۵] است که مجهز به دو محور افقی و قائم برای اسکن آسمان است و بیشتر با هدف اندازه‌گیری روشنایی[۶] آسمان طراحی شده است. محور قائم این سامانه قابلیت دوران در محدوده ۱۹۰ درجه را دارا بوده و هیچ محدودیتی دورانی‌ای در راستای افقی نیز ندارد. بنابراین می‌توان تصور کرد که هر نقطه مکانی با استفاده از این سیستم قابل دستیابی خواهد بود. محور افقی (آزیموتی) این سیستم ردیاب باید در ابتدای اندازه‌گیری نسبت به راستای شمال یا موقعیت خورشید اصطلاحاً صفر-صفر[۷] شود.

1. Sky-scanner
2. Pan-Tilt Unit (PTU)
3. Tracking
4. Real-time
5. Czibula und Grundmann
6. Luminance

۷. اصطلاح نقشه برداری صفر-صفر در جهت شمال؛ یعنی زمانی که راستای صفر سیستم زاویه‌یابی در جهت شمال قرار گیرد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

سپس با استفاده از مد ردیابی که مسیر حرکت روزانه خورشید را ردیابی می‌کند، سیستم شروع به کار می‌کند. پس از کنترل و انجام لندازه‌گیری‌های متعدد و مشـــاهده مشـــکلات موجود در هریک از سیستم‌ها نتیجه حاصله آن بود که سیستم PTU دقیق‌ترین سیستم ردیاب برای ردیابی مسیر خورشید است. سیستم ENEO به علت استقرار بر روی سه‌پایه در اندازه‌گیری‌های کوتاه مدت می‌تواند مناسب واقع شود اما برای ایجاد یک ایستگاه بلندمدت گزینه مناسبی نیست. به خصوص در شرایط آب و هوایی هانوفر که در مواقع زیادی از سال دارای بادهای شدید است، چنین سیستمی نمی‌تواند به عنوان ابزار اندازه‌گیری دائمی انتخاب شود. پس از اندازه‌گیری با سیستم اسکای-اسکنر هم مشخص شد که این ســـیســـتم دارای قطعی‌های ناگهانی و تغییرات راســـتای آزیموتی در لندازه‌گیری‌های اتوماتیک و طولانی‌مدت است. سیستم PTU که به نظر مقاوم‌ترین و بروزترین سیستم در بین سایر ردیاب‌های موجود در IMuK بود، از آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های بلندمدت اتوماتیک در طول یکبازه ۶ ماهه قدرت و دقت قابل خود را در این مطالعه ثابت کرد و به این ترتیب به عنوان سیستم ردیاب خورشیدی منتخب در اندازه‌گیری‌های SDNI برگزیده شد.

۲-۳. واحد نگه دارنده[1] و دهانه اپتیکی

برای قراولروی دقیق به راســـتای خورشـــیدی در زمان ردیابی و لندازه‌گیری ایرادیانس فرودی مستقیم خورشیدی لازم است که دهانه سیستم اپتیکی با میدان دید[2] در حدود ۵ درجه و با دقت بالایی در حد کسری از درجه به سوی خورشید اشاره کند. بنابراین واحد نگه دارنده دهانه اپتیکی که بر روی سیستم ردیاب نصب می‌شود باید دقت تراز و قراولروی بسیار بالایی داشته باشد. به این منظور طراحی این ســـیســـتم نگه دارنده در طی اجرای این پروژه با همکاری مرکز اندازه‌گیری‌های دقیق خورشـــیدی آلمان (PTB)[3] و گروه نویســـندگان این مقاله انجام گرفت. در شـــکل ۵ طرح نهایی این ســـیســـتم نگه دارنده، دهانه اپتیکی و ابزار قراولروی به سمت خورشید نمایش داده شده است.

1. Mouting unit
2. Field of View
3. Physikalisch-technische bundesanstalt (PTB)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۵. واحد نگه دارنده، دهانه اپتیکی و ابزار قراولروی

۲-٤. دستگاه پیرانومتر[1]

پیرانومتر ابزاری متداول برای اندازه‌گیری مقدار ایرادیانس کلی خورشید[2] (GHI) است و در دو نوع متفاوت در IMuK موجود است. نوع اول پیرانومتر متدوال برای اندازه‌گیری GHI است و نوع دوم پیرانومتر با واحد سایه‌انداز است که امکان اندازه‌گیری جزء پراکنده ایرادیانس[3] (DHI) را نیز فراهم می‌کند.

برای صحت‌سنجی اندازه‌گیری‌های سیستم طراحی شده برای تابش مستقیم فرودی خورشیدی (DNI)، از رابطه فیزیکی بین این پارامترها و اندازه‌گیری‌های پیرانومتر استفاده خواهد شد. به طور کلی رابطه (۱) بین اجزای ایرادیانس خورشیدی برقرار است.

$$\mathrm{GHI} - \mathrm{DHI} = \mathrm{DNI}.\cos(SZA) \qquad (۱)$$

که در این رابطه SZA مقدار زاویه زنیتی خورشیدی در لحظه اندازه‌گیری است.

۲-۵. ابزارهای کالیبراسیون میدانی

به منظور انجام کالیبراسیون میدانی ابزارهای زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

1. Pyranometer
2. Global Horizontal Irradiance (GHI)
3. Diffuse Horizontal Irradiance (DHI)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

۲-۵-۱. دستگاه کالیبراتور میدانی

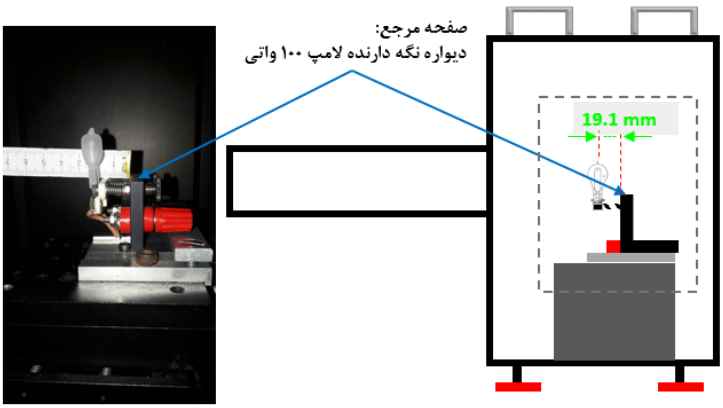
دستگاه کالیبراسیون میدانی (شکل ۶) پیشتر توسط یکی از نویسندگان همین مقاله طراحی شده است و سال‌هاست که در بحث عملیات کالیبراسیون رادیومتریک مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷، ۳۴].



شکل ۶. دستگاه کالیبراتور میدانی

۲-۵-۲. لامپ کالیبراسیون ۱۰۰ وات

لامپ کالیبراسیون ۱۰۰ وات مطابق شکل ۷ در داخل محفظه کالیبراتور میدانی قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های این لامپ امکان تعیین حساسیت سنسور را فراهم نموده و تغییرات حساسیت سنجنده را مشخص می‌نماید.



شکل ۷. لامپ کالیبراسیون ۱۰۰ واتی و محفظه نگه دارنده لامپ در کالیبراتور میدانی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

۲-۵-۳. لامپ‌های کالیبراسیون جیوه و کریپتون

کالیبراسیون طول موج در اندازه‌گیری‌های ایرادیانس با استفاده از موقعیت طول موجی خطوط جذبی-نشری لامپ‌های جیوه و کریپتون انجام می‌گیرد.

۳. مشخصات منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی و پلتفرم لندازه‌گیری‌های تابش خورشیدی واقع در مؤسسه تحقیقات آب و هواشناسی (IMuK) دانشگاه هانوفر، در شهر هانوفر آلمان و در عرض و طول جغرافیایی به ترتیب 9.73°E و 52.37°N می‌باشد. موقعیت ایستگاه اندازه‌گیری تابش خورشیدی در شکل ۸ نمایش داده‌شده است.



شکل ۸. محدوده مطالعاتی

تمامی ابزارها و سیستم‌های اندازه‌گیری ذکر شده در بخش ۲، بر روی سکوی پشت بام مؤسسه آب و هواشناسی دانشگاه هانوفر نصب شدند.

٤. نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

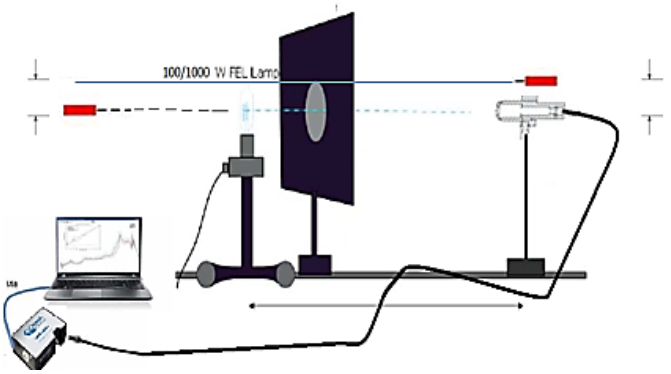
به طور کلی برای تشخیص صحت اندازه‌گیری‌های ایرادیانس انجام شده، لازم است قبل از استقرار سیستم بر روی پلتفرم و ردیابی خورشید، صحت راستای قراولری سیستم و میدان دید مؤثر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

دهانه اپتیکی مورد آزمایش و ارزیابی قرار گیرد. به این منظور دو تست متفاوت در داخل اتاق تاریک و به صورت آزمایشگاهی طراحی و انجام گرفت.

٤-١. تست راستای قراولروی (اندازه‌گیری با لیزر)

به منظور کنترل صحت راستای قراولروی در دهانه اپتیکی و ابزار نشانه‌روی، و همچنین کنترل واحد نگه‌دارنده طراحی شده در IMuK و PTB (مرکز اندازه‌گیری‌های دقیق دولتی آلمان) از روشی کنترلی مبتنی بر تراز لیزر[1] بهره برده شد. آزمایش طراحی شده برای تست دقت راستای اندازه‌گیری در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹. تست لیزر راستای قراولروی

نتایج این تست نشان داد که خطای زاویه‌ای ابزار نگه دارنده و راستای قراولروی سنسور ۰/۰۰۰۲ درجه بوده و حتی در مقیاس‌های بسیار بزرگ هم قابل چشم‌پوشی است.

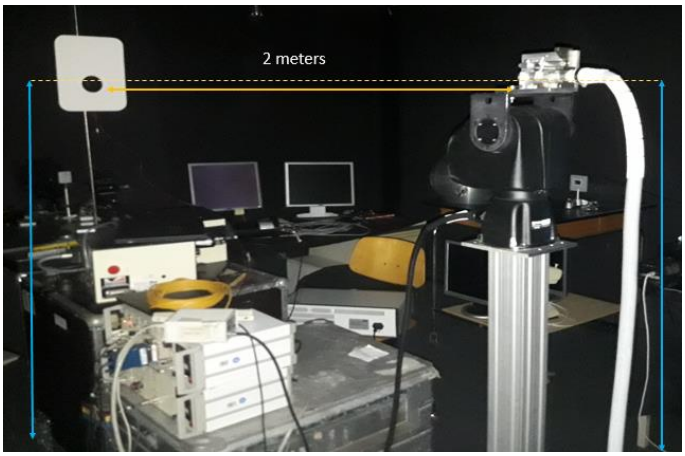
٤-٢. اندازه‌گیری میدان دید مؤثر دهانه اپتیکی (اندازه‌گیری میدان دید در راستای آزیموت و زنیت)

برای کنترل دقت نشانه‌روی به خورشید برای اندازه‌گیری ایرادیانس مستقیم خورشیدی، در آزمایشگاه مقدار میدان دید دهانه اپتیکی اندازه‌گیری می‌شود. برای انجام این تست همزمان از دو روش مکانیکی و اتوماتیک استفاده شد. که به علت جامع، سریع و کامل بودن روش اتوماتیک تنها جزئیات

1. Laser Alignment

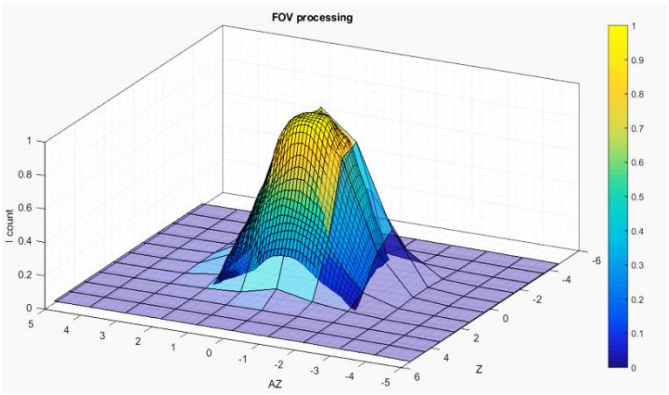
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

این روش در این بخش ارائه شده است. با این حال نتایج اندازه‌گیری‌های مکانیکی هم برای مقایسه و تحلیل بیشتر ارائه شده است. نحوه استقرار آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری میدان دید دهانه اپتیکی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. استقرار آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری میدان دید اپتیکی اسپکترورادیومتر

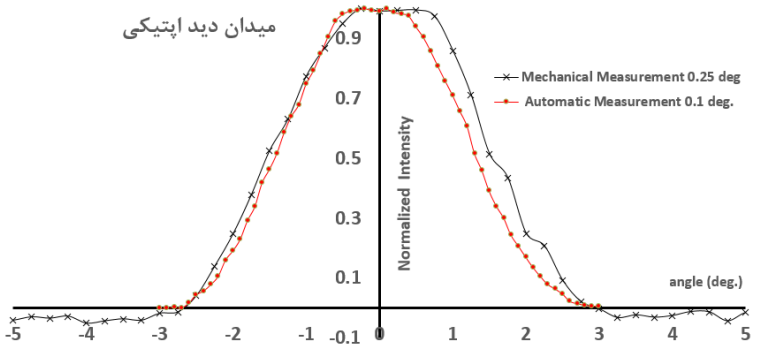
میدان دید دهانه اپتیکی در فضای سه‌بعدی و در هر دو راستای زنیت و آزیموت با دو حد تفکیک متفاوت یک درجه و یک دهم درجه‌ای به روش اتوماتیک انجام گرفت. منحنی کلاه مانند سه‌بعدی حاصله در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. در این نمودار، هر دو رزولوشن یک و ۰/۱ درجه‌ای به صورت همپوشانی‌دار ارائه شده است.



شکل ۱۱. میدان دید سه بعدی دهانه اپتیکی، در دو راستای زنیت و آزیموت و با دو حدتفکیک متفاوت ۰/۱ و ۱ درجه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

شـکل ظاهری میدان دید دهانه اپتیکی مطابق با پیش‌بینی‌های نویسـندگان و به صـورت کلاه[1] اسـت. برای تعیین دقیق‌تر میدان دید حقیقی دهانه اپتیکی و همچنین مقایسـه اندازه‌گیری‌ها با اندازه‌گیری‌های مکانیکی بهتر است که منحنی سه‌بعدی شکل ۱۱ به صورت دوبعدی و در راستای آزیموتی ترسیم شود. بنابراین پروفیل دوبعدی منحنی شکل ۱۱ از یک زاویه متفاوت در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. میدان دید دهانه اپتیکی در راستای آزیموت که با استفاده از ابزار مکانیکی و هم به صورت اتوماتیک اندازه‌گیری شده است.

از شکل ۱۲ واضح است که دقت زاویه‌ای دهانه اپتیکی در نشانه‌روی به خورشید برابر با ۰/۵ درجه اسـت. این مقدار بیشـینه خطای زاویه‌ای اسـت که میدان دید دهانه اپتیکی می‌تواند به اندازه‌گیری‌ها اعمال کند.

۵. نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی و کالیبراسیون اسپکترورادیومتر طیفی

پس از انجام اندازه‌گیری‌های ایرادیانس طیفی مستقیم فرودی خورشیدی با استفاده از ردیاب PTU که مطابق شـکل ۱۳ بر روی پلتفرم اندازه‌گیری پشـت بام IMuK نصـب شـده اسـت، اندازه‌گیری‌های کالیبراسـیون برای کالیبره نمودن طول موج و شـدت ایرادیانس انجام گرفت. سـپس با اسـتفاده از کد محاسباتی به زبان IDL تمامی داده‌های خام اندازه‌گیری شده توسط اسپکترورادیومتر کالیبره شدند.

1. Cap curve

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

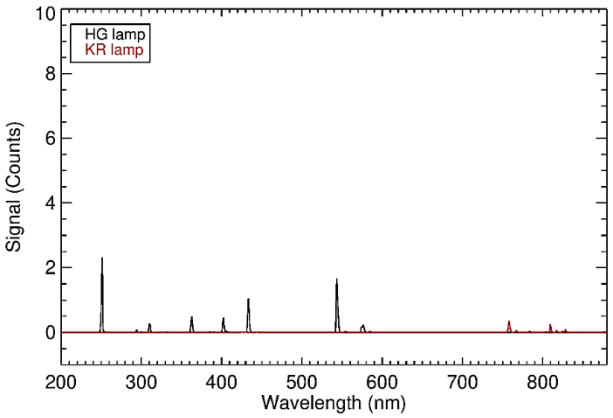


شکل ۱۳. استقرار فعلی سیستم عملیاتی برای اندازه‌گیری جزء تابش فرودی مستقیم

منظور از کالیبراسیون در این اندازه‌گیری‌ها، تمامی تصحیحات مورد نیاز در اندازه‌گیری‌های اسپکترورادیومتری اشاره شده در استاندارد WMO؛ اعم از تصحیح خطی‌سازی[1]، تصحیح طول موج[2]، اعمال ماتریس اعوجاجات نوری[3] و تصحیحات شدت ایرادیانس برمبنای اندازه‌گیری‌های جریان تاریک[4] و لامپ کالیبراسیون ۱۰۰ وات است که باید بر روی داده‌های خام اندازه‌گیری شده اعمال شوند. به عنوان مثال برای انجام تصحیح طول موج، از موقعیت طول موج‌های مشخص لامپ‌های جیوه و کریپتون (مطابق شکل ۱۴) استفاده شد و طول موج اندازه‌گیری شده متناسب با لامپ کالیبراسیون به میزان مشخص شیف داده شدند.

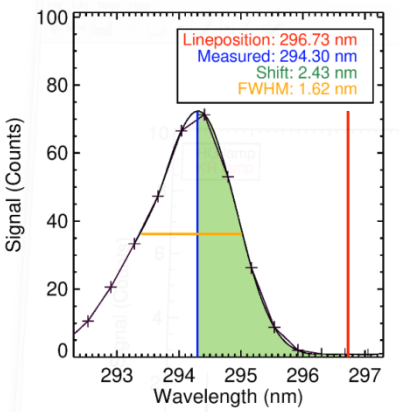
1. Linearity correction
2. Wavelength correction
3. Stray light correction matrix
4. Dark current

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۱۴. موقعیت طول موج‌های مشخص لامپ‌های استاندارد کالیبراسیون کریپتون و جیوه

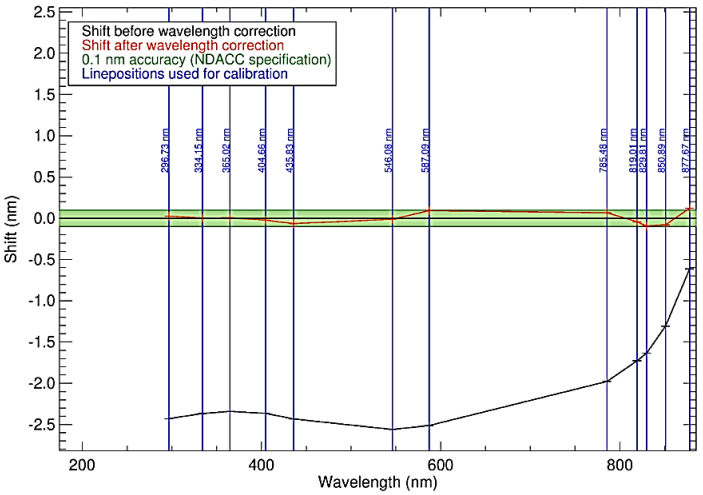
به این ترتیب در طول موج‌های مشخص شده، تصحیحات موقعیت مرکز طول موج متناسب با پهنای باند سنسور اعمال شد. نتایج این تصحیحات مراکز طول موج و مقدار شیفت اعمال شده در هر طول موج در شکل‌های زیر نمایش داده شده است. شکل ۱۵ نتایج تصحیحات برای یکی از طول موج‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. تصحیح موقعیت مرکز طول موج متناسب با اندازه‌گیری‌های لامپ‌های کریپتون و جیوه

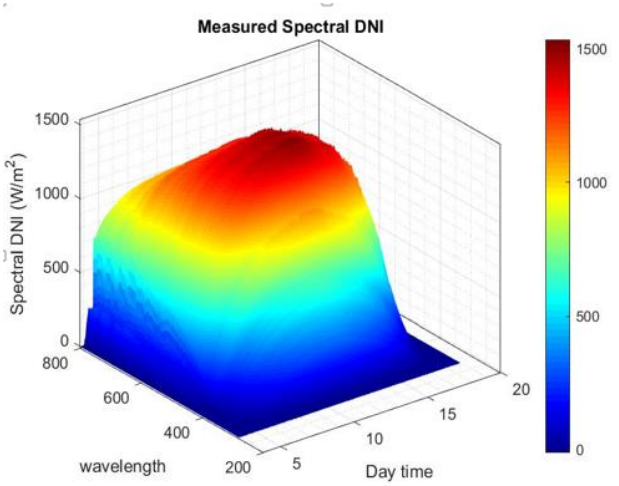
مقدار جابجایی در تمامی طول موج‌های مذکور جهت اعمال تصحیحات طول موجی درشکل ۱۶ نمایش داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۱۶. مقدار جابجایی در طول موج‌های مختلف برای انجام تصحیح طول موج

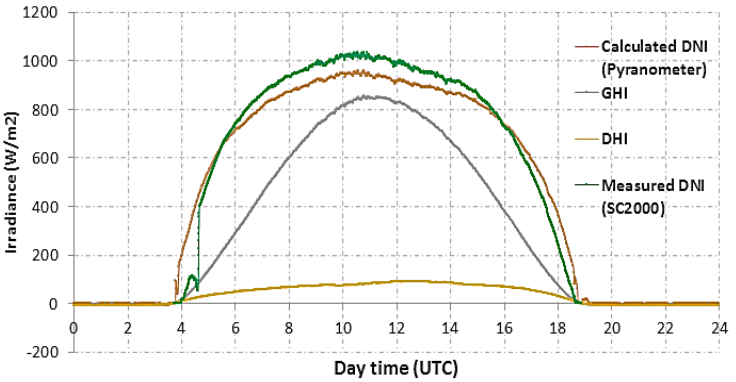
پس از اعمال تمامی تصحیحات و آنالیزهای کالیبراسیون مورد نیاز، مقدار SDNI اندازه‌گیری شد. مقدار SDNI اندازه‌گیری شده در طول یک روز کاملاً آفتابی و شرایط آسمان صاف (مورخ ۸ ماه می ۲۰۱۸) در منطقه مورد مطالعه به صورت یک منحنی سه بعدی (شکل ۱۷) قابل نمایش است.



شکل ۱۷. ایرادیانس طیفی مستقیم فرودی خورشید در طول روز، ۸ می ۲۰۱۸، سکوی پشت بام IMuK، هانوفر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌های پیرانومتری به صورت انتگرالی (غیرطیفی) است، بنابراین برای صحت‌سنجی اندازه‌گیری‌های تابش فرودی مستقیم خورشیدی، می‌بایست مقدار تابش DNI روزانه اندازه‌گیری شده (به عبارت دیگر تابش انتگرالگیری شده بر روی طول موج) را با مقدار DNI محاسباتی از رابطه (۱) مقایسه نمود. بنابراین مقایسه این مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۱۸ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸. مقادیر کمیت‌های اندازه‌گیری شده با پیرانومتر (شامل GHI, DHI و DNI محاسباتی) و اندازه‌گیری‌های DNI برمبنای سیستم عملیاتی حاضر که با استفاده از اسپکترورادیومتر SD2000 اندازه‌گیری شده است.

آن‌چنان که از این مقایسه روشن است و با توجه به نتایج ارائه شده در بالا به نظر می‌رسد همخوانی خوبی بین محاسبات مبتنی بر پیرانومتر و اندازه‌گیری‌های سیستم عملیاتی پیشنهاد شده در این مقاله برقرار است. چرا که همچنین با توجه به مشاوره با متخصصین این حوزه، در یک روز آفتابی با آسمان کاملاً صاف یک نمودار تابش مشابه کلاه (شکل ۱۷، تابش DNI) برای تابش مستقیم خورشیدی مورد انتظار خواهد بود. آنچنان که در شکل ۱۷ مشخص است، این پارامتر در هر دو وضعیت محاسباتی (که حاصل از اندازه‌گیری‌های پیرانومتر بوده و با رابطه فیزیکی (۱) محاسبه شده است) و مشاهداتی (اندازه‌گیری شده توسط سامانه اندازه‌گیری تابش خورشیدی معرفی شده در این مقاله) دارای همخوانی با این فرضیه است. به نحوی که در شکل ۱۷، هر دو نمودار DNI به شکل یک تابع توزیع کلاه مانند[1] هستند.

1. Hat shaped distribution

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

٦. بحث و نتیجه‌گیری

آن‌چنان که پیشتر بیان شد، ایرادیانس طیفی مستقیم خورشیدی، کمیتی بنیادی رادیومتریک است که با استفاده از آن بسیاری از انواع دیگر کمیت‌های رادیومتریک تابش خورشیدی قابل استنتاج می‌باشد. داشتن اطلاعات دقیق از ایرادیانس طیفی مستقیم خورشیدی، می‌تواند محققین را در دستیابی به اطلاعات جدید در حوزه‌های متفاوت تحقیق یاری‌رسان باشد.

تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه استقرار یک ایستگاه اندازه‌گیری تابش فرودی مستقیم خورشیدی طیفی (SDNI) عملیاتی در سطح بین‌المللی و به خصوص در داخل کشور ایران انجام گرفته است. بنابراین آماده‌سازی یک روند عملیاتی از دو دیدگاه ابزار و تکنیک در این نوع اندازه‌گیری‌ها نه‌تنها مهم، بلکه بسیار ضروری است. در این کار پژوهشی، توسعه فنی ابزارهای مورد نیاز برای استقرار یک ایستگاه اندازه‌گیری عملیاتی SDNI در دستور کار قرار گرفته است.

در این مطالعه از راهنمایی‌های موجود در اسناد ذکر شده WMO برای آماده‌سازی استانداردترین ایستگاه اندازه‌گیری تابش خورشیدی در پلتفرم اندازه‌گیری مؤسسه تحقیقات آب و هواشناسی (IMuK) دانشگاه هانوفر آلمان استفاده شد. در این ایستگاه دائم عملیاتی از بروزترین تکنولوژی اندازه‌گیری‌های تابش خورشیدی استفاده شده است. بنابراین زمینه انجام تحقیقاتی که پیش از این ممکن نبود، با توسعه این ایستگاه در مؤسسه تحقیقات آب و هواشناسی دانشگاه هانوفر آلمان، IMuK، فراهم آمد. به این ترتیب، نتایج این تحقیق می‌تواند امکان تأسیس ایستگاه اندازه‌گیری مشابه را در کشور فراهم آورد.

در بخش ۴، تمام اندازه‌گیری‌های مورد نیاز آزمایشگاهی و میدانی و همچنین نتایج مربوط به آنها ارائه شده است. پس از انجام آزمایش‌های متعدد برای کنترل صحت ابزارها، تست عملکرد آنها و همچنین کنترل و توسعه نرم‌افزار مربوط به این ایستگاه، آنچنان که در بخش قبل توضیح داده شد، اسپکترورادیومتر SD2000 از کمپانی تجاری اشن–اپتیکز و سامانه ردیاب PTU برای ردیابی خورشید به عنوان ابزارهای مناسب در این اندازه‌گیری‌ها انتخاب شدند.

نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هم نشان داد که دقت قراولروی به خورشید با استفاده از مجموعه سیستم طراحی شده در این مطالعه بالاتر از ۰/۵ درجه زاویه‌ای است. با توجه به اینکه طبق اطلاعات کلیه منابع موجود در حوزه مطالعات خورشیدی، میدان دید لازم برای اندازه‌گیری مقدار ایرادیانس مستقیم فرودی خورشیدی برابر با ۵ درجه است، بنابراین می‌توان اطمینان داشت که سیستم

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

فعلی اندازه‌گیری‌های دقیقی را حاصـــل خواهد نمود. چراکه نســـبت زاویه دقت قراولروی به میدان دید اندازه‌گیری سامانه مورد نظر قابل قبول به نظر می‌رسد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری همزمان با سیستم عملیاتی حاضر و اندازه‌گیری‌های پیرانومتری در این مطالعه، آن‌چنان که در شکل ۱۷ نمایش داده شده است، نشان‌دهنده انطباق بالای اندازه‌گیری‌ها در دو سیستم بود که مشخص‌کننده صحت عملکرد سیستم استقرار یافته در IMuK است.

در ادامه این پژوهش با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌های این سیسـتم به صـورت طیفی انجام گرفته اسـت، هدف محققین ارزیابی نتایج با اسـتفاده از مدل‌های انتقال تابش متعدد اسـت. به علاوه پیشـنهاد می‌شـــود از نتایج این پژوهش در مطالعات ابر، اســـتخراج اطلاعات آیروســـول‌ها، تعیین مکان پنل‌های خورشیدی و سایر کاربردهای متعدد ممکن بهره برده شود. نکته مهمتر آنکه استقرار چنین ایستگاهی به عنوان مبنای ارزیابی اندازه‌گیری‌های سـنجش از دوری از اهمیت بسـزایی برخوردار اسـت. بنابراین این نوع از مطالعات به عنوان مطالعه‌ای پایه‌ای در پژوهش‌های سنجش از دوری حائز اهمیت است.

سپاسگزاری

در این بخش نویسندگان این کار پژوهشی بر خود واجب می‌دانند که از تمامی حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشگاه هانوفر، سازمان امور دانشجویان کل کشور ایران و بنیاد ملی نخبگان که در عملی شدن این پروژه یاری‌رسان بودند مراتب بالای قدردانی و سپاس را به عمل آورند. به علاوه از همکاری‌های فوق‌العاده پربار و پرتلاش همکاران عزیز جناب آقای دکتر مایکل شـرمف و آقای مهندس هلگر شـیلکه و پرفسـور گانتر سـکمیر که در تمامی مراحل اجرا، نصـب، آنالیز، طراحی و پیاده‌سـازی ایسـتگاه اندازه‌گیری در دانشـگاه هانوفر آلمان یاری‌رسـان بودند صـمیمانه قدردانی می‌کنیم.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

منابع

[1] Antuna-Marrero J.C., Cachorro V. E., Garcia F., Estevan R., Barja B. and A.M. deFrutos (2016). "Calculating Direct Normal Irradiance from sun Photometer Measurements", Atmospheric Measurement Techniques Discussions.

[2] Bais A.F., Lubin D., Arola A., Blumthaler M., Chubarova N., Erlick C., Gies H.P., Krotkov N., Lantz K., Mayer B., Seckmeyer G. and C.S. Zerefos (2007). Surface Ultraviolet Radiation Past, Presence and Future. Surface Ultraviolet Radiation, Scientific assessment of Ozone Depletion.

[3] Bakhtyari V. and R. Fayaz (2019). "Capabilities and Limitations of Energy Optimization Tools in Architectural Design Phase." NECjournals 22(1), pp.127-150.

[4] Beringer S., Schilke H., Lohse I. and G. Seckmeyer (2011). "Case Study Showing that the Tilt Angle of Photovoltaic Plants is Nearly Irrelevant." *Solar Energy* 85(3): 470-476.

[5] Bernhard G., Seckmeyer G., McKenzie R. L. and P. V. Johnston (1998). "Ratio Spectra as a Quality Control Tool for Solar Spectral UV Measurements." *Journal of geophysical research*: atmosphere 103(D22): 28885.

[6] Bernhard G. and G. Seckmeyer (1997). "New Entrance Optic for Solar Spectral uv Measurements", *Photochemistry and photobiliogy* 65(6).

[7] Bird R.E. and C. Riordan (1986). "Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres" *American Meteorological Society*.

[8] Blumthaler M., Webb A. R., Seckmeyer G., Bais A. F., Huber M. and B. Mayer (1994). "Simultaneous Spectroradiometry: A Study of Solar UV Irradiance at Two Altitudes." *Geophysical research letters*, 21(25), pp. 2805-2808.

[9] Cordero P.R., Seckmeyer G., Jorquera D.A.J., Carrasco J., Munoz R., Da Silva L., Labbe F. and D. Laroze (2014). "Aerosol effects on the UV irradiance in Santiago de Chile" *Atmospheric Research* 149.

[10] Cordero R.R., Damiani A., Da Silva L., Laroze D. and F. Labbe (2013). "Spectral UV radiance measured at a coastal site: a case study." *Photochem. Photobiol*. Sci. 12.

[11] Cordero R.R., Seckmeyer G. and F. Labbe (2007). "Evaluating the uncertainties of data rendered by computational models." *Metrologia* 44: L23-L30.

[12] Dubovik O. and M.D. King (2000). "A flexible Inversion Algorithm for Retrieval of Aerosol Optical Properties from Sun and sky Radiance Measurements." *Journal of Geophysical Research*: Atmospheres 105(D16): pp. 20673-20696.

[13] Dubovik O., B. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré and I. Slutsker (2002). "Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations." *Journal of the Atmospheric Sciences* 59(3), pp. 590-608.

[14] Gröbner J., Schreder J., Kazadzis S., A.F. Bais, Blumthaler M., Görts P., Tax R., Koskela T., Seckmeyer G., Webb A.R. and D. Rembges (2005). "Traveling

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

reference spectroradiometer for routine quality assurance of spectral solar ultraviolet irradiance measurements" *Applied Optics* 44(25), pp.5321-5331.

[15] Hirsch E. and E.K. Agassi (2012). "Determination of Optical and Microphysical Properties of thin Warm Clouds using Ground based Hyperspectral Analysis." *Atmospheric Measurement Techniques* 5(4)

[16] Hofmann M. and G. Seckmeyer (2017). "Influence of Various Irradiance Models and their Combination on Simulation Results of Photovoltaic systems." *Energies* 10.

[17] Holben B.N., Tanré D., Smirnov A., Eck T .F., Slutsker I., Abuhassan N., Newcomb W.W., Schafer J. S., Chatenet B., Lavenu F., Kaufman Y. J., Castle J. V., Setzer A., Markham B., Clark D., Frouin R., Halthore R., Karneli A., O'Neill N.T., Pietras C., Pinker R.T., Voss K. and G. Zibordi (2001) "An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET." *Journal of Geophysical Research*: Atmospheres 106(D11): pp.12067-12097.

[18] Hulstrom R., Bird R. and C. Riordan (1985). "Spectral Solar Irradiance data Sets for Selected Terrestrial Conditions" *Solar cells* 15(4), pp. 365-391.

[19] Kouremeti N., Bais A., Kazadzis S., Blumthaler M. and R. Schmitt (2008). "Charge-coupled device spectrograph for direct solar irradiance and sky radiance measurements" *Applied Optics* 47.

[20] Mayer B. and K. A. (2005). "The libRadtran Software Package for Radiative Transfer Calculations-description and Examples of use." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

[21] Mayer B., Seckmeyer G. and A. Kylling (1997). "Systematic long-term Comparison of Spectral UV Measurements and UVSPEC Modeling Results." *Journal of Geophysical Research*: Atmospheres 102(D7): pp.8755-8767.

[22] Mazière M. D., Thompson A. M., Kurylo M. J., Wild J. D., Bernhard G.O., Hannigan J., Lambert J.C., Leblanc T., Blumenstock T., McGee T.J., Nedoluha G., Petropavlovskikh I., Seckmeyer G., Simon P., Steinbrecht W. and S.E. Strahan (2018). "The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (ndacc): history, Status and Perspectives." *Atmospheric Chemistry and Physics*.

[23] Mlawer EJ , Brown PD , Clough SA, Harrison LC, Michalsky JJ, Kiedron PW and S.T. (2000). "Comparison of Spectral Direct and Diffuse Solar Irradiance Measurements and Calculations for Cloud-free Conditions." *Geophysical research letters* 27(17), pp. 2653–2656 .

[24] Moradimajd N. and A. Entezari (2018). "Pre-Feasibility Study of a Solar Power Plant Project: Case of Ahwaz City." *NECjournals* 21(3), pp. 125-146.

[25] Mubarak R., Hofmann M., Riechelmann S. and G. Seckmeyer (2017). "Comparison of Modelled and Measured Tilted Solar Irradiance for Photovoltaic Applications" *Energies* 10.

[26] Niedzwiedz A., Thuns N. and G. Seckmeyer (2017). "Measurement of Spectral Irradiance on Tilted Surfaces - a Condition for Balancing PT power Generation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

and Demand". *International symposium on optimization of short-term solar energy variability* – OSTSEV.
[27] Seckmeyer G. (1989). "Spectral measurements of the variability of global UV-radiation." *Meteorologische Rundschau*, Springer: pp. 180-183.
[28] Seckmeyer G. (2001). Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation: Part 1: Spectral Instruments.
[29] Seckmeyer G. (2015). Facts about Solar Energy. Rotary Club, Alexandra, New Zealand.
[30] Seckmeyer G. (2017). "Solar Energy in Germany: Current Status and the Future Perspectives and Challenges for Expanding Solar Energy Share". *International symposium on optimization of short-term solar energy variability* – OSTSEV.
[31] Seckmeyer G., Bais A., Bernhard G. and M. Blumthaler (2005). Instruments to measure solar ultraviolet radiation. Part 2: Broadband instruments measuring erythemally weighted solar irradiance. WOM-GAW report.
[32] Seckmeyer G., Bais A., Bernhard G. and M. Blumthaler (2010). Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation, Part 4: Array Spectroradiometers. WMO, Global atmospheric watch report.
[33] Seckmeyer G., Pissulla D., Glandorf M., Henriques D., Johnsen B., Webb A., Siani A.M., Bais A., Kjeldstad B., Brogniez C., Lenoble J., Gardiner B., Kirsch P., Koskela T., Kaurola J., Uhlmann B., Slaper H., Outer P.D., Janouch M., Werle P., Gröbner J., Mayer B., Casiniere A. D. L., Simic S. and F. Carvalho (2008). "Variability of UV Irradiance in Europe." *Photochemistry and Photobiology* 84(1): 172-179.
[34] Seckmeyer G., Bernhard G., Mayer B. and R. Erb (1995/96). "High-accuracy spectroradiometry of solar ultraviolet radiation." *Metrologia*, No.32, pp.697-700.
[35] Seckmeyer G., Schrempf M., Wieczorek A., Riechelmann S., Graw K., Seckmeyer S. and M. Zankl (2013). "A Novel Method to Calculate Solar UV Exposure Relevant to Vitamin D Production in Humans." *Photochemistry and Photobiology* 89(4): 974-983.
[36] Seckmeyer G., Thiel S., Blumthaler M., Fabian P., Gerber S., Gugg-Helminger A., Häder D.P., Huber M., Kettner C., Köhler U., Köpke P., Maier H., Schäfer J., Suppan P., Tamm E. and E. Thomalla (1994). "Intercomparison of spectral-UV-radiation measurement systems" *Applied Optics* 33(33): 7805.
[37] Thomas G. and K. Stamnes (1999). "Radiative transfer in the atmosphere and ocean". Univ. Press.
[38] Vaxelaire P., Leveau J., Menguy G. and S.Baldy (1991). "Ground-level spectral distribution of solar direct-normal irradiance and marine aerosol attenuation coefficients at Reunion Island." *Solar Energy*, Elsevier 47(3), pp. 189-196.
[39] Webb A.R., Gardiner B. G., Leszczynski K., Mohnen V., Johnston P., Harrison N. and D. Bigelow (2003). "Quality assurance in monitoring solar ultraviolet radiation: state of the art WMO/GAW" No. 146. *World Meteorological Organisation*, Geneva.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

[40] Weele M., Martin T. J., Blumthaler M., Brogniez C., Outer P. N. d., Engelsen O., Lenoble J., Mayer B., Pfister G., Ruggaber A., Walravens B., Weihs P., Gardiner B. G., Gillotay D., Haferl D., Kylling A., Seckmeyer G. and W.M.F. Wauben (2000). "From Model Intercomparison toward Benchmark UV Spectra for Six Real Atmospheric Cases." *Journal of Geophysical Research*: Atmospheres 105(D4): pp. 4915-4925.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]